



Enero – Diciembre 2020, Vol. 27, N° 1–3, ISSN 1316–6832  
Online ISSN: 2610-8240



# 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](http://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 (United 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 Tribunal 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). ✉

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

Prof<sup>a</sup>. Lisbeth Manganiello, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2009-2018). ✉

---

#### **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**

Prof<sup>a</sup>. Evelyn Yamal. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Prof<sup>a</sup>. Lissette Jiménez. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

---

Prof<sup>a</sup>. Beatriz Herrera. Dra. Universidad Católica de Leuven, Bélgica. ✉

---

#### **Corrector de redacción y estilo**

Prof<sup>a</sup>. 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. Herbert 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 Venezolano 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  
\*Lista parcial

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

### 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 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, 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*)

<b>Volumen 27 Número 1</b>	<b>1</b>
<b>Editorial volumen 27 número 1</b>	<b>2</b>
<i>José Luis Nazar<sup>†</sup>, Ángel Almarza-Morales, Lisbeth Manganiello</i>	
<b>1 Posthumous tribute to the Professor José Luis Nazar Álvarez</b>	
Homenaje póstumo al Prof. José Luis Nazar Álvarez	
<i>Ángel Almarza-Morales</i>	<b>4</b>
<b>2 An efficient hybrid recommender system framework using semantic technology for social networks</b>	
<i>Framework de un sistema de recomendación híbrido eficiente utilizando tecnología semántica para redes sociales</i>	
<i>Ali Pazahr, J. Javier Samper Zapater, Francisco García Sánchez</i>	<b>6</b>
<b>3 Organo-clay material as coalescer oil filter in the treatment of oil production waters</b>	
Material organo-arcilloso como filtro coalescedor de crudo en el tratamiento de aguas de producción petrolera	
<i>Johnny Bullón, Jesús David Prato, Victoria Mousalli, Franklin Salazar, Leonardo Rennola</i>	<b>20</b>
<b>4 Determination of factors that affect the design of cryptographic algorithms by a cybernetic meta-model, validated with Q-analysis</b>	
Determinación de los factores que afectan el diseño de algoritmos criptográficos por medio de un meta-modelo cibernético, validado con análisis-Q	
<i>Ali Norouzzadeh-GilMolk, Reza Ramazani-Khorshiddoust, Mohammad Aref</i>	<b>29</b>
<b>5 Vibration assessment of transmission bearings of a mini Baja SAE prototype</b>	
Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE	
<i>Enrique Flores, Andrés Albornoz, Erwin López, Jorge Romero</i>	<b>41</b>

- 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  $\LaTeX$  in academic activities in the Mathematic Department of the Engineering Faculty**
- $\LaTeX$  en 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**

<b>Volumen 27 Número 2</b>	<b>115</b>
<b>Editorial volumen 27 número 2</b>	<b>116</b>
<i>Manuel Jiménez-Bahri, Ángel Almarza-Morales</i>	
<b>12 Review: Chitosan, a versatil biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications</b>	
<i>Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones</i>	
<i>Alied Romero Serrano, Juan Pereira</i>	<b>118</b>
<b>13 Effect of the arrangement of drip irrigation laterals and partial soil drying on potato yield</b>	
<i>Efecto de la disposición de laterales de riego por goteo y secado parcial del suelo en el rendimiento de papa</i>	
<i>Miguel Sánchez-Delgado, Jesús Mejía-Marcacuzco, Edilberto Guevara-Pérez, Piero Natividad-Toribio, Luis Razuri-Ramírez</i>	<b>136</b>
<b>14 Phenol degradation and HPLC identification of products generated using red mud as a catalyst in solar advanced oxidation processes</b>	
<i>Degradación de fenol e identificación por HPLC de los productos generados utilizando lodo rojo como catalizador en procesos de oxidación avanzada solar</i>	
<i>Guillermo Centeno-Bordones, Leidy Pernía, Ygmar Jiménez<sup>†</sup>, José V. García</i>	<b>150</b>
<b>15 Treatment wastewater of slaughterhouses through technology advanced oxidation: fenton process</b>	
<i>Tratamiento de aguas residuales de camales mediante tecnologías avanzadas de oxidación: proceso fenton</i>	
<i>Carlos Medina-Valderrama, Wilmer Uriarte-Tirado, Ernesto Cardenas-Vásquez, Salvador Orrego-Zapo</i>	<b>165</b>
<b>16 Using Agent Base Model for managing the critical situation of groundwater resources and aquifer balancing (Case study: Iran-Qazvin Plain Aquifer)</b>	
<i>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)</i>	
<i>Hamid Rahmani, Ali saremi, Shahab Araghinejad, Hossain Babazadeh</i>	<b>175</b>

**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**

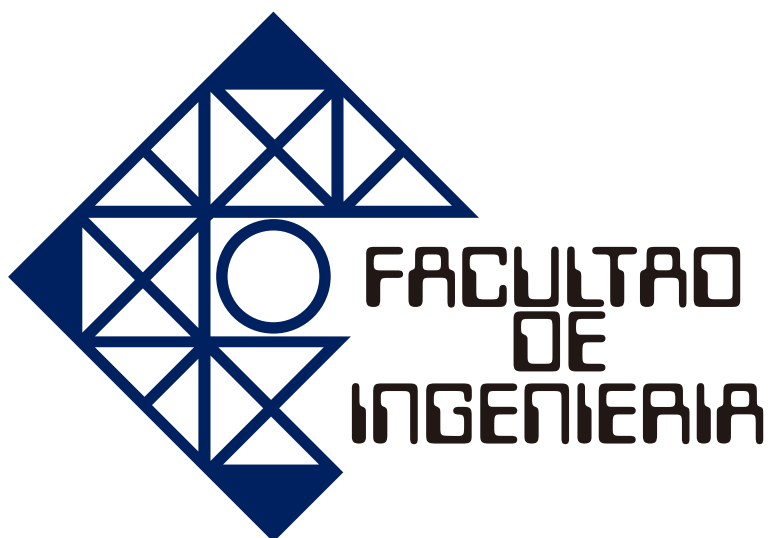
**245**



<b>Volumen 27 Número 3</b>	<b>246</b>
<b>Editorial volumen 27 número 3</b>	<b>247</b>
<i>Manuel Jiménez-Bahri, Ángel Almarza-Morales</i>	
<b>23 Estado del arte. Avances recientes en el diseño de nanoemulsiones: conceptos y tendencias sobre nanocosméticos</b>	
<i>Review. Recent advances in nanoemulsions design: concepts and trends across nanocosmetics</i>	
<i>Ruth Monroy, Juan Pereira</i>	<b>249</b>
<b>24 Caracterización e incorporación de un extracto de semillas de parchita (<i>Passiflora edulis</i>) en un hidrogel</b>	
<i>Characterization and incorporation of an extract of passion fruit seeds (<i>Passiflora edulis</i>) in a hydrogel</i>	
<i>Emilly Scotti, Ingrid Velásquez, Luis Ojeda, Franklin Pacheco, Nirza Noguera-Machado</i>	<b>273</b>
<b>25 Design of Low Power Fast Full Adder using Domino Logic Based on magnetic tunnel junction and Memristor</b>	
<i>Diseño de sumador completo rápido de baja potencia utilizando Domino Logic basado en unión de túnel magnético (UTM) y Memristor</i>	
<i>Pooria Parvizi, Reza Sabbaghi-Nadooshan, Mohammad Bagher Tavakoli</i>	<b>282</b>
<b>26 High-Performance <math>4 \times 1</math> Multiplexer based on Single-Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor with CMOS-like Pass-Transistor Logic</b>	
<i>High-Performance <math>4 \times 1</math> Multiplexer based on Single-Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor with CMOS-like Pass-Transistor Logic</i>	
<i>Hamed Fooladvand, Karim Abbasian, Hamed Baghban</i>	<b>294</b>
<b>27 Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción</b>	
<i>Determination of the characteristics of the wheat straw bale, as an agro-industrial waste for use as a construction material</i>	
<i>Paulina Viera, Darío Aguirre, José María Monzó</i>	<b>304</b>

- 28 Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú**
- Efficiency of water collection for three types of mesh trappers in rural highlands of the northern highlands of Peru
- Luis Vásquez Ramírez, Luis Cieza-León, Dante Cieza-León* **319**
- 29 Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz, Áncash, Perú**
- Estimation model of the Manning roughness coefficient as a function of granulometry in the Santa River, Recuay–Carhuaz sector, Áncash, Perú
- Abelardo Díaz–Salas, Edilberto Guevara–Pérez, Juan Rosales–Cueva* **328**
- 30 Modelo matemático de conductividad eléctrica en función del flujo acuífero en suelos usando mallado de flujos**
- Mathematical model of electrical conductivity as a function of water flow in soils using Flow Net
- David Duarte-González* **343**
- 31 An assessment of development level of villages in Lorestan province using numerical taxonomy method**
- Evaluación del nivel de desarrollo de las aldeas en la provincia de Lorestán utilizando el método de taxonomía numérica
- Maryam Hasanvandia, Alireza Poursaeed, Roya Eshraghi Samani, Hamed Chaharsoughi Amin* **353**
- 32 Measuring angular coordinates in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) positioning systems and developing a new phase-metric method for goniometric control of UAVs**
- Medición de las coordenadas angulares en los sistemas de posicionamiento de Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) desarrollando un nuevo método fase-métrico para el control goniométrico de los VANT
- O. R. Kuzichkin, G. S. Vasilyev, D. I. Surzhik, A. V. Grecheneva, I. A. Kurilov, S. M. Kharchuk* **367**
- 33 Diseño del sistema de suspensión para vehículo de acuerdo con parámetros BAJA SAE**
- Suspension system design for a vehicle under BAJA SAE parameters
- Omar Franco-Camacho, María Mago-Ramos, Ricardo Ríos, Luis Vallés-Defendine* **374**
- Índice de materias** **388**

<b>Subjects index</b>	<b>390</b>
<b>Índice de autores (<i>Author index</i>)</b>	<b>393</b>
<b>Apéndices</b>	<b>1</b>
<b>A. Línea editorial</b>	<b>2</b>
<b>B. Editorial line</b>	<b>3</b>
<b>C. Políticas de ética y publicación</b>	<b>4</b>
<b>D. Ethics and Publication Policies</b>	<b>8</b>
<b>E. Normas para la presentación de artículos</b>	<b>11</b>
<b>F. Authors Information</b>	<b>14</b>
<b>G. Carta de compromiso</b>	<b>16</b>
<b>H. Compromise letter</b>	<b>17</b>
<b>I. Índices de Revista Ingeniería UC</b>	<b>18</b>



# **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 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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 coalescedor 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  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  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  $30\ \mu\text{m}$  hasta  $200\ \mu\text{m}$  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*<sup>†</sup>  
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 <sup>\*,a</sup> , José Javier Samper-Zapater <sup>b</sup> , Francisco García-Sánchez <sup>c</sup> 

<sup>a</sup> Department of Computer Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz branch. Ahvaz, Iran.

<sup>b</sup> University research institute on Robotics and Information and Communications Technologies (IRTIC), University of Valencia. Valencia, Spain.

<sup>c</sup> 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 $\times$ user $\times$ 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.

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

Figure 1: The main rating matrix

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

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

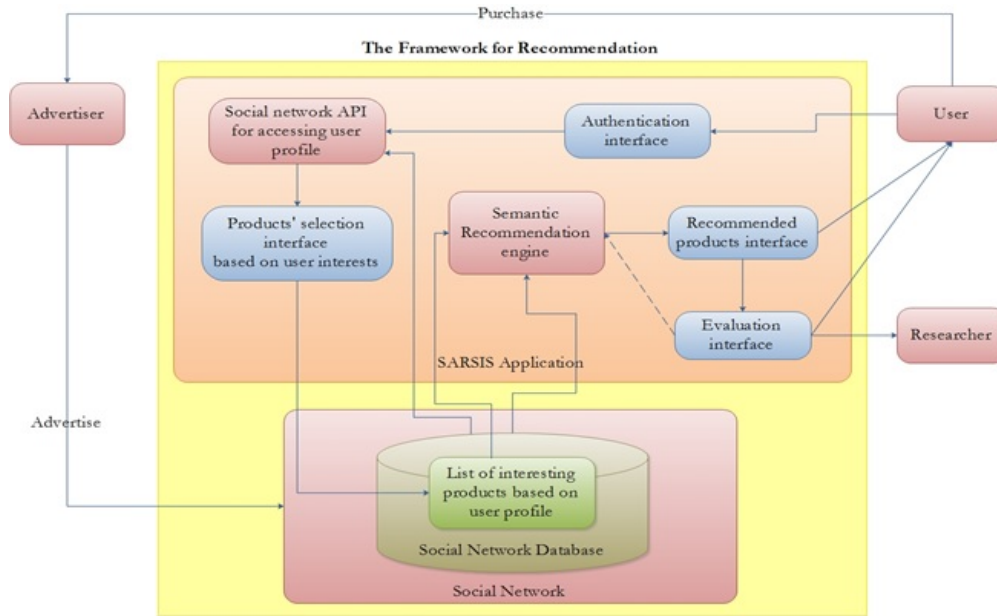


Figure 3: The suggested framework of recommender system

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.

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

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  $\bar{r}_u$ . Using equation (6) [39] the unrated cells of the matrix  $w$  were estimated:

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

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):

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

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):

$$Total\_it_{rate} = \sum_{i=1}^n (it_{rate}(i)) \quad (8)$$

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

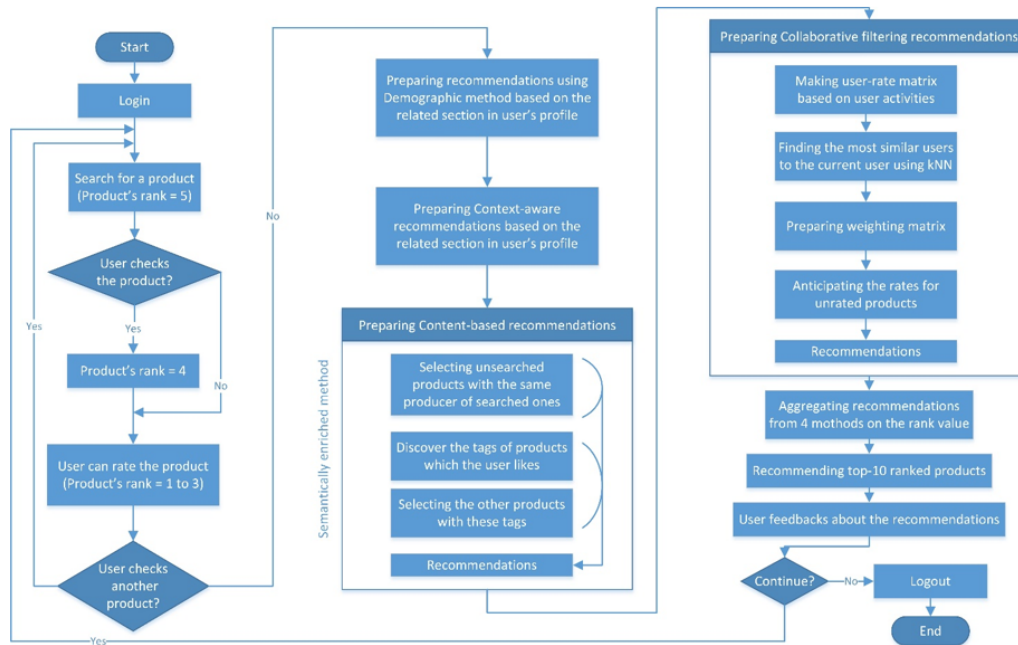


Figure 4: Implementation and work model

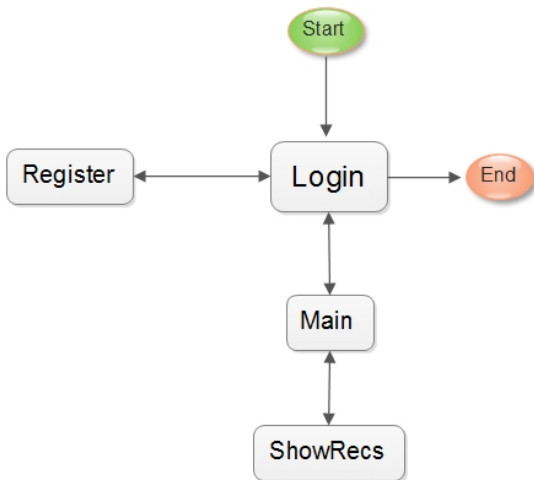


Figure 5: The navigation of web pages in SARSIS

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.

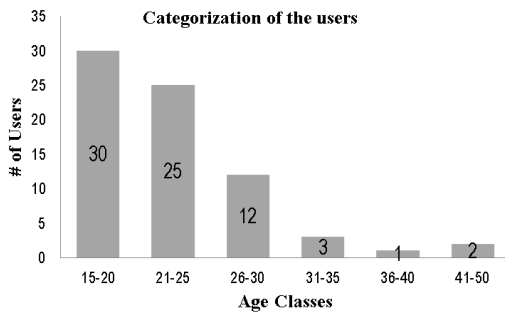


Figure 6: User’s age classes

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.

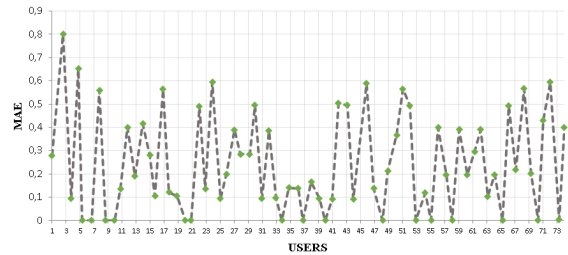


Figure 8: MAE for all users

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

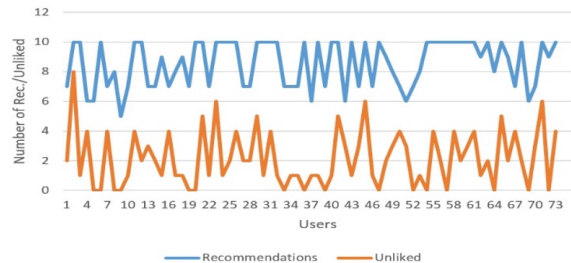


Figure 9: The number of recommended music tracks for each user versus the numbers of unliked recommended music tracks

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

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

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

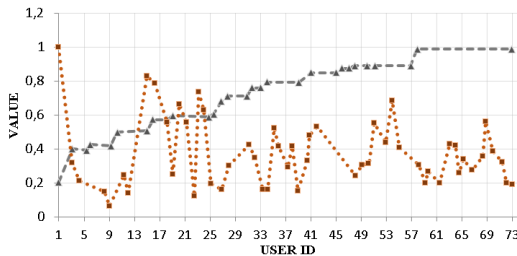


Figure 11: Precision (▲) and Recall (■) curves

### 7. Discussion

The current research has described a novel framework including special specifications and

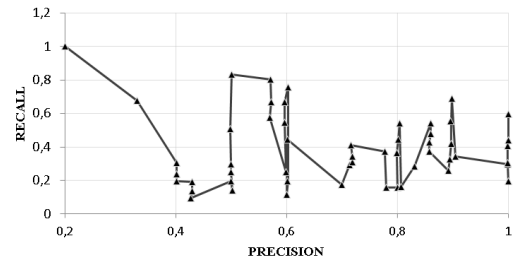


Figure 12: Graph of recall based on precision

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]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	kNN	Pseudo-tag&tag	Precision & Recall	(3174 track, 764 artist)	Pseudo-tag&tag.
CAMRST [23]	✗	✓	✓	✗	✗	User rating	cosine similarity	CF, CA	Precision & Recall, F1	Last.fm (2747 users, 7805 items)	✗
RABCRS [24]	✓	✗	✗	✓	✗	User rating	Clustering	CF, Demo	Accuracy, Complexity	MovieLens (943 users, 1682 movies)	Clustering, ranking Aggregation
TIIREC [25]	✓	✓	✗	✗	✗	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. Elsdén, 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 Services November 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. Subramaniaswamy, 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 <sup>\*,a</sup> , Jesús David Prato <sup>a</sup> , Victoria Mousalli <sup>a,b</sup> ,  
Franklin Salazar <sup>a</sup> , Leonardo Rennola <sup>c</sup> 

<sup>a</sup>Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP), Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

<sup>b</sup>Departamento de Geología General, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

<sup>c</sup>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)

### Tratamiento de aguas residuales (emulsiones O/W)

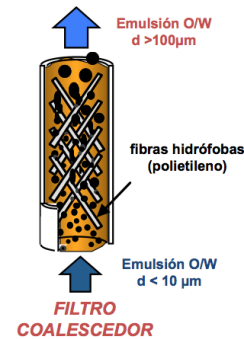


Figura 1: Principio del funcionamiento de un filtro coalescedor de emulsiones [5].

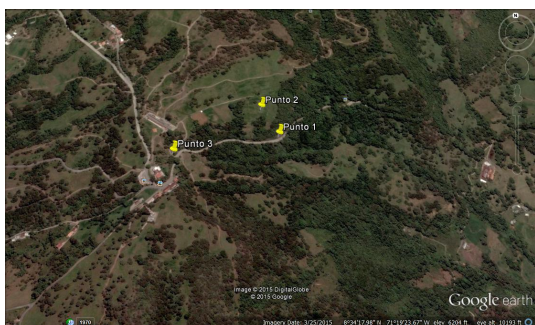
[17, 20, 21], variando las condiciones de operación (velocidad superficial) [22] y considerando las características de la emulsión (concentración de la emulsión, tamaño de gota, características del surfactante) [23]. Debido a que aun no están muy claros los mecanismos de coalescencia, la optimización 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, la 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 difracción 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 ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) 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 mezclando el agua, el pirofosfato de sodio y el crudo, agitando 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

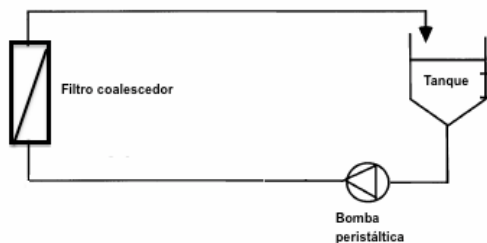


Figura 5: Esquema del circuito de filtración.

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 microfósilíferas 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 clorhídrico (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.

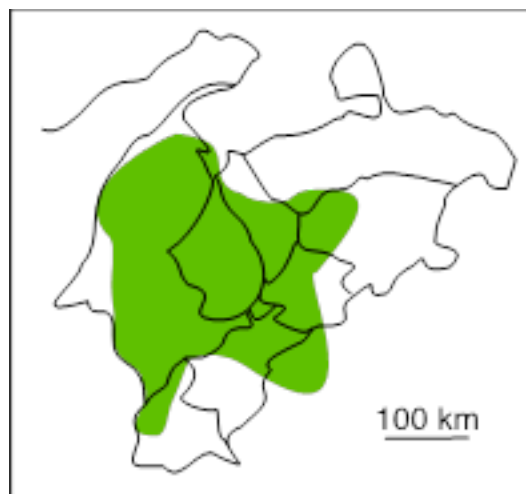


Figura 6: Ubicación y distribución geográfica de la Formación Colón (formación geológica de edad Cretácica en el Flanco Surandino, en Venezuela).

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  $1050\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a tensión asimétrica, banda entre  $800$  y  $780\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a tensión simétrica. También se presenta la banda de absorción en  $694,05\text{ cm}^{-1}$  que evidencia la presencia de silicato en forma cristalina (Cuarzo) [26].

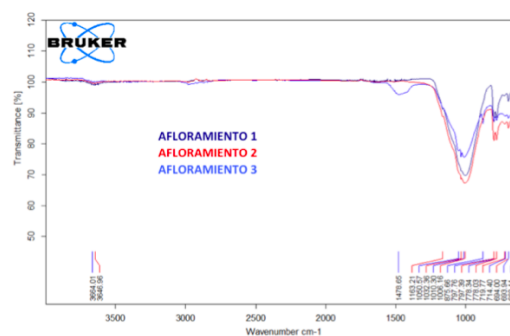


Figura 7: Espectro de infrarrojo de muestras de afloramiento de la Formación Colón.

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

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

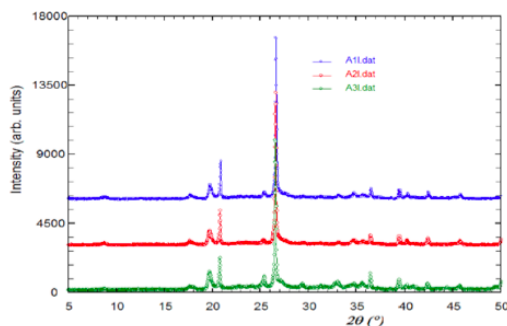


Figura 8: Espectro de difracción de rayos X de muestras de afloramiento de la Formación Colón.

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  $1478\text{ cm}^{-1}$ , que podría estar asociada a la tensión asimétrica y una banda intensa en  $875\text{ cm}^{-1}$  asociada a flexión fuera del plano. Existe una banda débil en  $714\text{ cm}^{-1}$  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  $26,65\ 2(\theta)$  correspondiente a cuarzo,  $8,9$  y  $19,8\ 2(\theta)$  que podrían sugerir la presencia de formas cristalinas de material arcilloso como la illita, y específicamente en el Afloramiento 3, una señal en  $29,5\ 2(\theta)$  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  $800\text{ °C}$ , 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 $800\text{ °C}$	Tratado con surfactantes. (antes filtración)	Con crudo adsorbido (luego de filtración)
1	$88,99^\circ$	$81,67^\circ$	$85,09^\circ$
2	$75,33^\circ$	$90,00^\circ$	$87,03^\circ$
3	$59,90^\circ$	$77,35^\circ$	$89,91^\circ$

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  $59,90^\circ$  y el menos hidrofílico es el afloramiento 1 con  $88,99^\circ$ . 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  $\mu\text{m}$ ) 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) ( $\mu\text{m}$ )	Dv(0,5) ( $\mu\text{m}$ )	Dv(0,9) ( $\mu\text{m}$ )	Span ( $\mu\text{m}$ )
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 Prof<sup>a</sup>. 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 Chemistry*, 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. Gadhav, 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 organo-clay/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. Pejčić, L. Esteban, C. Píanel, 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<sub>2</sub> 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<sup>a</sup> , Reza Ramazani-Khorshiddoust<sup>\*,b</sup> ,  
Mohammad Aref<sup>c</sup> 

<sup>a</sup> Islamic Azad University, North Tehran Branch. Tehran, Iran.

<sup>b</sup> Amirkabir University of Technology. Tehran, Iran.

<sup>c</sup> 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'être* 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'être* 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,

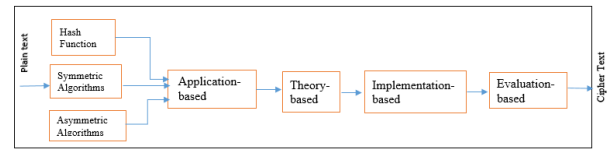


Figure 1: A typical main process of a cryptographic algorithm, in highest level

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.

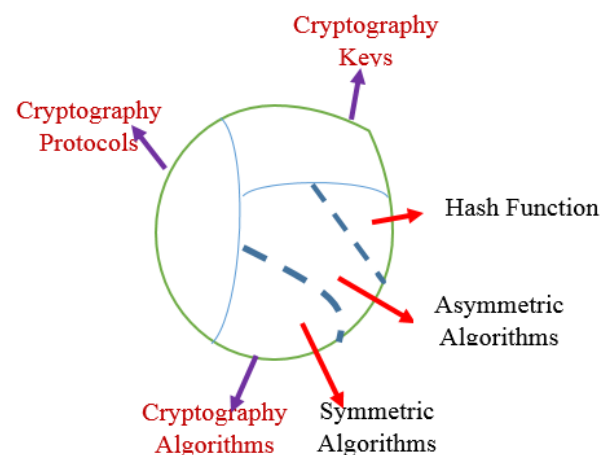


Figure 2: Cryptographic system (Level 1)

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.

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

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

Support Process		Core/Main Process Cryptography algorithms				Level 1
		[A]	[B]	[C]	[D]	Level 2 Level 3
soft	Cultural	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

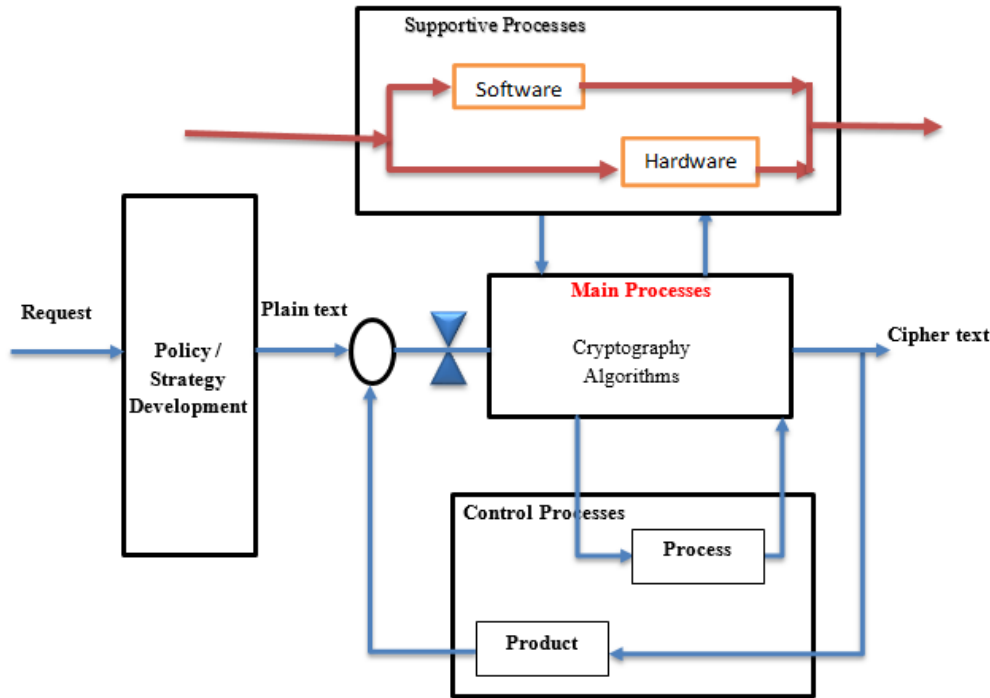


Figure 3: Proposed cybernetic cryptography model in conceptual level (Level 2)

Table 3: Indicators of four stages of cryptographic algorithms

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 " $\alpha$ -cut parameter", by defining a one-to-one function as is presented in equation (1):

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

Where  $b_{ij}$  or  $\alpha_{ij}$  is the entity of the  $i$ th row and the  $j$ th 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  $\alpha$ -cut parameter, different "incidence matrices" are obtained. The  $\alpha$ -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 simplicial complex set, or  $KD(C, \lambda)$ , such that: The entities of set " $D$ " represent the simplexes (support indicators)  $\sigma_p(d_i)$  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:

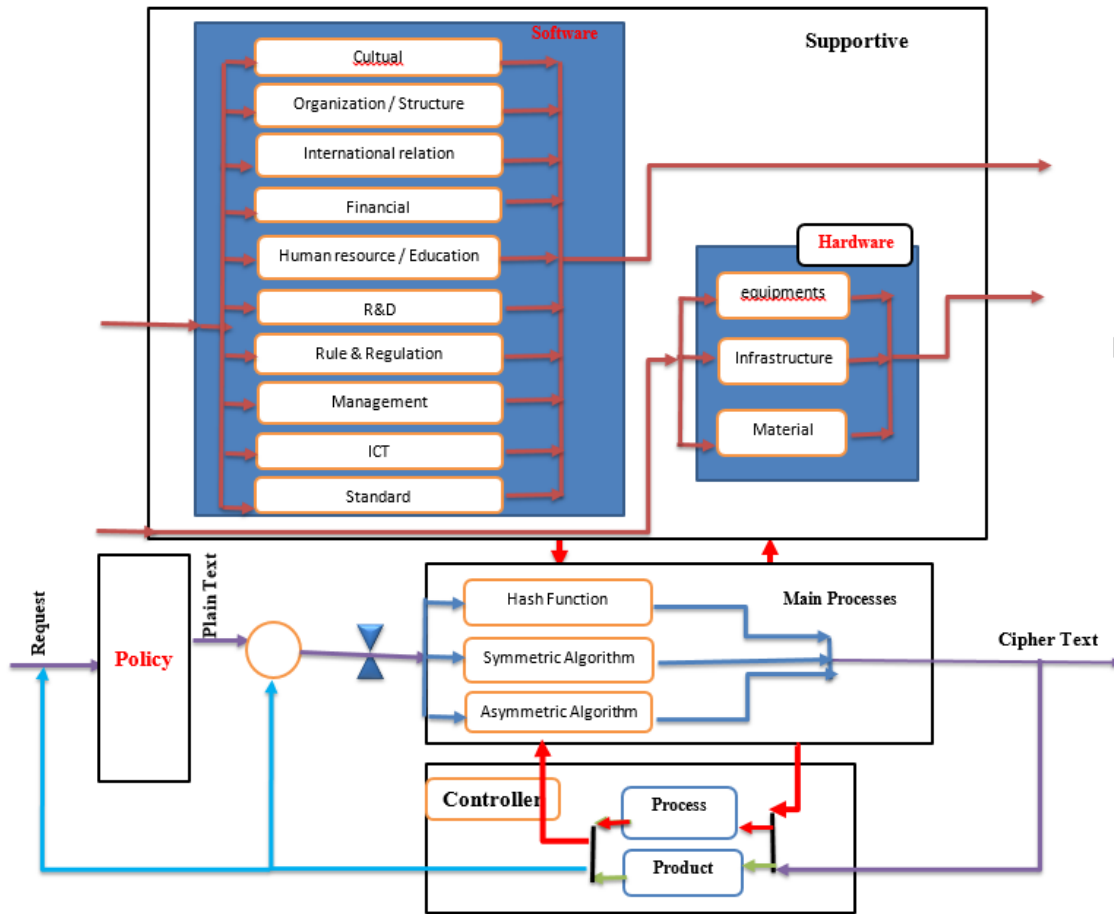


Figure 4: A detailed cybernetic cryptography model (Level 3)

$d_{(1)} = \{\}, d_{(2)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, d_{(3)} = \{c_4\},$   
 $d_{(4)} = \{c_1, c_3\}, d_{(5)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\},$   
 $d_{(6)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, d_{(7)} = \{c_1, c_4\},$   
 $d_{(8)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, d_{(9)} = \{c_1, c_3, c_4\},$   
 $d_{(10)} = \{c_1, c_3, c_4\}, d_{(11)} = \{c_1, c_3, c_4\},$   
 $d_{(12)} = \{c_1, c_4\}, d_{(13)} = \{c_1\}.$  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  $d_i$  in the chain  $d_1$  to  $d_n$  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:

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

The maximum connection dimension is 3.

#### 4.3. Computation of structure vectors

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

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

Support Process		Core/Main Process Cryptography algorithms				Level 1	
		[A]	[B]	[C]	[D]	Level 2 Level 3	
soft	Cultural	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):

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

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

where in: is the simplex of  $\sigma$ .  $q^*$  is the largest common dimension of the simplex  $\sigma$  with other simplexes (the relation value) in an equivalence class.  $q_i$  is any q-level of  $\sigma$  that exists.  $\sigma_i$  The number of elements in the  $\sigma_i$  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  $\sigma$  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  $\sigma_{\%70}$

$\sigma$	$q_i$	$\sum q_i / \sigma_i$	$q_{max}$	$ecc'(\sigma)$
$d_2, d_5, d_6, d_8$	{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):

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

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



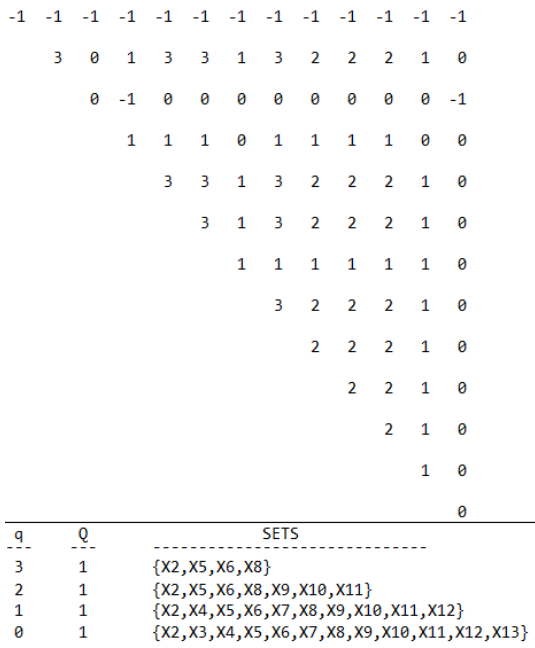


Figure 5: Results of implementing the Q-Analysis model using a C++ code, for  $\alpha_{%70} = 7$

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

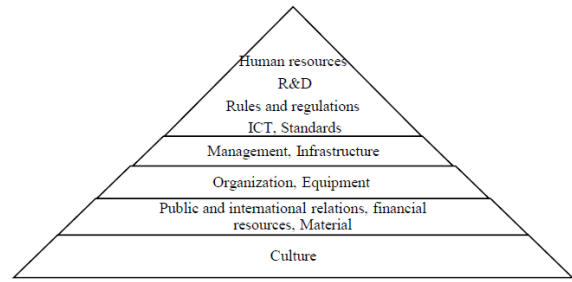


Figure 6: The pyramid of ranking of support components using Q-Analysis

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, 2017, 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. Karaođlan 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 (ICCCKE)*, 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. Barmaliou, "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. Christopher, 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), Geneva, 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 Telecommunication 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,” SABSAs, 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 Education*, 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 Management*, 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 <sup>\*,a</sup> , Andrés Albornoz<sup>b</sup> , Erwin López<sup>b</sup> , Jorge Romero<sup>c</sup> 

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones en Mecánica (CIMEC), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>c</sup>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.

### 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

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

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]

$\theta$ : 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

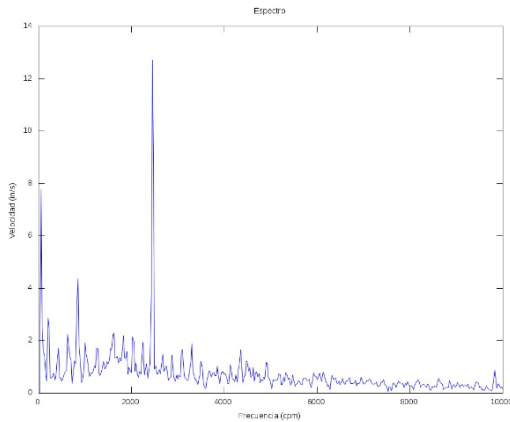


Figura 1: Espectro de vibración vista en amplitud velocidad. cpm: Ciclos Por Minuto

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
rigida	flexible	rigida	flexible	rigida	flexible	rigida	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.

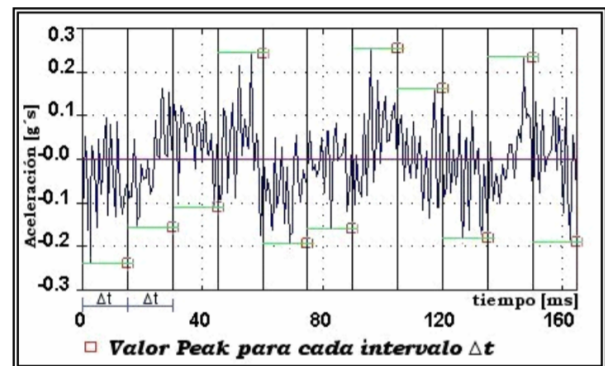


Figura 3: Valores pico en un espectro. Unidad g's: cociente entre la aceleración y la aceleración de gravedad [15]

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 1 - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
C. Desalineación de Rodamiento Inclinado Sobre el Eje			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 de lado a lado cuando se mide en dirección Axial de la misma carcasa del rodamiento. Intentos de alinear el eje o balancear el rotor no aliviana 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.

Etapas 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].

Etapas 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.

Etapas 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.

Etapas 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.

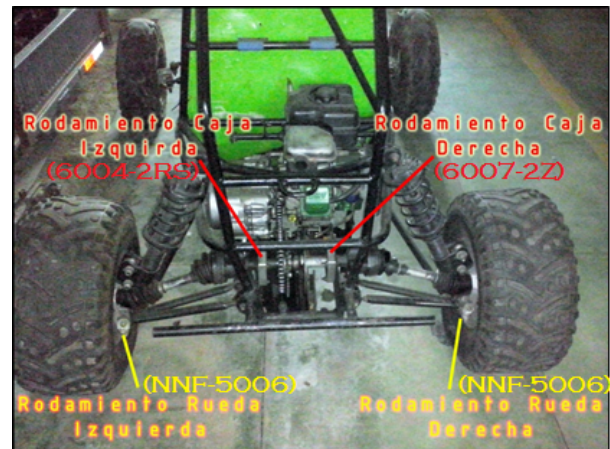


Figura 5: Ubicación de los rodamientos en el sistema de transmisión

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 esto, 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.

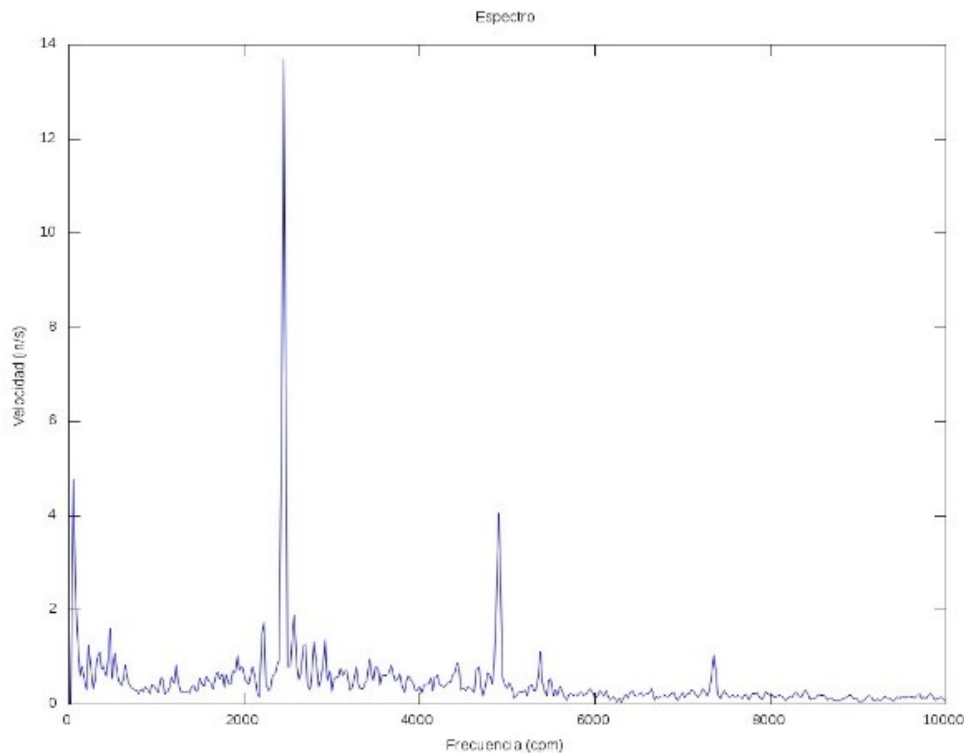


Figura 6: Espectro correspondiente a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

siendo X la frecuencia de falla calculada para cada rodamiento y cada tipo de deterioro – BPF1, 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 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 BPF1 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.

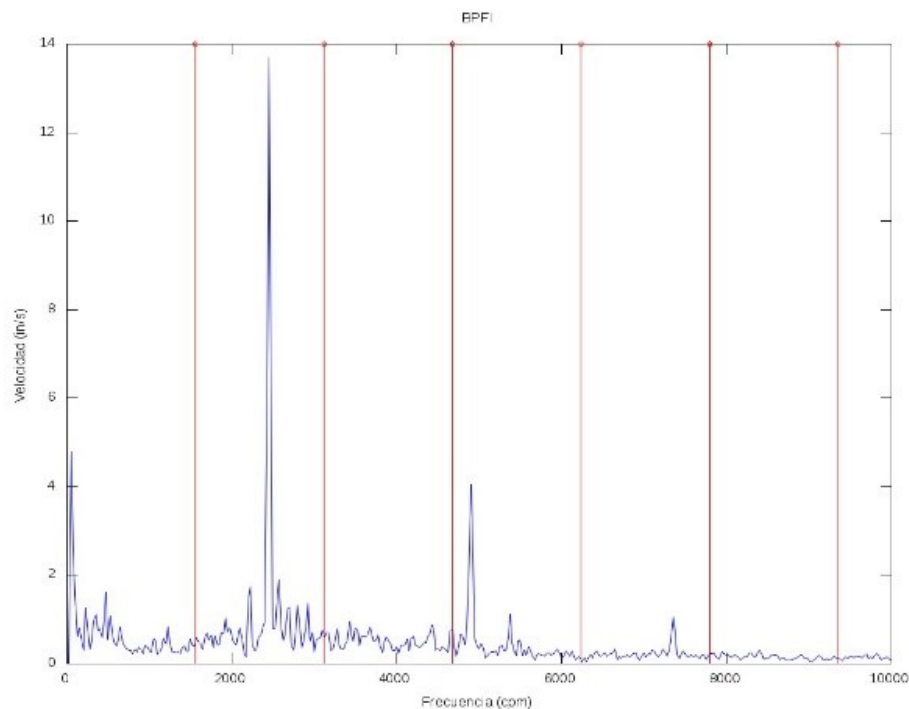


Figura 7: Armónicos de las frecuencias de falla de pista interna sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

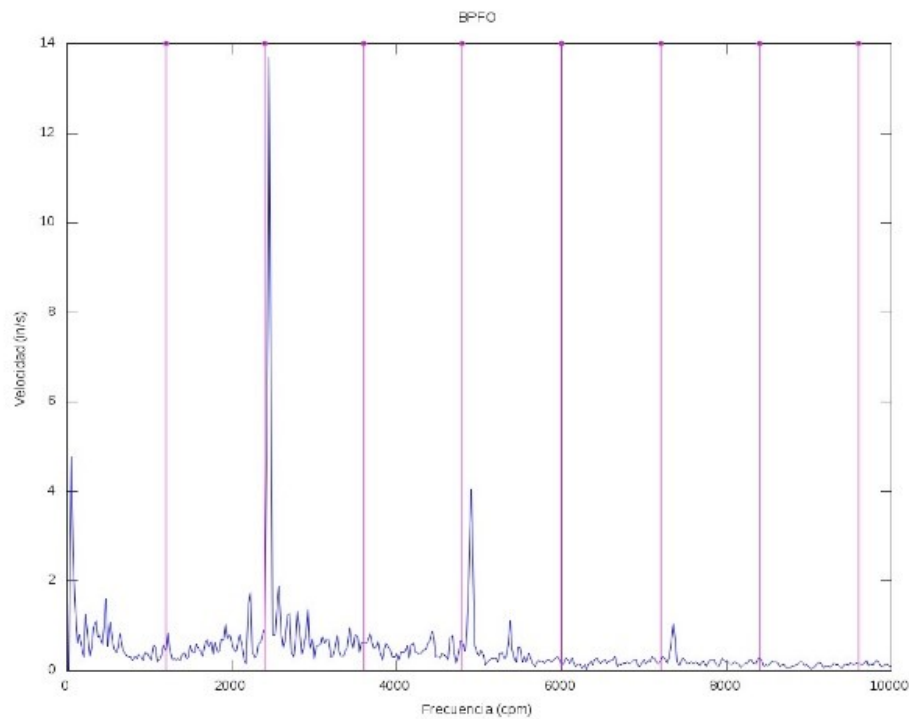


Figura 8: Armónicos de las frecuencias de falla de pista externa sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

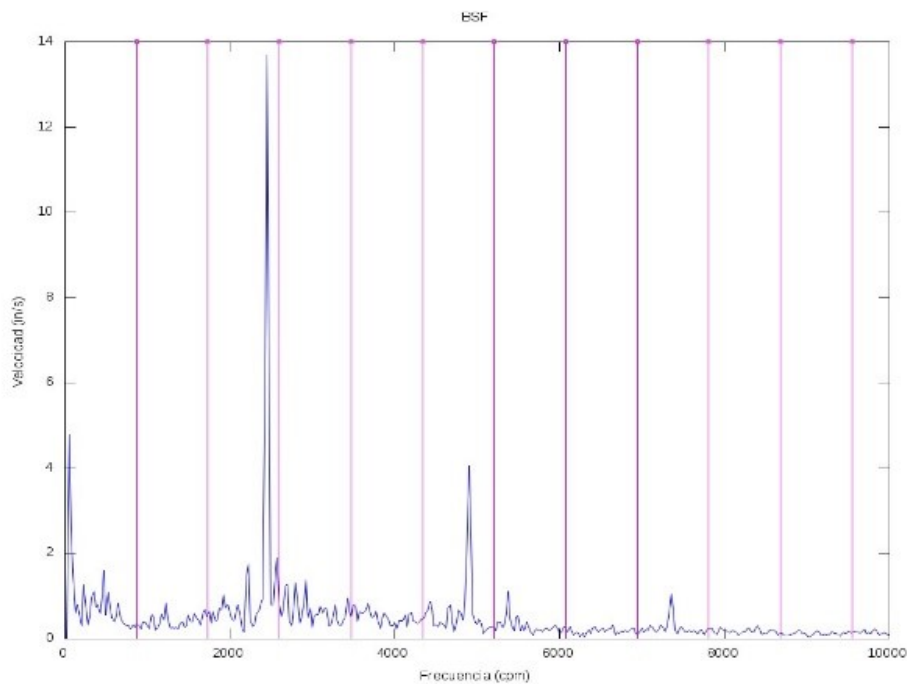


Figura 9: Armónicos de las frecuencias de falla de un rodillo sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

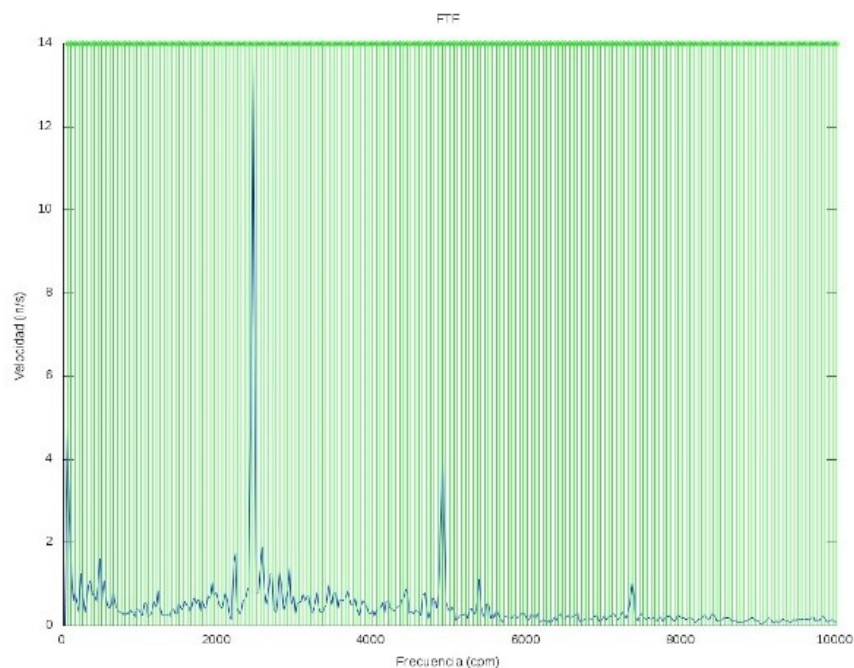


Figura 10: Armónicos de las frecuencias de falla de la jaula sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min.

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 BPFIs 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 Martín, 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 Epoch,” 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 Regressive 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 Óptima 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)<sub>12</sub>, 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

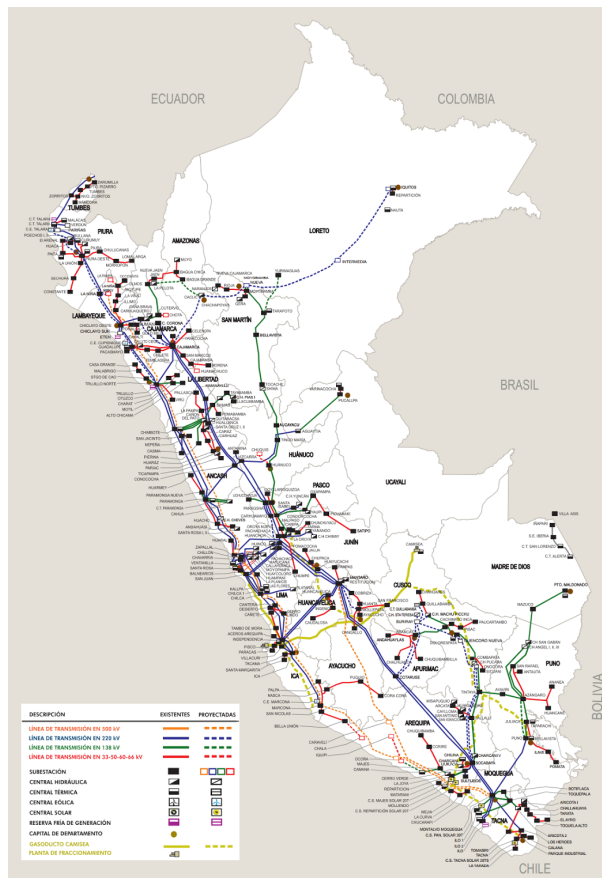


Figura 1: Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) al 2016 [6]

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  $y_1, y_2, \dots, y_t$  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  $y_1, \dots, y_t$  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 si se cumplen las siguientes ecuaciones (1), (2) y (3) según [13]:

$$E [X_t] = \mu \quad (\text{constante } \forall t) \quad (1)$$

$$\text{VAR} [X_t] = \sigma^2 \quad (\text{constante } \forall t) \quad (2)$$

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

### 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. Diagnósis 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 diagnóstico 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:

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

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

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].

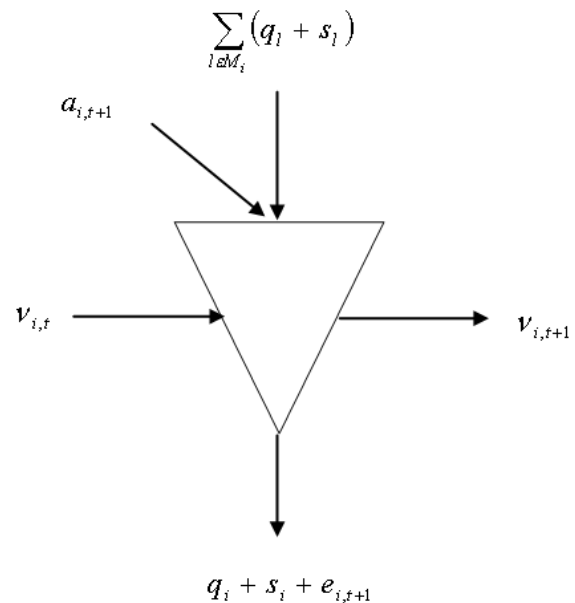


Figura 2: Balance hídrico en un embalse de regulación estacional en PERSEO

$$v_{i,\tau+1} = v_{i,\tau} + a_{i,\tau+1} + \sum_{l \in M_i} (q_l + s_l) - q_i - s_i - e_{i,\tau+1} \tag{7}$$

$$e_{i,\tau+1} = \varepsilon v_{i,\tau} \tag{8}$$

Donde:

$v_{i,\tau}$ : volumen de agua almacenado en el embalse de la  $i$ -ésima planta al inicio de la etapa  $\tau$  (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  $\tau$ .

$s_{i,\tau}$ : volumen de agua vertido por la  $i$ -ésima planta hidroeléctrica durante la etapa  $\tau$ .

$M_i$ : 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  $\tau$ .

$\varepsilon$ : 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]:

$$\alpha_\tau(v_\tau, A_{\tau-1}) = E_{A_\tau/A_{\tau+1}} \left\{ \text{Min} \left[ \sum_{j=1}^{N_j} c_{O_j} g t_{j,t} + \alpha_{\tau+1}(v_{\tau+1}, A_\tau) \right] \right\} \quad (9)$$

$$\sum_{j \in k} g t_{j,t} + \sum_{i \in k} \rho_i q_{i,j} + \sum_{m \in \Omega(k)} ((1 - 0,5\sigma_{mk,t}) f_{mk,t} - (1 + 0,5\sigma_{mk,t}) f_{mk,t}) = d_{k,t} \quad \pi_{d_{k,\tau,S}}^{cp}$$

$$g t_{j,t} \leq \bar{g} t_{j,t} \quad \pi_{g t_{j,\tau,S}}^{cp}$$

$$f_{mk,t} \leq \bar{f}_{mk} \quad \pi_{f_{mk,\tau,S}}^{cp}$$

$$v_{i,t+1} - v_{i,t} - \sum_{l \in M_i} (q_l - s_l) + q_i + s_i = a_{i,t} - e_{i,t} \quad \pi_{a_{i,\tau,S}}^{cp}$$

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

$$v_{i,t} \leq \bar{v}_{i,t} \quad \pi_{v_{i,\tau,S}}^{cp}$$

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

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

$$q_{i,t} \leq \bar{q}_{i,t} \quad \pi_{q_{i,\tau,S}}^{cp}$$

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

$$r_{i,t} \leq \bar{r}_{i,t} \quad \pi_{r_{i,\tau,S}}^{cp}$$

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

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

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

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.

$\Omega_k$ : 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  $t$ .

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

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

$\bar{v}_i$ : volumen máximo en los reservorios diarios

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

$\bar{q}_{i,t}$ : 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

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

$\pi_{d_{k,t,s}}^{CP}$ : 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  $s$ .

$\pi_{g_{j,t,s}}^{CP}$ : 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  $s$ .

$\pi_{f_{mk,t,s}}^{CP}$ : 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  $s$ .

$\pi_{a_{i,t,s}}^{CP}$ : 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  $s$ .

$\pi_{v_{i,t,s}}^{CP}$ : 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  $s$ .

$\pi_{q_{i,t,s}}^{CP}$ : 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  $s$ .

$\pi_{r_{i,t,s}}^{CP}$ : 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

- 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].
- 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

- 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

- 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)

Año	Hidro (MW)		Termico (MW)	Combustible
	Proyecto Grande	Proyecto RER		
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:

- En la Tabla 4 se presentan los coeficientes AICC (coeficiente de Akaike) 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).
- 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.

- 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.
- En la Figura 4 se observa que el caudal promedio multianual con una persistencia del 50 % es de  $24,73 \text{ m}^3/\text{s}$ , 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.
- 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)

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

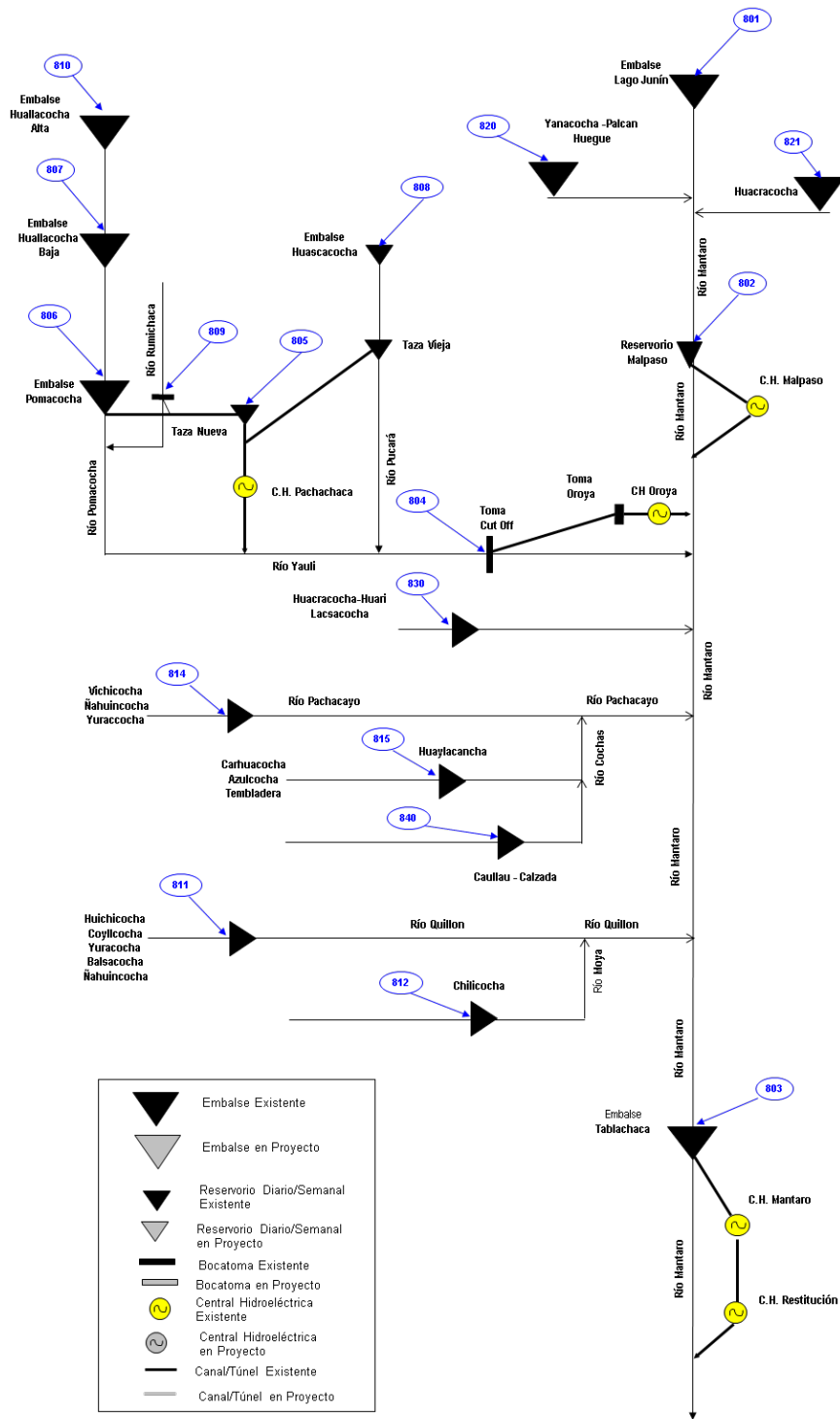


Figura 3: Diagrama topológico de la cuenca del río Mantaro [6]

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

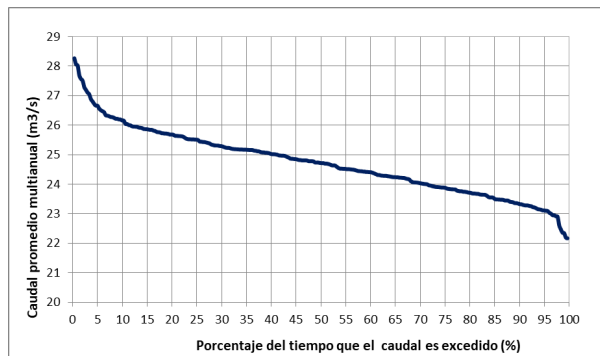


Figura 4: Curva de duración de caudales promedio multianuales de 300 series sintéticas generadas de ingreso al Lago Junin

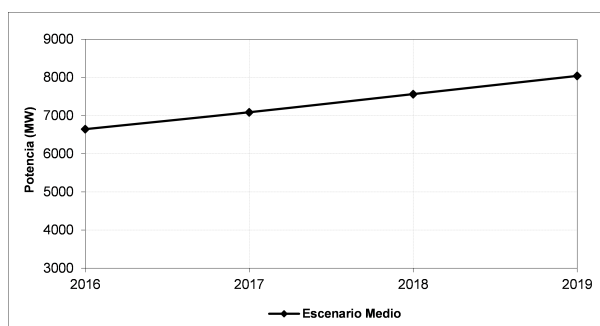


Figura 5: Proyección de la demanda de potencia del SEIN (2016-2019)

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.

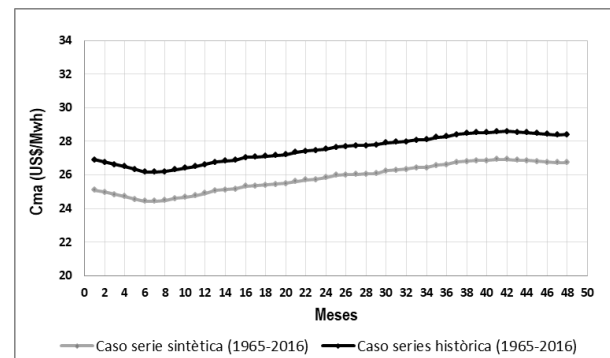


Figura 6: Costos marginales actualizados en la Barra Mantaro (2016-2019)

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.

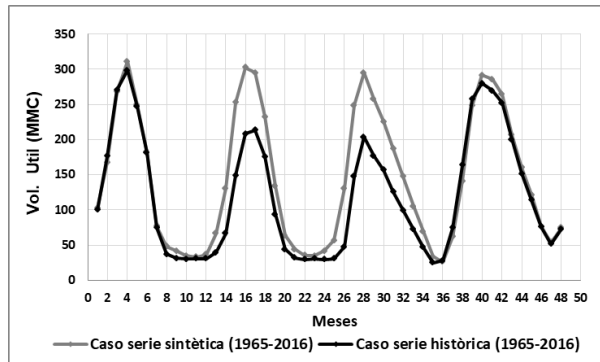


Figura 7: Volumen útil almacenado en Lago Junín (2016-2019)

- 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

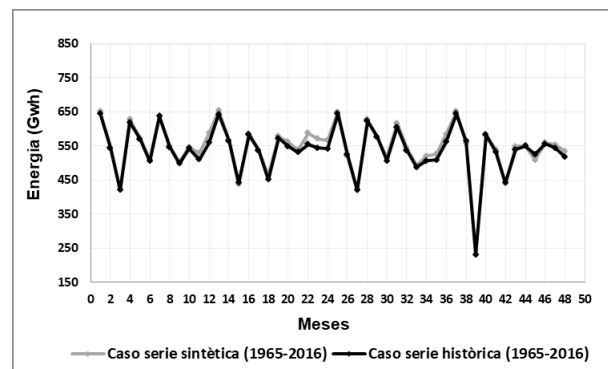


Figura 8: Energía mensual total generada en C.H. Mantaro y C.H. Restitución (2016-2019)

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.

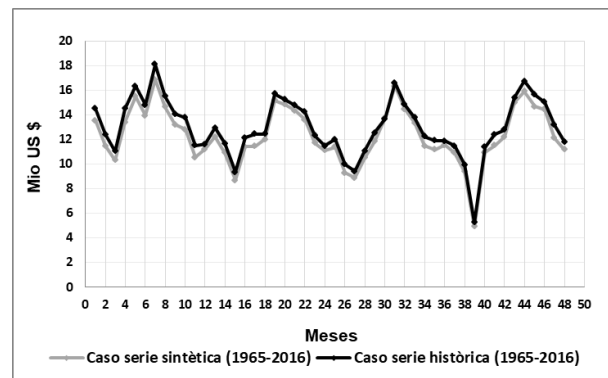


Figura 9: Ingreso neto por venta de energía C.H. Mantaro y C.H. Restitución (2016-2019)

## 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 río 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 Tarifaria 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 CommonKADS 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 CommonKADS 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].

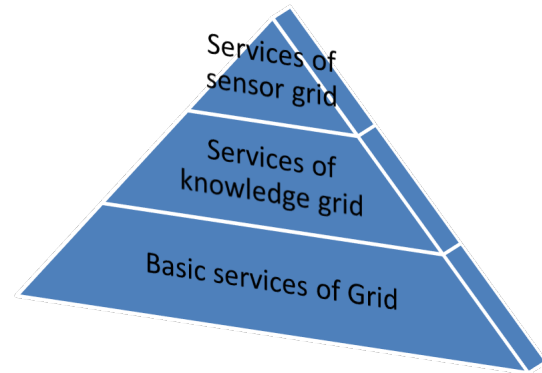


Figure 1: The relationship between services of sensor grid with other services

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.

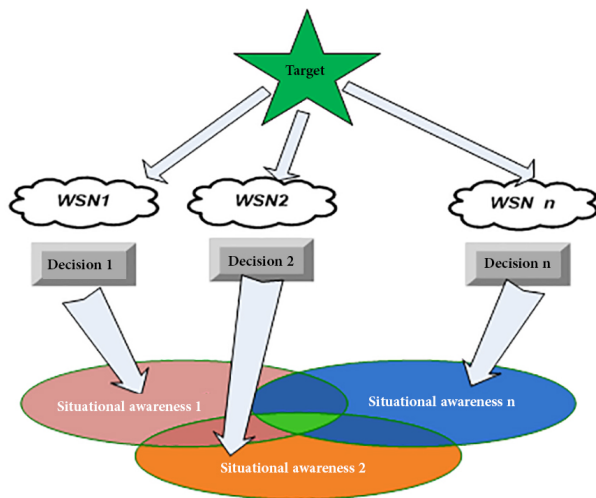


Figure 2: Shared Situation Awareness

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].

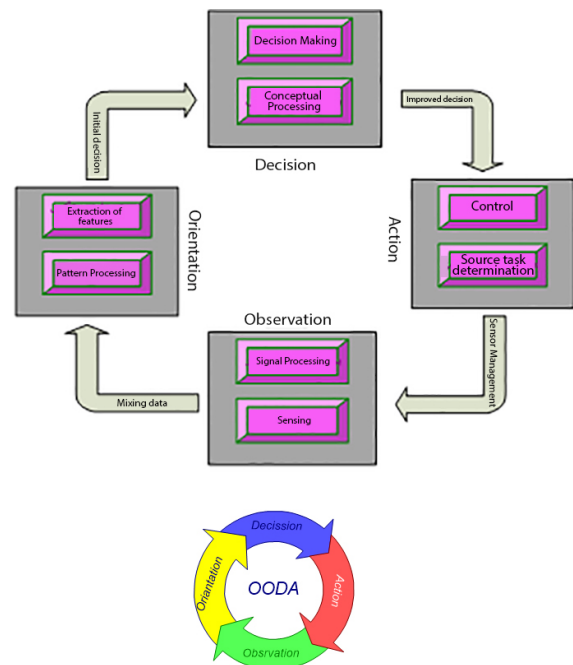


Figure 3: Boyd’s Circle (OODA)

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

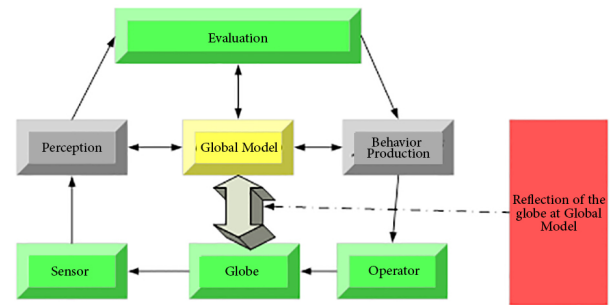


Figure 4: Elementary Loop of Functioning (ELF)

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.

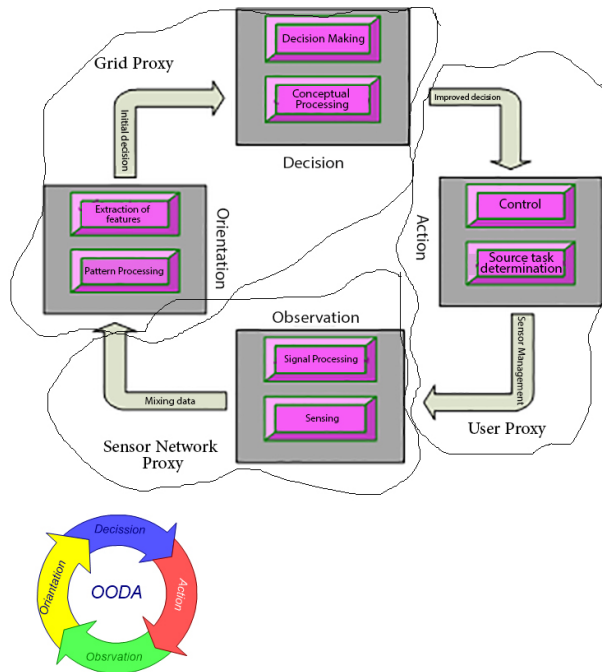


Figure 5: Overall functioning of the OODA-based large-scale sensor grid

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.

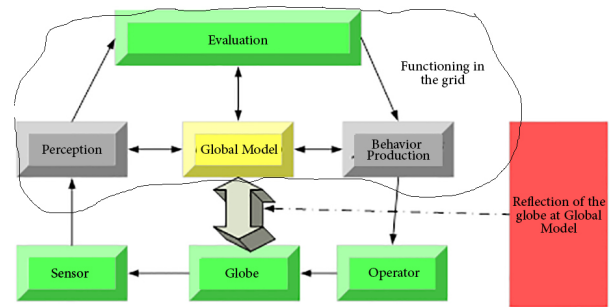


Figure 6: Functioning of grid layer based on ELF reference model

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.

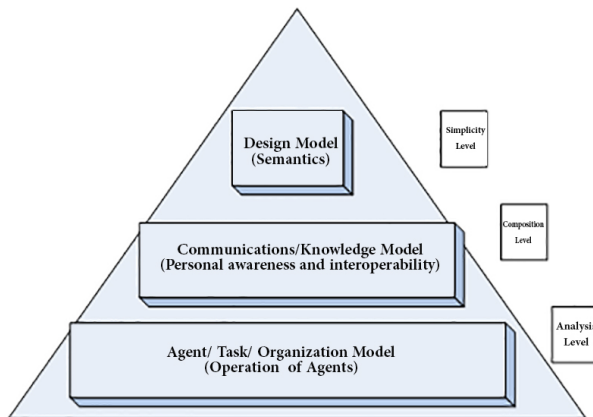


Figure 7: Conceptual framework of CoomonKADS and simulation approach of shared awareness of sensor grid

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.

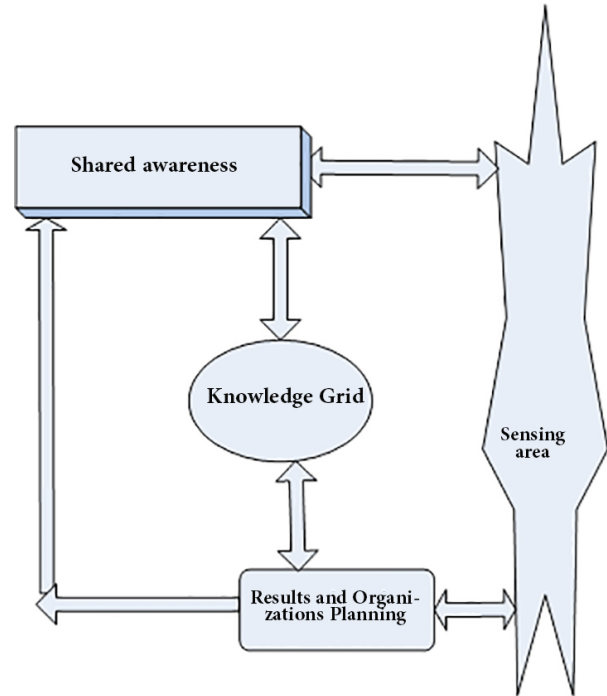


Figure 8: The way of behavior production in sensor grid based on shared awareness

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

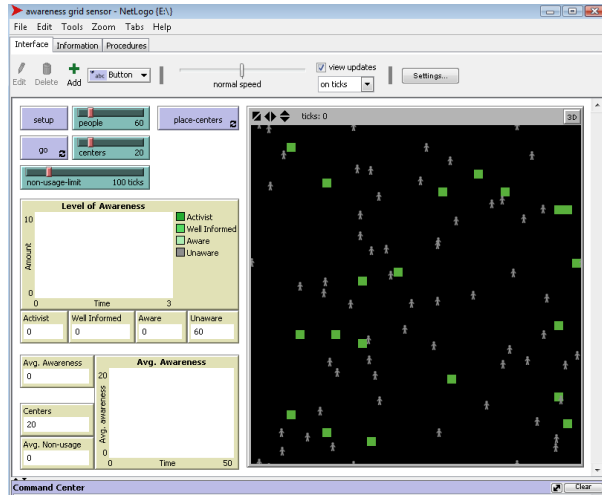


Figure 9: An overview of simulation of sensor-grid’s shared awareness in Netlogo Platform

4. Above 15 points: activist

Accordingly, an overview of user’s shared awareness is depicted in Figure 10.

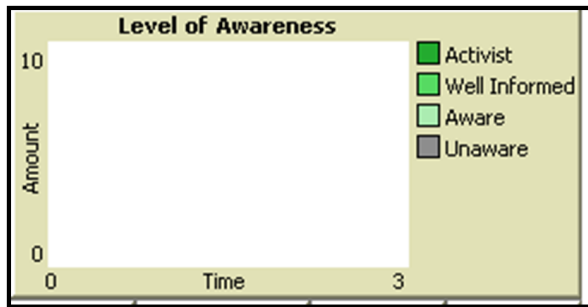


Figure 10: An overview of user’s shared awareness

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

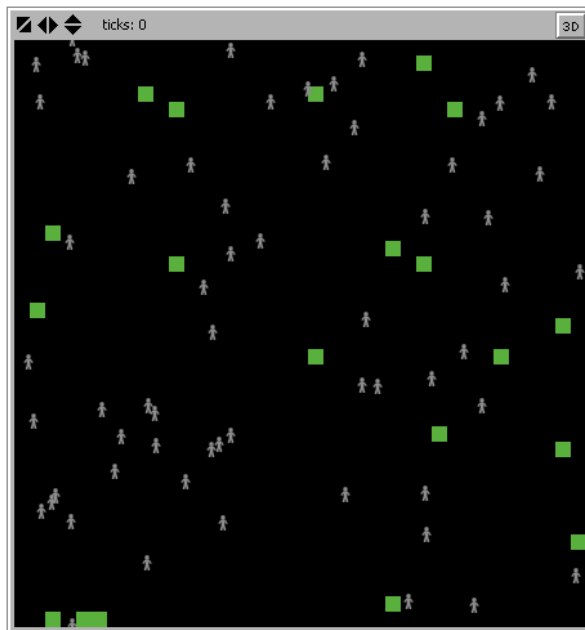


Figure 11: An overview of simulated users and resources

## 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. Griboudo, 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 Managerial 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.

# L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X in academic activities in the Mathematic Department of the Engineering Faculty

Yanitza Román <sup>\*,a,b</sup> , Joan Ordoñez <sup>a,b</sup> , Jesús J. Jiménez G. <sup>a,b</sup> 

<sup>a</sup>Departamento de Matemática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>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.

## L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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].

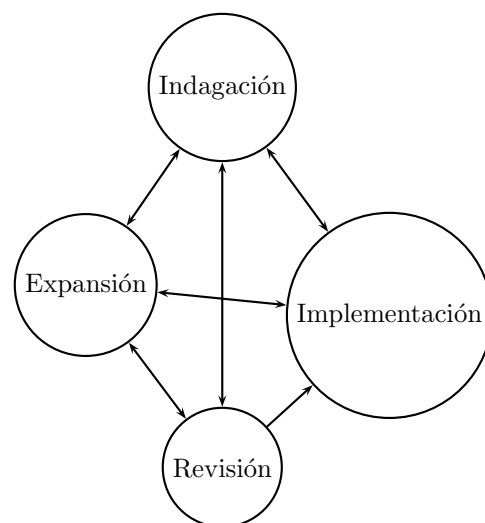


Figura 1: Fases de la investigación.

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<sup>er</sup> Congreso Internacional y 2<sup>do</sup> 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<sup>era</sup> 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<sup>ta</sup> 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<sup>2</sup>), 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<sup>2</sup>, of which 100.000 m<sup>2</sup> accounts for retail, 20.000 m<sup>2</sup> for hotels and offices, 21.000 m<sup>2</sup> for entertainment, 8.000 m<sup>2</sup> for museums, and 1.000 m<sup>2</sup> 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	New York	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

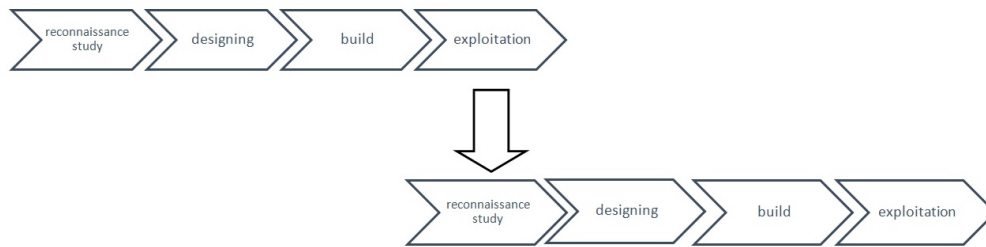


Figure 1: The life cycle of a construction object.

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. Ivani, "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 ICCCBCE)*, 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 of the 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.

durante la última década han demostrado que el ciclismo está creciendo en popularidad como medio de transporte y recreación.

### 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

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 Transporte 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

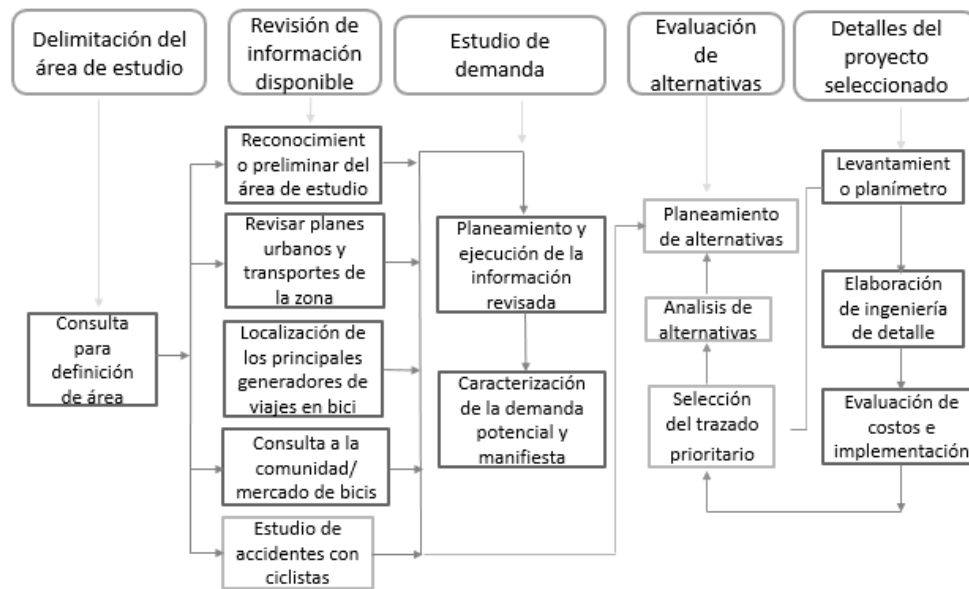


Figura 1: Diagrama Metodológico para la Planificación de Transporte No Motorizado, (TNM)

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 planeó un sistema compuesto de una red principal (Troncal) y una secundaria (Alimentadora), estas permitirán a los usuarios movilizarse y conectarse a modos de transporte alternativo 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.

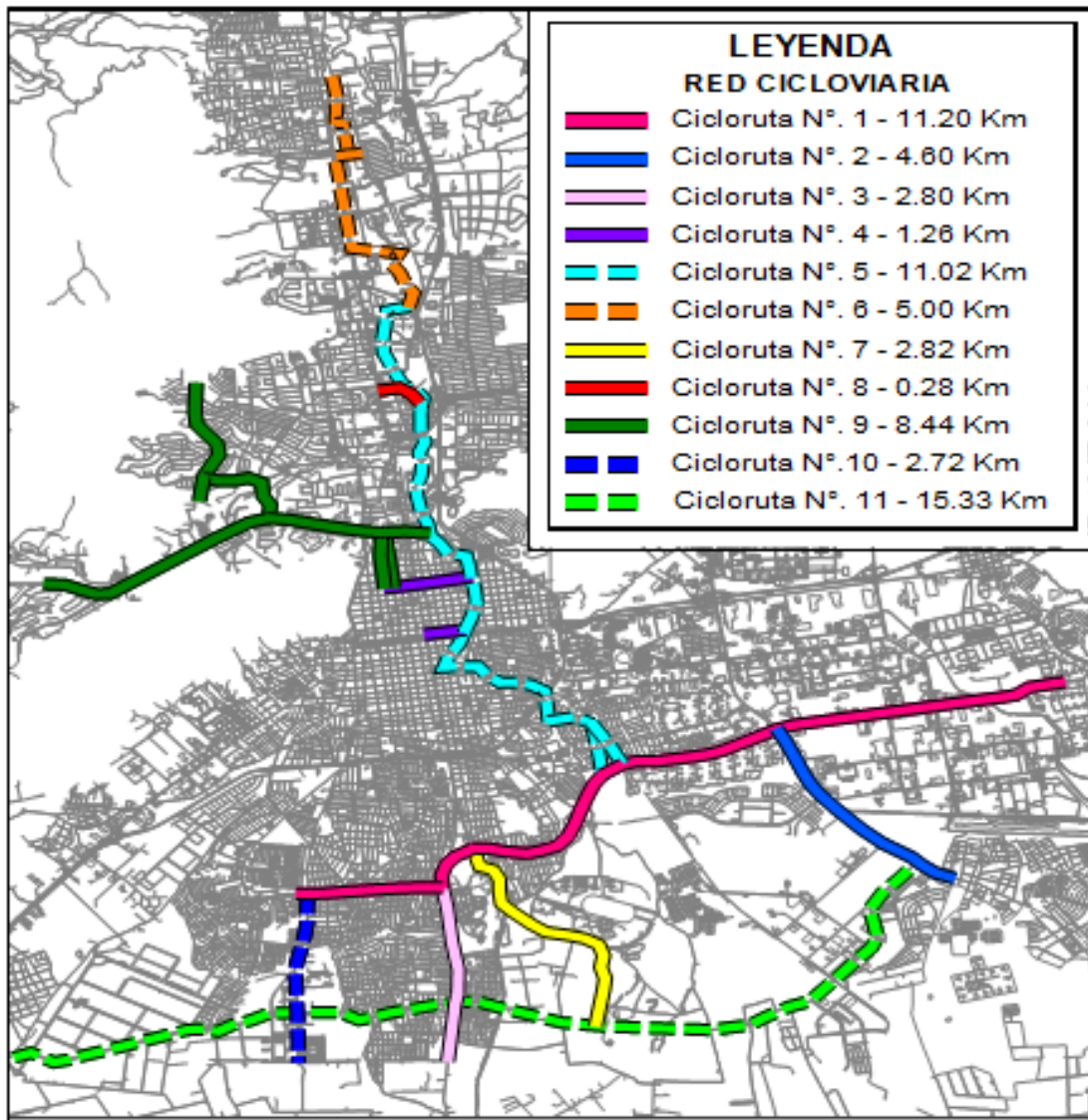


Figura 2: Red Troncal de 11 ciclovías propuestas en el AMV

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.

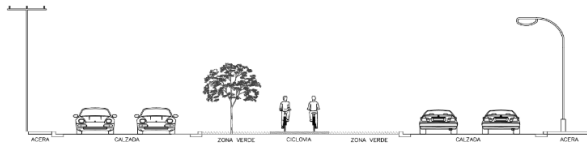


Figura 4: Eje 7. Av. Principal Hipódromo enlace Plaza de Toros

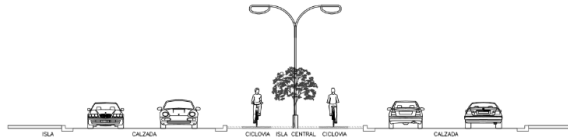


Figura 5: Eje 1. Sesquicentenario-Av. Libertador

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.

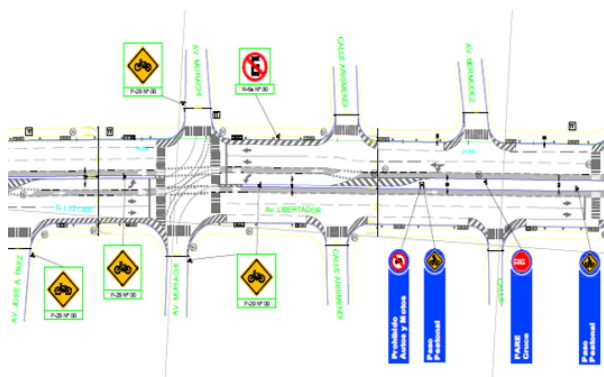


Figura 6: Eje 4. Tramo de Av. Libertador enlace Plaza de Toros, esquema funcional

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.

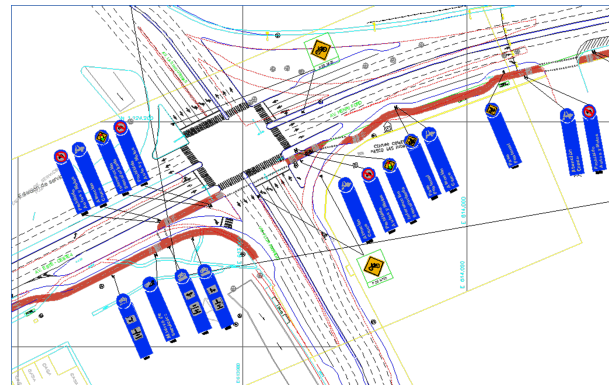


Figura 7: Intersección Henry Ford con Humberto Celli, Zona Industrial Norte

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 resguardo 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

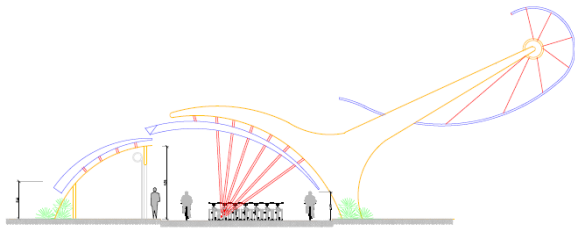


Figura 8: Biciestación Plaza de Toros-Metro Valencia, Arq. J.M Fernández

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 Transporte 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 *Boletín FAL, 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 <sup>a</sup> , Kelvyn Matute <sup>a</sup> , Luís Sidorovas <sup>\*,b</sup> 

<sup>a</sup>Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>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 alambre 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 alambre 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  $30 \mu m$  hasta  $200 \mu m$  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 temple 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 dividido 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 alambón formando la bobina de material, que se presenta en forma de rollo de alambón con un diámetro de 9,5 mm, en bobinas de 2 toneladas y una densidad a 20 °C de 2,71 g/cm<sup>3</sup> (Figura 1).

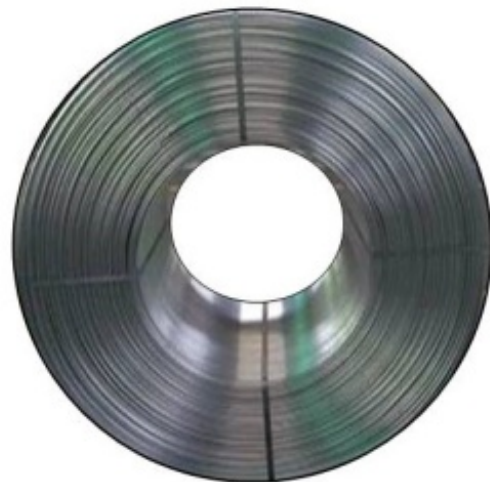


Figura 1: Presentación de alambón de aluminio AA-8176.

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 alambón 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 Cortailod, 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 alambroón 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

Tabla 3: Propiedades Eléctricas [11].

Conductividad Eléctrica a 20 °C	35 mΩ <sup>-1</sup> mm <sup>-2</sup>
Resistividad eléctrica a 20 °C	0,0286 μΩ mm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup>
Coefficiente de temperatura de la resistencia eléctrica entre 1 y 100 °C	0,0040 K <sup>-1</sup>
Densidad de corriente límite	102 A/mm <sup>2</sup>
Densidad de corriente de fusión	1910 A/mm <sup>2</sup>
Densidad del Al	2,7 g/cm <sup>3</sup>

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

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 5: Criterios de calidad del producto.

	Diámetro (mm)	Conductividad eléctrica. (%IACS)	Esfuerzo último (kgf/mm <sup>2</sup> )
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 0,083	Fe 0,41	Cu 0,001	Mn 0,005	Mg 0,006
Ti+V 0,002	Ca <0,0001	Ga 0,007	Li -	Na <0,0001
Cr <0,0001	Ni 0,003	Zn 0,006	Ti 0,002	B 0,002
Pb 0,002	Sn 0,002	Sr -	V 0,0006	Al 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 ( $\Omega$ /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 ( $\text{mm}^2$ )	70,24	70,84
$\sigma_U$ ( $\text{Kgf}/\text{mm}^2$ )	11,77	11,97
$\delta$ (%)	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 Última (kgf)		Alargamiento $\delta$ (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 ( $\Omega$ /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 ( $\sigma_U$ ), la elongación ( $\delta$ ) 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 <sup>2</sup> )	70,02	69,92	69,85	70,96	71,55	70,61	71,55	71,09
$\sigma_U$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	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
$\sigma_U$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	3,70	2,69	3,73	3,71	14,0	13,1	13,1	15,0
$\delta$ (%)	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

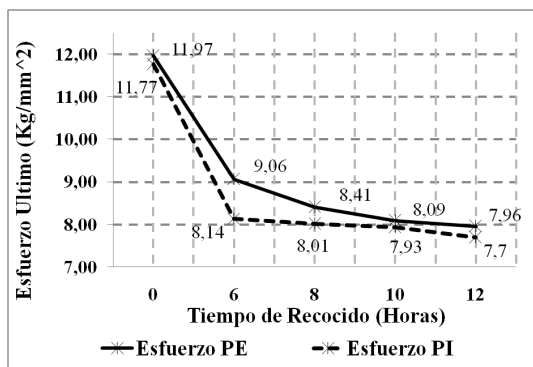


Figura 7: Esfuerzo último vs tiempo de recocido.

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<sup>2</sup>).

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<sup>2</sup> aproximadamente de 0,80 de

acuerdo con la Figura 8.

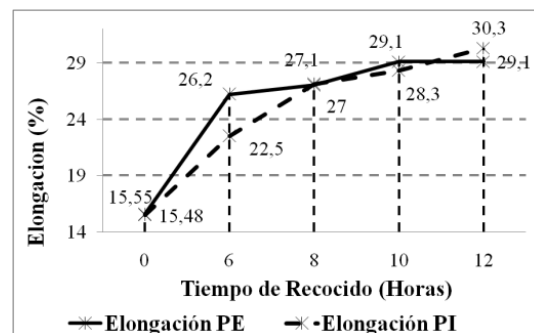


Figura 8: Elongación vs tiempo de recocido.

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.

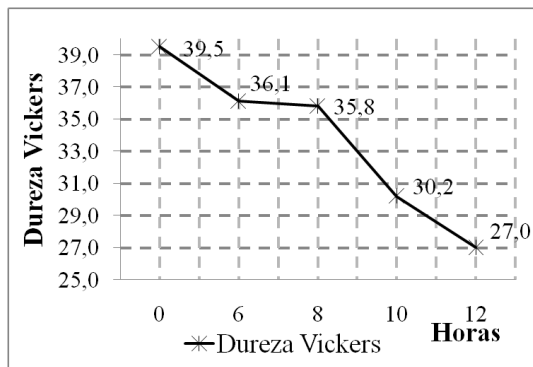


Figura 9: Dureza Vickers vs tiempo de recocido.

Se destaca la importancia del tratamiento térmico de recocido para alcanzar las especificaciones del producto requeridas tanto para consumo interno o de exportación.

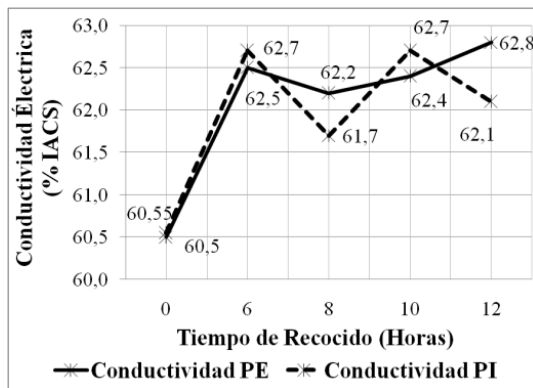


Figura 10: Conductividad eléctrica vs tiempo de recocido.

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  $30\ \mu\text{m}$  hasta alcanzar un tamaño promedio de  $200\ \mu\text{m}$  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 microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

*Ensayo de microscopía óptica.* En la microscopía 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 microscopía 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  $30\ \mu\text{m}$  para 6 Horas hasta  $200\ \mu\text{m}$  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 Microscopía 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

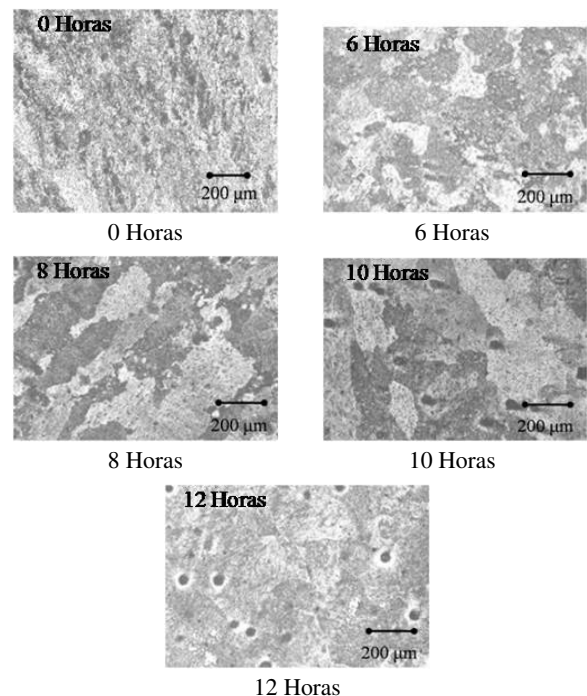


Figura 11: Fotomicrografía del material con revenido de 0, 6, 8, 10 y 12 horas.

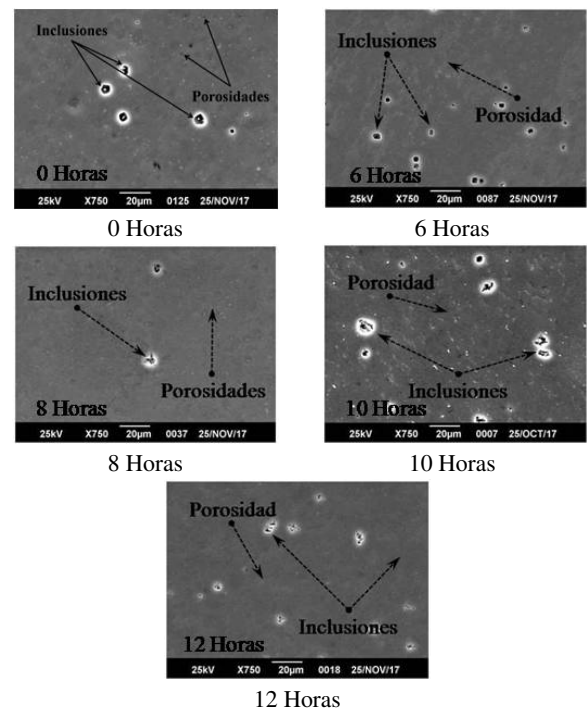


Figura 12: Fotomicrografía con MEB para 0, 6, 8, 10 y 12 Horas.

aluminio y carbonatos, así como también muchas porosidades en una matriz rica de aluminio.

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  $Al_6(Fe, Cu)$  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 oxígeno ( $O_2$ ) 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  $15\mu m$ .

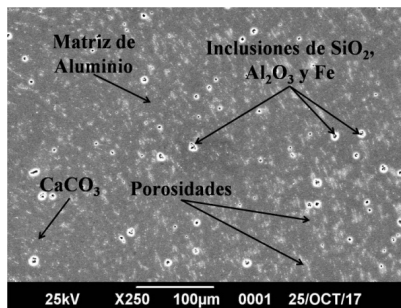


Figura 13: Algunas imperfecciones del Material.

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.

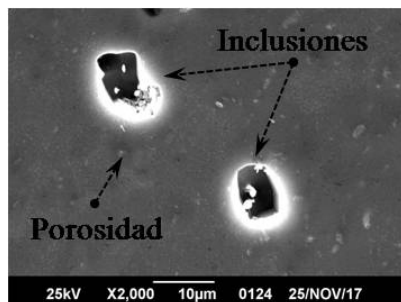


Figura 14: Material en condición original.

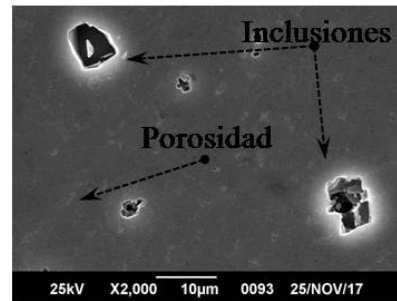


Figura 15: Con recocido de 6 horas.

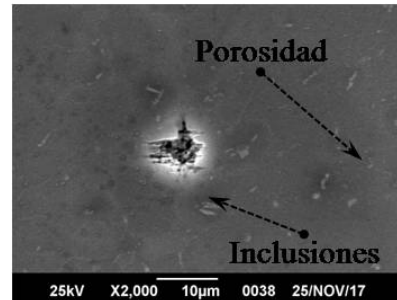


Figura 16: Con recocido de 8 horas.

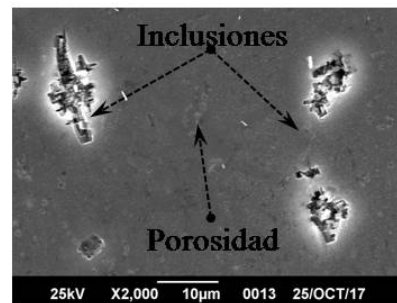


Figura 17: Con recocido de 10 horas.

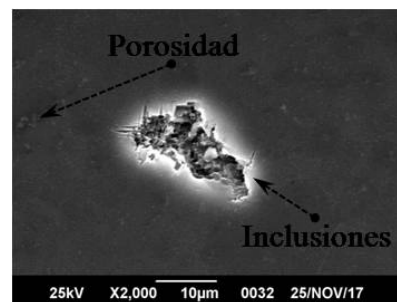
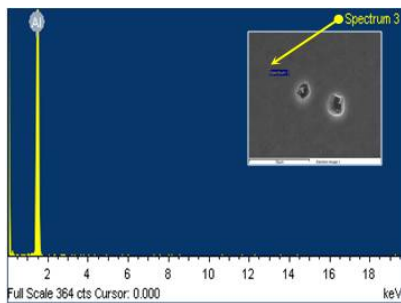


Figura 18: Con recocido de 12 horas.

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

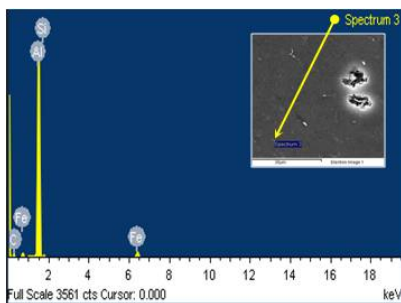
cualquier otro elemento de la matriz de aluminio. Para ello, en las Figuras 19, 20, 21 y 22 se presentan los puntos seleccionados para el análisis de las muestras de la aleación AA-8176.

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

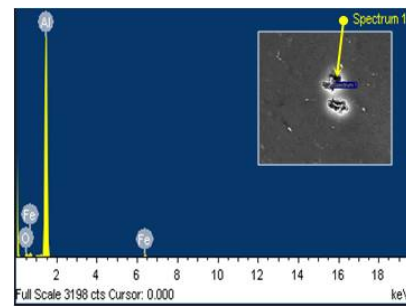
Figura 19: Ensayo de EDS 1.



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

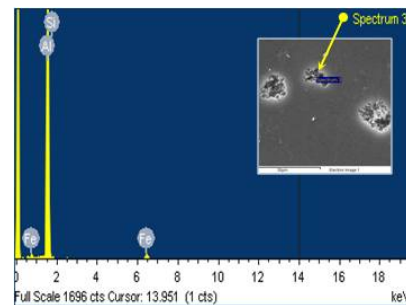
Figura 20: Ensayo de EDS 2.

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, así 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 Hispanoamericana 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 alambros 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), reafirmando 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 polisacárido, 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 versatile 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  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 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  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 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, farmacocósmica, 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 epiclohidrina, toluendi-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 “ $\chi\iota\tau\acute{o}\nu$ ” 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: juanpereira73@gmail.com (J. Pereira)

de Fränkel & 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.

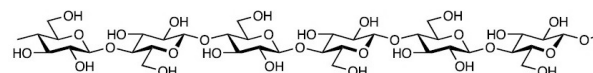
Una segunda era en la investigación, se centró en su estructura con Berlese en 1909 [1], y la tercera era, con Morgulis *et al* (1916) [3], quienes debatieron sobre la complejidad de la molécula y su contenido de nitrógeno; para luego proponer una estructura química que finalmente fue confirmada y aceptada 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  $\alpha$ -Quitina. En 1950, Lotmar y Picken, compararon este estudio con el isómero  $\beta$ -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].

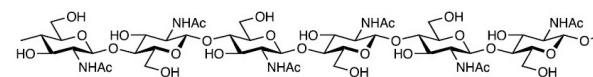
Siendo la Celulosa el polímero más abundante en la naturaleza, resulta químicamente interesante la similitud estructural con la Quitina, cuya diferencia radica básicamente en los grupos acetamidos presentes en el carbono C2 y que reemplazan grupos -OH en la molécula de Celulosa [7, 8], como puede observarse 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* ( $\alpha$ ): presente en la mayor cantidad de artrópodos, siendo la más abundante, estable, altamente cristalina (80 %) y presenta los más fuertes enlaces



(a) Celulosa: polímero de  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) D-Glucopiranososa



(b) Quitina: polímero de  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) 2 acetamido-2 deoxi-D Glucopiranososa

Figura 1: Estructuras Químicas [7]

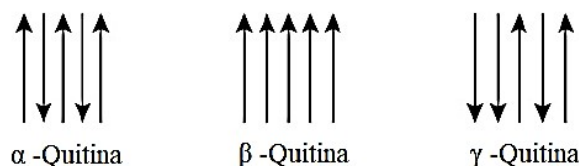


Figura 2: Estructuras Cristalinas de la Quitina [1]

intermoleculares. Se encuentra en superficies duras o rígidas [4, 7, 9, 10].

- b) *Ordenamiento paralelo* ( $\beta$ ): 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  $\alpha$  por ser metaestable y es capaz de biosintetizarse en condiciones específicas [5, 7, 11, 12].
- c) *Ordenamiento asimétrico* ( $\gamma$ ): es el menos común, y además se ha asociado como una distorsión de las organizaciones  $\alpha$  y  $\beta$  [13]; aunque también se ha reportado su presencia en capullos de insectos (escarabajos) y en paredes celulares de hongos [1, 7, 14].

Las dos estructuras alomórficas  $\beta$  y  $\gamma$ , se consideran flexibles y más hidratadas que la  $\alpha$ -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 ( $-\text{NH}_2$ ). Su estructura, ilustrada en

la Figura 3, cuyo nombre químico es poli [ $\beta$ -(1-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucopiranos], 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].

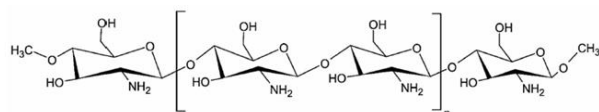


Figura 3: Estructura química de la molécula de Quitosano [16]

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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  [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 ( $-\text{NH}_3^+$ ), 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  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 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 nanopartículas poliméricas, nanocompuestos, microsferas, 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  $\alpha$ -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  $\beta$  y  $\gamma$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  [7, 41]

Biomasa	% Quitina	Tipo de Quitina	% CaCO <sub>3</sub>	% Proteínas
Cutícula de cangrejo	15-30	$\alpha$	40-50	20-40
Cutícula de camarón	30-40	$\alpha$	20-30	20-40
Concha de langosta	16-23	$\alpha$	20-60	20-40
Concha de almeja / ostra	03-06	$\alpha$	85-90	
Cutícula de insecto (rastreros, mariposas, larvas)	18-64	$\alpha$	20-50	20-50
Pluma de calamar	31-49	$\beta$	<5	50-60
Gusano tubular de océano	25-29	$\beta$	<5	>30
Pared celular de levaduras, micelias, mohos)	8-43	$\gamma$	<0,2	50-60 *

\*:(como complejo con  $\beta$ -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 influyen directamente en los campos de aplicación final. Varios procesos

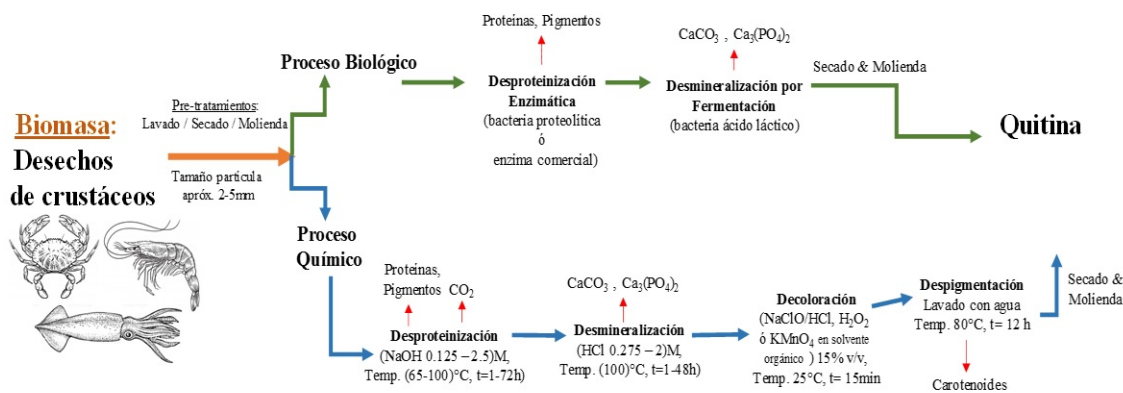


Figura 4: Procesos de extracción de Quitina [23]

son descritos en la literatura para extraer Quitina, y todos se basan en la desproteínezación 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:

- Desproteínezación 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  $\text{NaOH}$  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].

- Desmineralización por Fermentación: es la etapa complementaria; resulta más sencilla y de menor costo, y emplea cepas microbianas 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:

- Desproteínezación: Es la etapa más crítica del proceso, donde se emplea  $\text{NaOH}$  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<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, KOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, Ca(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>S, 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<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH, 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<sub>2</sub> como se demuestra en la ecuación (1), el cual genera una espuma que a nivel industrial requiere ser tratada con antiespumantes siliconados [51].



Debido a esta generación de espuma, es que se realiza comúnmente el proceso de desproteínización 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> o KMnO<sub>4</sub>, 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  $pK_a \sim 6.3$ , 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.

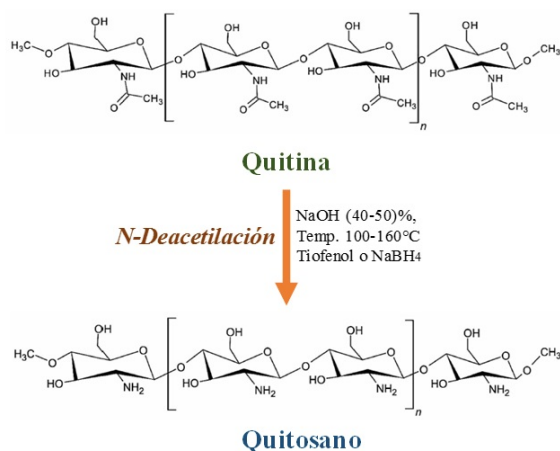


Figura 5: Proceso de transformación de la Quitina a Quitosano [16]

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  $\alpha$  y  $\beta$ - 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



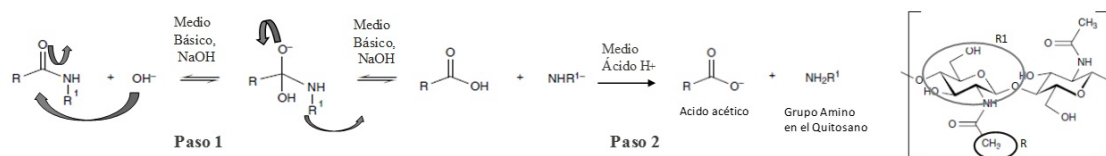


Figura 6: Proceso de N-Deacetilación – Reacción de sustitución nucleofílica de 2 pasos [39]

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  $\text{NaBH}_4$  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  $\text{HCl}$  y  $\text{HNO}_3$  [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.

- 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

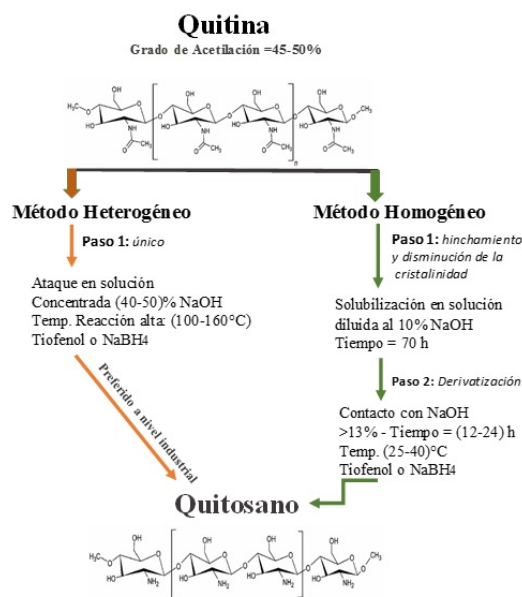


Figura 7: Proceso de N-Deacetilación: Comparación del método homogéneo y heterogéneo

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  $2 \times 10^5$  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  $\beta$ -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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , de alta pureza:

Tabla 2: Datos comerciales de los productos Quitosanos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

	Quitosano estructura cristalina		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  [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 fisicoquímicas

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 <sup>1</sup>H RMN y <sup>13</sup>C RMN
- 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), aminoalquilación 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,

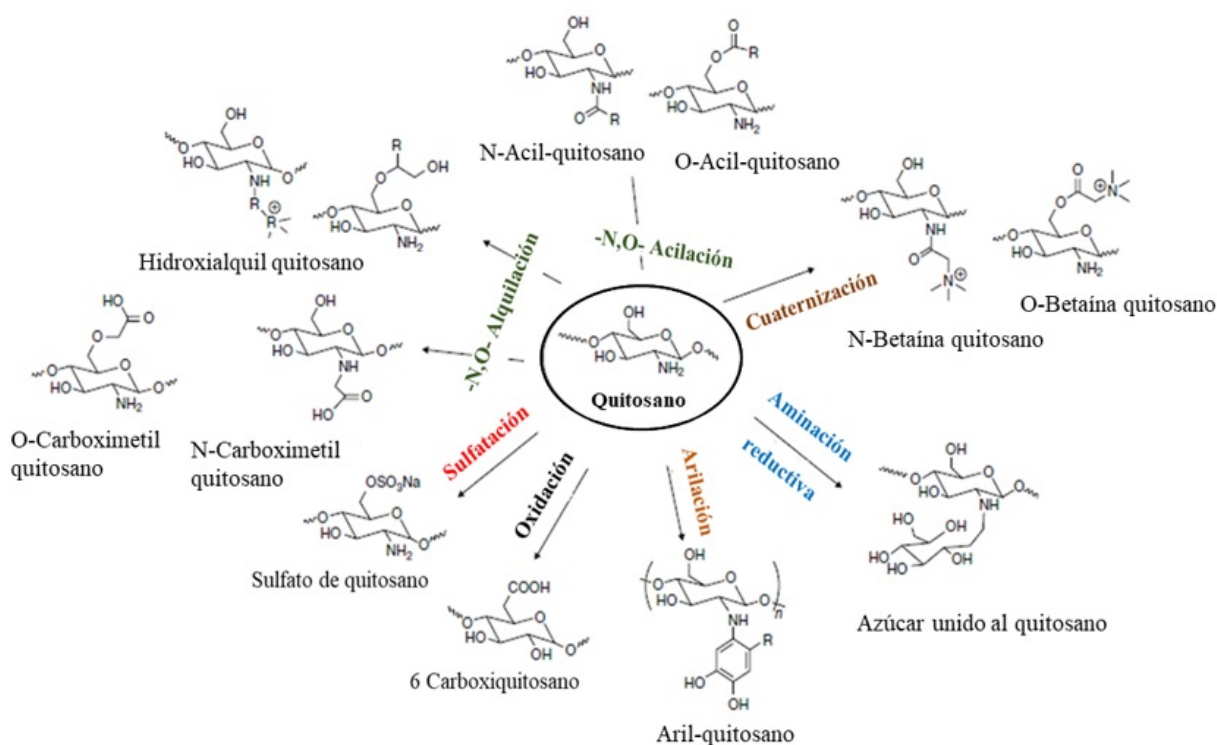


Figura 8: Reacciones de derivatización típicas sobre la molécula de Quitosano [17]

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 deacidificante 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 morfo-genético 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  $\alpha$  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  $\beta$ -chitin from squid pens (*Loligo chensis*)," *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. Subhpradha, P. Ramasamy, V. Shanmugam, P. Madeswaran, A. Srinivasan, and A. Shanmugam, "Physicochemical characterisation of  $\beta$ -chitosan from *Septoteuthis 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. Hezme, 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 (*Labeo 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  $\beta$ -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. Mengibar, 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 Diffraction 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 identifying 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. 20571–20581, 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  $\alpha$ - &  $\beta$ -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  $\gamma$ -irradiated chitosan in solid state and in 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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -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 <sup>\*a</sup> , Jesús A. Mejía-Marcacuzco <sup>a</sup> , Edilberto Guevara-Pérez <sup>a</sup> ,  
Piero Natividad-Toribio <sup>b</sup> , Luis Razuri-Ramírez <sup>c</sup> 

<sup>a</sup>Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

<sup>c</sup>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<sup>3</sup>.

**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<sup>3</sup>.

**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<sup>3</sup>.

### 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 lámina 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 lámina de riego al 100 % del ETc (T-2). El área

neta del campo experimental fue de 270 m<sup>2</sup> la cual se dividió en 20 parcelas experimentales de 3,00 m x 4,50 m (13,5 m<sup>2</sup>) 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, 196 kg K<sub>2</sub>O/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 (m/s)	T(°C)		HR (%)	Ev (mm)	ET <sub>o</sub> (mm/d)
		Max	Min			
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  $K_p = 0,80$  obteniéndose primeramente la evapotranspiración del cultivo de referencia a través de la ecuación (1):

$$ET_o = E \cdot K_p. \tag{1}$$

La evapotranspiración real ( $ET_c$ ), se determinó multiplicando la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ) por el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) según la ecuación (2):

$$ET_c = ET_o \cdot K_c. \tag{2}$$

El coeficiente  $K_c$  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)	$K_c$
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.

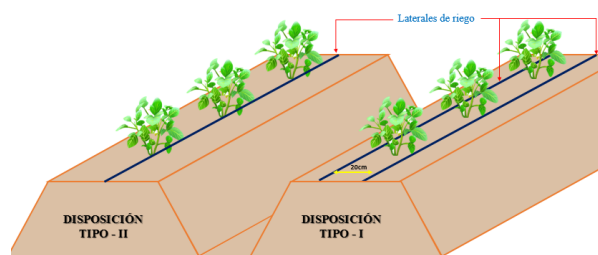


Figura 1: Disposición de laterales de riego

El secado parcial del suelo en la zona de raíces (SPR) al 50 % del  $ET_c$  (SPR1 y SPR2) consistió en humedecer la mitad de la zona radicular de la planta, con una lámina de riego reducida al 50 % de  $ET_c$ ; 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.

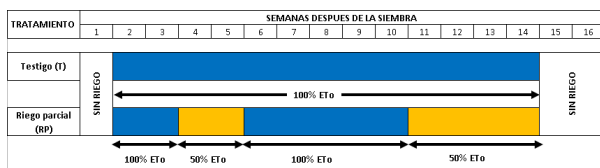


Figura 2: Cronograma de aplicación del agua en los tratamientos de riego

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.

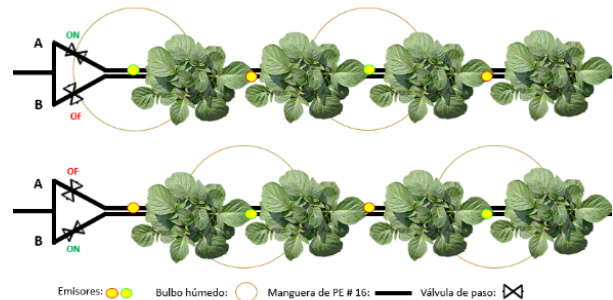


Figura 3: Vista de planta de la disposición lineal y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces

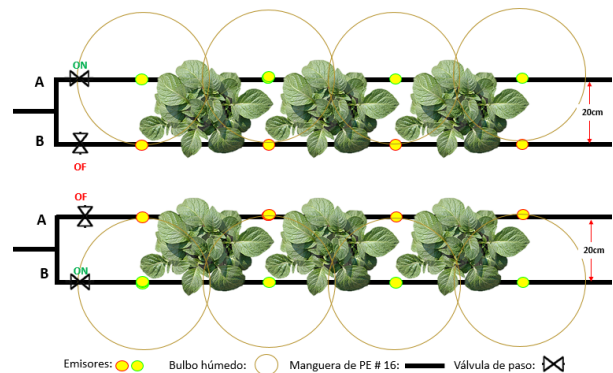


Figura 4: Vista de planta de la disposición en paralelo y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces

### 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<sup>3</sup>/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

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

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<sup>3</sup>/ha), lo cual representa un ahorro del 20 %.

#### 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 embargo, 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 de riego parcial de la zona de raíces
	Tratamiento control	
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

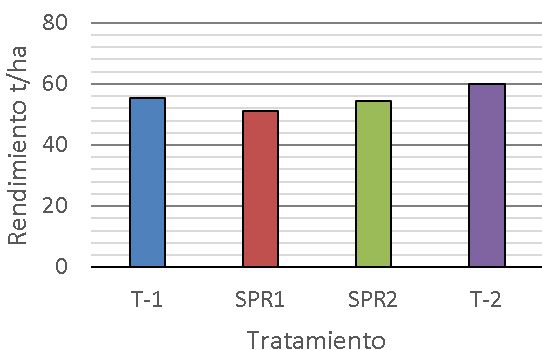


Figura 5: Rendimiento total para cada tratamiento en t/ha

### 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

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		

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.

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

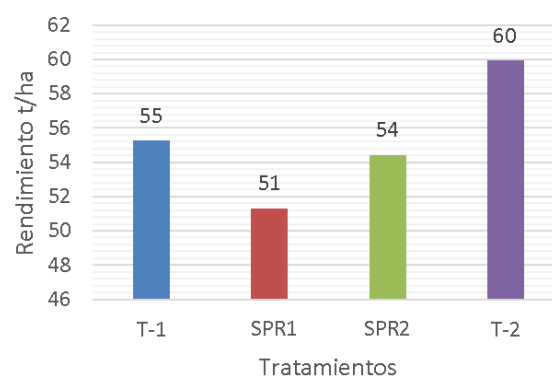


Figura 6: Rendimiento comercial para cada tratamiento en t/ha

### 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.

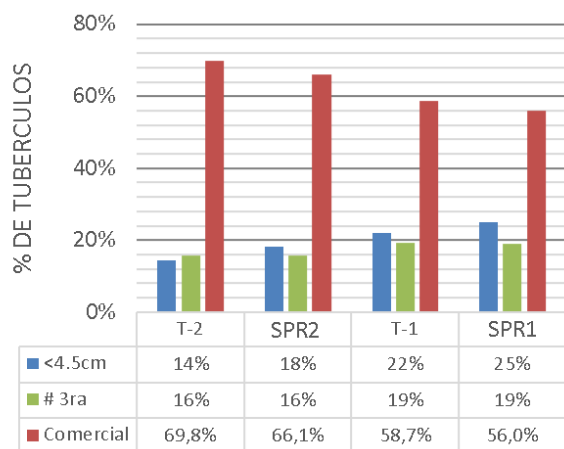


Figura 7: Distribución porcentual del número de tubérculos según su clasificación

### 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.

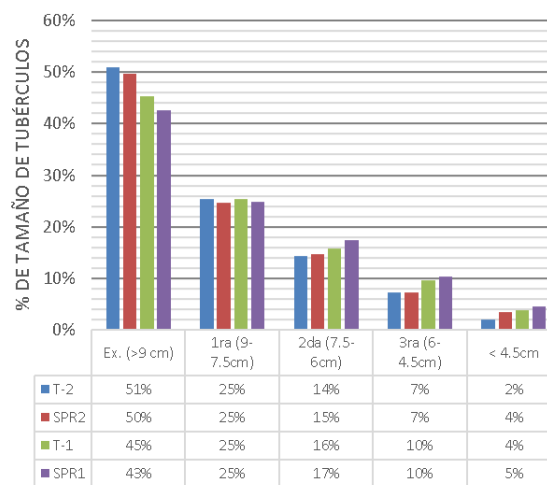


Figura 8: Efecto de los tratamientos sobre el tamaño de tubérculos según el sistema de clasificación establecido

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

Tratamiento	Extra	1 <sup>era</sup>	2 <sup>da</sup>	3 <sup>era</sup>	<4,5 cm
T-2	1,01008 <sup>a</sup>	0,50306 <sup>a</sup>	0,28715 <sup>ab</sup>	0,14457 <sup>b</sup>	0,042444 <sup>b</sup>
SPR2	0,91155 <sup>ab</sup>	0,45413 <sup>a</sup>	0,26880 <sup>b</sup>	0,1355556 <sup>b</sup>	0,065955 <sup>a</sup>
T-1	0,86946 <sup>bc</sup>	0,48795 <sup>a</sup>	0,30235 <sup>ab</sup>	0,18666 <sup>a</sup>	0,073955 <sup>a</sup>
SPR1	0,77231 <sup>c</sup>	0,45195 <sup>a</sup>	0,31577 <sup>a</sup>	0,18813 <sup>a</sup>	0,085111 <sup>a</sup>
	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  $\text{kg/m}^3$ . 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  $46,48 \text{ kg/m}^3$  y  $47,25 \text{ kg/m}^3$ . Esta mayor eficiencia de uso del

Tabla 17: Rendimiento del cultivo, consumo y eficiencia de uso del agua

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Consumo de agua ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )	Eficiencia de uso del agua ( $\text{kg/m}^3$ )
T-1	64000	1651	38,76
SPR1	60000	1291	46,48
SPR2	61000	1291	47,25
T-2	66000	1651	39,98

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  $38,76 \text{ kg/m}^3$  y  $39,98 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. Resultados referenciales extraídos de varios estudios indican que la eficiencia de uso del agua en el cultivo de papa varía entre 9 y  $25 \text{ kg/m}^3$  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  $26,65 \text{ kg/m}^3$  y  $21,55 \text{ kg/m}^3$ , 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.

#### 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 Nuñez [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. Egúsqüiza-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. Zaghoul, “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 <sup>\*,a</sup> , Leidy Pernía <sup>b</sup> , Ygmar Jiménez<sup>a,†</sup>, José V. García<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>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 (GC-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,  $\lambda = 220$  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 (GC-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,  $\lambda = 220$  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

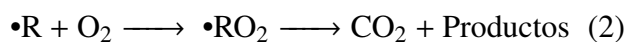
\* Autor para correspondencia:

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].

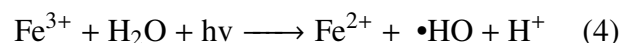
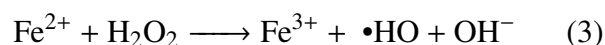
Para la degradación de estos COP se han utilizado diferentes métodos de tratamiento terciarios de aguas, tales como la nanofiltración, microfiltración, electrocoagulación, procesos de oxidación avanzada con hierro y lámparas UV, así como tratamientos combinados de fotocátalisis ( $\text{TiO}_2$ ) y oxidación 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,  $\bullet\text{OH}$ ) 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)).



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 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) y la fotocátalisis 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 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) para la formación de radicales libres en presencia de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ), los cuales se oxidan a iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (ecuación (3)), en presencia de luz ( $h\nu$ ). Al mismo tiempo la técnica FotoFenton-like utiliza la fotoreducción del  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  formando un acuocomplejo metal-carga-ligando (ecuación (4)) [7, 8, 9].



Por otra parte la fotocátalisis hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz ultravioleta por parte de un catalizador, en específico el  $\text{TiO}_2$  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  $\text{H}_2$  reduce el lodo rojo a diferentes fases, principalmente  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO} / \text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{FeO}$ , siendo estas fases activas catalíticamente. La reducción con  $\text{H}_2$  a 400 °C mostró los mejores resultados para la oxidación del colorante azul de metileno como molécula modelo con condiciones de reacción con un  $\text{H}_2\text{O}_2$  a pH neutro debido a la presencia del compuesto  $\text{Fe}^0 / \text{Fe}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{+4}$ . 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 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 de Lodo rojo salmuera (LRS400) (g/L)	2 4 6	(-1) (0) (1)
(B) Peróxido de Hidrógeno (g/L)	27 40 53	(-1) (0) (1)
(C) Ajuste de pH	2 3 4	(-1) (0) (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 ( $\text{Wh/m}^2$ ) se llevó a cabo mediante un piromanómetro ISO First Class marca Climatronics Corporation, en las siguientes coordenadas Norte  $10^{\circ}22'03,16''$  y Este  $67^{\circ}02'38,25''$  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), fotólisis 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 ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ) 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 se realizó a través de la técnica de Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) acoplado a un detector UV-HP DAD, en un equipo marca Agilent Technologies serie 1200 con una columna C-18, 4,5mm, 3,5  $\mu\text{m}$ , 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:

- ácido acético glacial (JT Baker),
- ácido fórmico (BDH Limited Poole England),
- ácido oxálico (Riedel de Haen),
- hidroquinona (Fisher Scientific) y
- 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 <sub>2</sub> 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<sup>3</sup> 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<sup>+3</sup>), 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<sub>2</sub>/L a 300 mg O<sub>2</sub>/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<sup>+2</sup> 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<sup>3</sup> 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<sup>3</sup> 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 <sub>2</sub> 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<sub>2</sub>/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  $\text{Fe}^{+3}$  en la superficie del catalizador en presencia de la radiación se fotoreduce a  $\text{Fe}^{+2}$  (ecuación (4)), y con la adición del peróxido éste se aproxima al catalizador y reacciona en la superficie con el  $\text{Fe}^{+2}$  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 ( $\text{H}^+$ ) formándose  $-\text{M}-\text{OH}^{2+}$  [33, 35], y de esta manera ocurre la aproximación entre el peróxido de hidrógeno y el catalizador para la producción del  $\bullet\text{OH}$ , 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  $\text{TiO}_2$  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 ( $H_2O_2/UV_{solar}$ ) 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 fotólisis 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 fotólisis del fenol (fenol/UV) durante el periodo de tiempo de 4 h bajo condiciones de radiación solar, obteniéndose una fotólisis 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) $\pm 0,001$	Nombre del compuesto	Coincidencia espectral (%) $\pm 1$	Área (% del Total) $\pm 1$
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 $\pm 0,01$	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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /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].

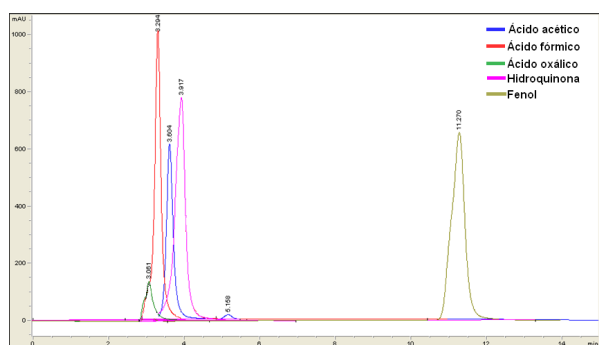


Figura 2: Cromatograma de los patrones estudiados

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 resultó 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 fotólisis 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 oxhidrilo 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  $\text{Fe}^{3+}$  se coordina a seis ligandos circundantes que pueden ser  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{OH}^-$  y  $\text{H}_2\text{O}$  [52]. En la primera fase, el complejo está compuesto por el sólido compuesto principalmente por  $\text{O}_2^-$ , siendo la estructura típica de la hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) [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  $[\text{Fe}_3^+\text{L}]^n$  [52]. Esta especie compleja de  $\text{Fe}^{3+}$  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  $\text{Fe}^{2+}$ , radical oxidrilo ( $\bullet\text{OH}$ ) y otros productos, tal como lo afirman [7, 24, 31, 53].

Por otra parte, el óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) se comporta como un semiconductor tipo óxido permitiendo la fotocatalisis heterogénea involucrando la absorción de la radiación en un amplio rango del espectro solar entre 200-620 nm, en específico el  $\text{TiO}_2$  tipo anatasa realiza una óxido-reducción generando un par electrón( $e^-$ )-hueco ( $h^+$ ).

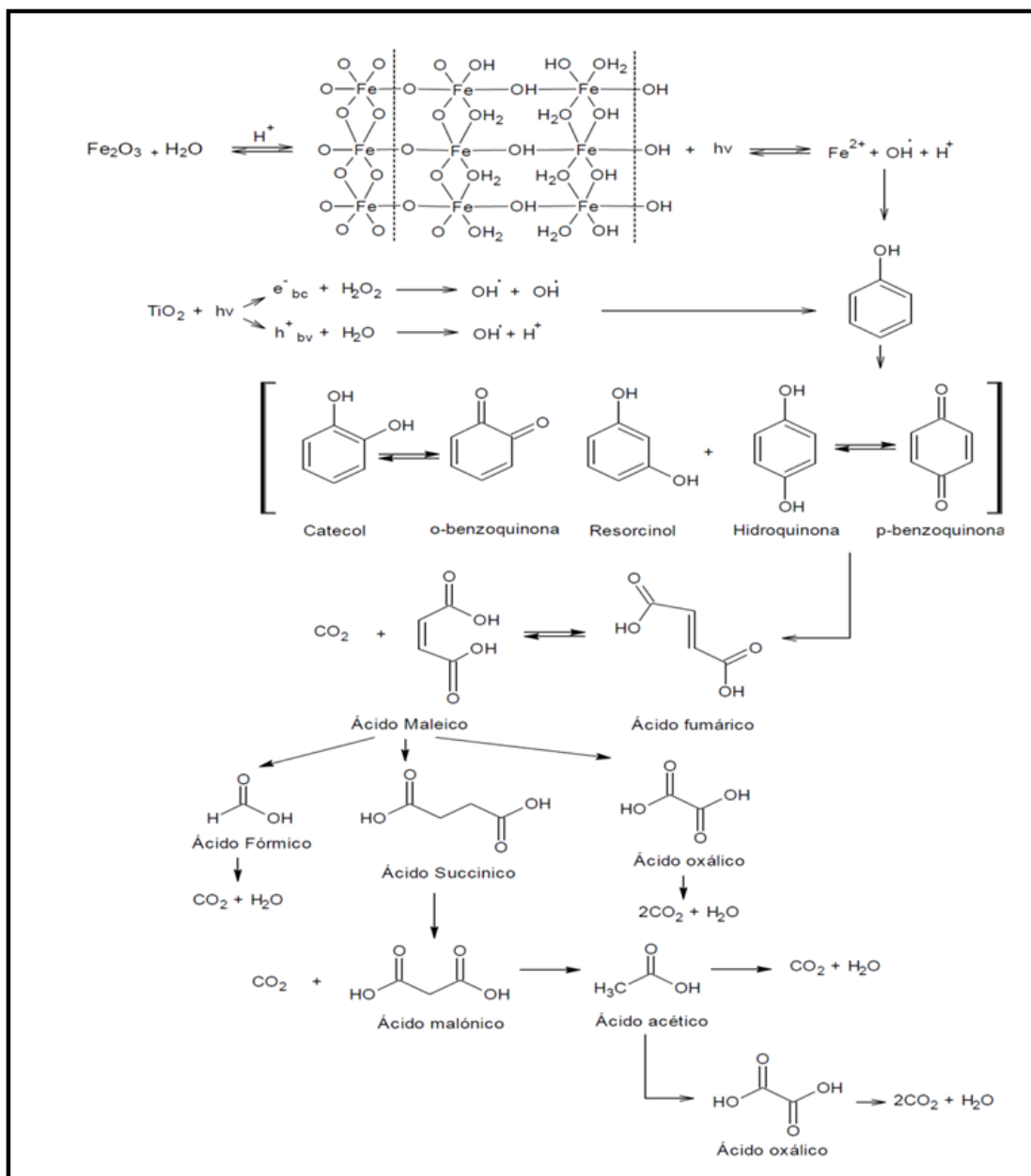


Figura 3: Mecanismo de reacción para la degradación de fenol mediante POA solar y lodo rojo como catalizador

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 ( $\bullet OH$ ) 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

( $\bullet OH$ ) y este a su vez va reaccionar con el oxígeno del medio y va formar el radical superóxido ( $O_2\bullet$ ) [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 dihidroxilbencenos 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 reemplazo 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 fumárico [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 succínico, 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 fotocatalisis 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>,” *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<sub>2</sub>,” *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, “Avaliação da reação fotofenton na decomposição de resíduos de carraticida,” *Química 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 N° 5.021. Decreto N° 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  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe-TiO}_2$  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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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, “Clofibrac 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/ $\text{H}_2\text{O}_2$  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 water treatment I: oxidation technologies et ambient conditions,” *Advanced in Environmental Research*, vol. 8, no. 3–4, pp. 501–551, 2004.
- [45] M. Hoffman, S. Martin, W. Choi, and W. Bahnemann, “Environmental 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  $\text{Fe-TiO}_2$  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 ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) para la eliminación de gases  $\text{NO}_x$  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 hidratación,” *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 doctoral, 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 <sup>a</sup> , Wilmer Uriarte-Tirado <sup>\*a</sup> , Ernesto Cardenas-Vásquez <sup>b</sup> ,  
Salvador Orrego-Zapo <sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Universidad Nacional Autónoma de Chota. Chota, Perú.

<sup>b</sup>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<sub>5</sub>), 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<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>5</sub>, 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<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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)

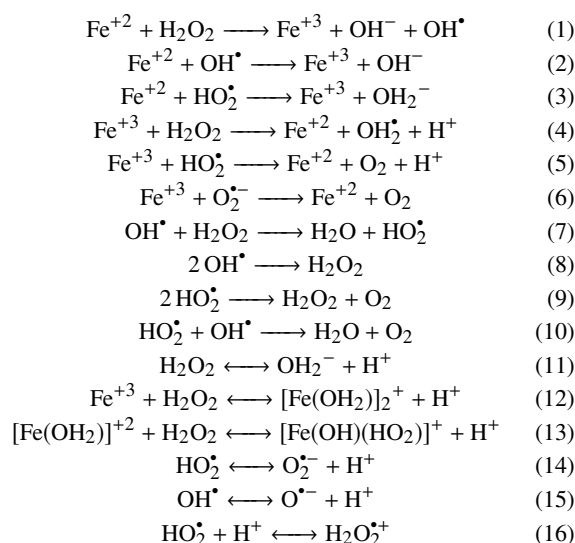
orgánica [1] y que son descargadas directamente sobre cuerpos de agua y suelo, lo que genera la aparición de vectores de infección, impacto visual negativo, malos olores [2][3] y un desbalance en el nivel de amortiguamiento natural de las aguas de la quebrada Colpamayo–Chota, lo que pone en riesgo la 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 aminos, 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  $\text{Fe}^{+2}$  el catalizador y peróxido de hidrógeno el agente oxidante que en medio ácido generan radicales hidroxilos ( $\text{OH}^\bullet$ ), 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  $\text{OH}^\bullet$  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, aminos, aminos aromáticas, etc. [21] con altas velocidades de reacción provocando grandes cambios estructurales en los contaminantes hacia la degradación parcial (sustancias más fácilmente biodegradables) 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  $\text{OH}^\bullet$  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]



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 Scientifica) 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

Experimento	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Plan de experimentación		
				FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (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<sub>4</sub> 7 H<sub>2</sub>O (99 % p/p, Merck) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 % v/v, Merck) (Tabla 2). Primero se adicionó el FeSO<sub>4</sub> 7 H<sub>2</sub>O homogenizando en un equipo de prueba de jarras durante 3 minutos a 50 rpm para facilitar su disolución, enseguida se agregó el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>TOTAL</sub> se calculó con la ecuación (17):

$$\text{Remoción de DQO}(\%) = \frac{DQO_i - DQO_r}{DQO_i} \cdot 100, \quad (17)$$

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<sub>5</sub> se encuentran muy por encima de lo que establece la normativa peruana para aguas residuales. El índice de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DQO) es de 0,4 que es un indicativo de aguas residuales parcialmente biodegradables [34] por lo que es muy probable 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  $\text{OH}^\bullet$  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 <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	1874
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	4654,4
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	1536
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	7200
Potencial de hidrógeno	pH	7,6
Conductividad	S/cm	1560
Sólidos totales	mg/L	3361
OD	mg O <sub>2</sub> /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  $\text{OH}^\bullet$  en la muestra tratada. A partir del minuto 18 no se apreció un cambio significativo 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.

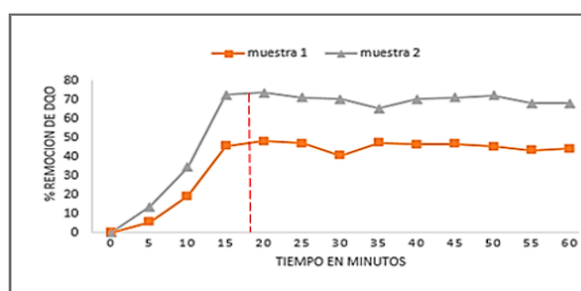
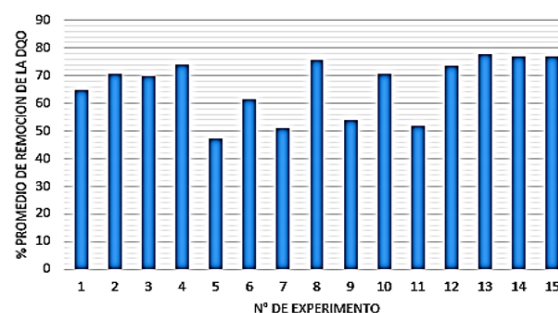


Figura 1: Tiempo de contacto estimado del reactivo de Fenton a pH ajustado a 3 sobre las aguas residuales del camal de Chota

### 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  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$  [37], el cual a su vez reacciona lentamente con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  haciéndose lenta la generación de radicales  $\text{OH}^\bullet$ . Por otro lado, un incremento del pH por encima de 4 conduce a la precipitación del Fe bajo la forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  e inhibe la regeneración del  $\text{Fe}^{+2}$  (ecuación (4)) y volver a empezar el proceso de oxidación (ecuación (1)), sin embargo; dicha posibilidad de recuperación del  $\text{Fe}^{+2}$  es bastante lenta y puede generar radicales  $\text{OH}_2^\bullet$  que son también especies oxidantes pero no tan potentes como el radical  $\text{OH}^\bullet$ , pero dicho radical puede ser perjudicial para la oxidación Fenton ya que éste puede interactuar con el  $\text{Fe}^{+2}$  (ecuación (3)),  $\text{H}_2\text{O}_2$  (ecuación (7)) y radicales  $\text{OH}^\bullet$  (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  $(\text{H}_3\text{O}_2)^{+2}$  inhibiendo también la regeneración del  $\text{Fe}^{+2}$  (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 (%)
$\text{FeSO}_4$	2110,55 mg/L	80,28
$\text{H}_2\text{O}_2$	1092,67 mg/L	
pH	3,22	

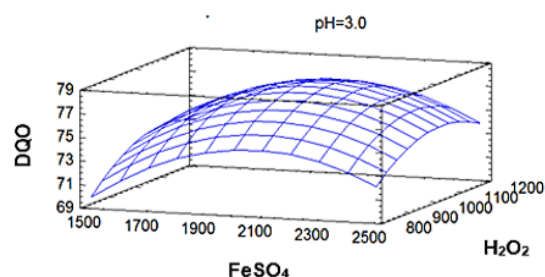


Figura 3: Superficie de respuesta estimada a pH ajustado a 3 para la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota

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  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  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  $\text{OH}^\bullet$  para la degradación máxima de los contaminantes, pero ello implica tener en observancia las reacciones improductivas, el efecto de barrido de los radicales  $\text{OH}^\bullet$  y la regeneración del  $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$  que en efecto es muy lenta y provocaría que la reacción se detenga ante la ausencia de  $\text{Fe}^{+2}$ . Existen reportes de la utilización de  $\text{FeSO}_4$  en el orden de 500 mg/L a 3300 mg/L y de  $\text{H}_2\text{O}_2$  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.

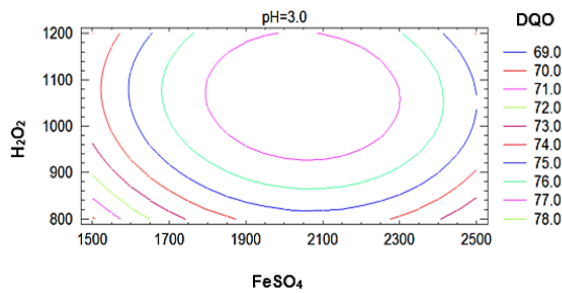


Figura 4: Contornos de superficie de respuesta estimada a pH ajustado a 3 para la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota

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  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 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 significativas, por tanto se observan tres efectos que marcan distancia de la línea arriba y que corresponden al pH,  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , esto quiere decir que un aumento en sus niveles de dosificación

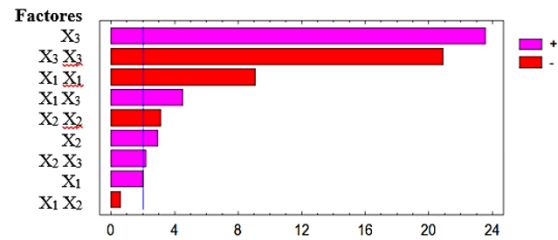


Figura 5: Diagrama de Pareto de los efectos e interacciones de los factores para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota

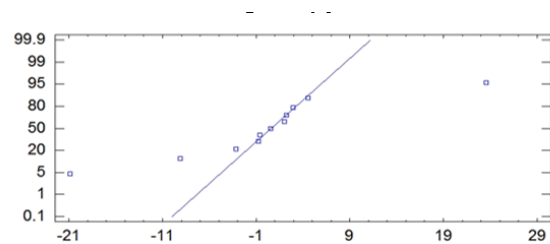


Figura 6: Probabilidad normal para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota

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 Físicoquímica después de la aplicación del proceso Fenton de las aguas residuales del camal de Chota

Parámetro	Unidad	Valores finales
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	468
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	934,14
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	294
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	246
Potencial de hidrógeno	pH	7,1
Conductividad	μ S/cm	6063
Sólidos totales	mg/L	412
OD	mg O <sub>2</sub> /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–Behnken. 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<sub>4</sub>, 1092,67 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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 slaughterhouse 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 desarrollos 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 Environmental 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," *Environmental 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 termoelectrónica," *Química Central*, vol. 3, no. 1, pp. 25–30, 2013.
- [13] P. Bautista, A. Mohedano, M. Gilarranz, J. Casas, and J. Rodríguez, "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 O<sub>3</sub>/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. Eskronsky, "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-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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 of parachlorophenol in synthetic 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 Environment 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 design," *Chemosphere*, vol. 90, pp. 170–175, 2013.
- [23] W. Gernjak, S. Malato, M. Maldonado, and M. Fierhacker, *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. Gümüş and F. Akbal, "Comparison of Fenton and electro-Fenton processes for oxidation of phenol," *Process Safety and Environmental 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 Environment 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 Environment*, 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decomposition activity over  $\beta$ -MnO<sub>2</sub> 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<sup>0</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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 Engineering*, 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 <sup>a</sup> , Ali saremi <sup>\*,a</sup> , Shahab Araghinejad <sup>b</sup> , Hossain Babazadeh <sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Department of Agriculture Sciences and Food Industry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup>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 conducive 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, Feuillet [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):

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = S \frac{\partial h}{\partial t} \pm Q \quad (1)$$

In this equation  $\nabla$  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):

$$\max T_{t,i} = \text{In}_{t,i} = \sum_{i=1}^n Pr_{t,i,j} \cdot P_{t,j} \forall i \quad (2)$$

$$Pr_{i,j} = f_{i,j} (A_{i,j}, W_{i,j}) \quad (3)$$

In this equation,  $T_{t,i}$  was the value of the objective agricultural function of the agent  $i$  during the time period of  $t$ ,  $\text{In}_{t,i}$  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.

$$P_t = A Q_t + B \quad (4)$$

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).

$$\sum_{j=1}^n (A_{i,j} \cdot W_{i,j}) \leq W_{iG} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n A_{i,j} \leq A_t \quad (6)$$

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).

$$\Omega = \max \prod_{j=1}^n (x_j - d_j) \quad (7)$$

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),  $\Omega$  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.

$$\text{Min } G = \frac{1}{12N^2\bar{Q}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |Q_i - Q_j| \quad (8)$$

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}, i$$

In the equation (8),  $Q_j$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$ ,  $i$ , and  $\bar{Q}$  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<sup>2</sup> 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 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/yr (1,74 billion m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>. The cumulative reservoir

deficit of this aquifer was about 8663 billion m<sup>3</sup>. The volume of excessive withdrawal of authorize wells and the depletion volume of unauthorized wells was 983,37 billion m<sup>3</sup>, 514,55 billion m<sup>3</sup>, respectively, and total depletion volume from the aquifer was equal to 1497,92 billion m<sup>3</sup>.

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<sup>3</sup> and 8663 billion m<sup>3</sup>, 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.

Table 2 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



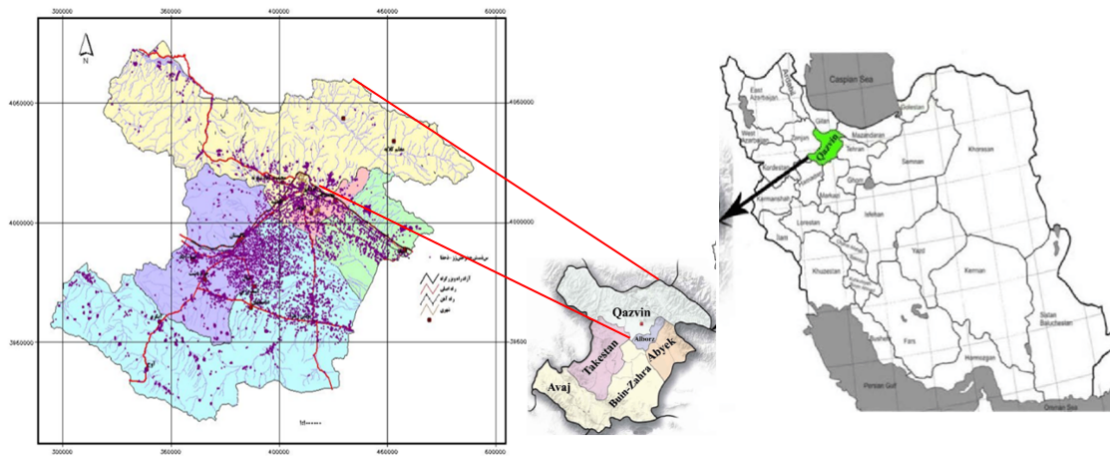


Figure 1: Qazvin study area location map

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 <sup>3</sup> /yr)	Cultivation (%)	Area (ha)
Garden	Grapes	10000	59	22227
	Pistachios	14500	6.5	2449
	Walnuts	17000	9.5	3579
	Other	15500	25	9418
	<b>Total</b>	—	100	37673
Agriculture	Wheat	8000	35.4	46899
	Alfalfa	17000	24	28548
	Corn	12000	12.2	16163
	Other	10000	28.4	40873
	<b>Total</b>	—	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

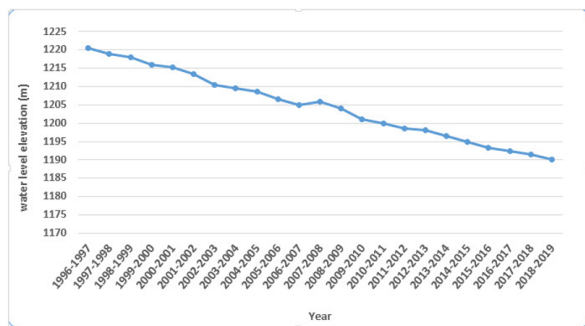


Figure 2: Qazvin plain hydrograph [1]

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.

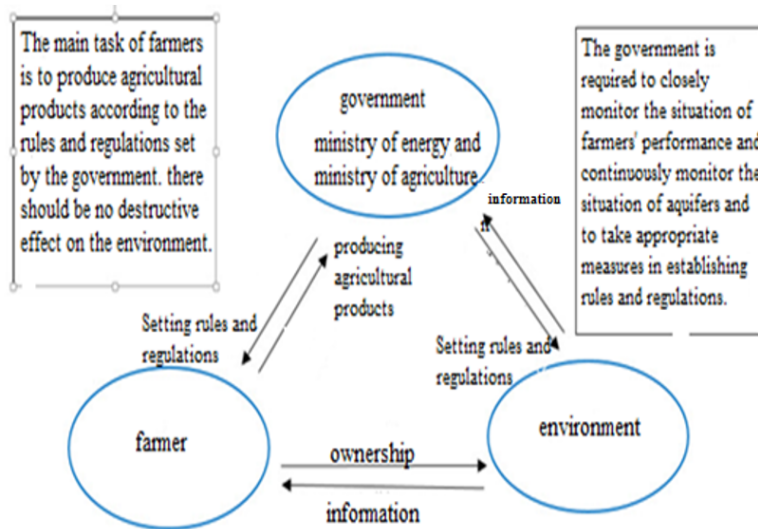


Figure 3: Conceptual model of communication between three main agents

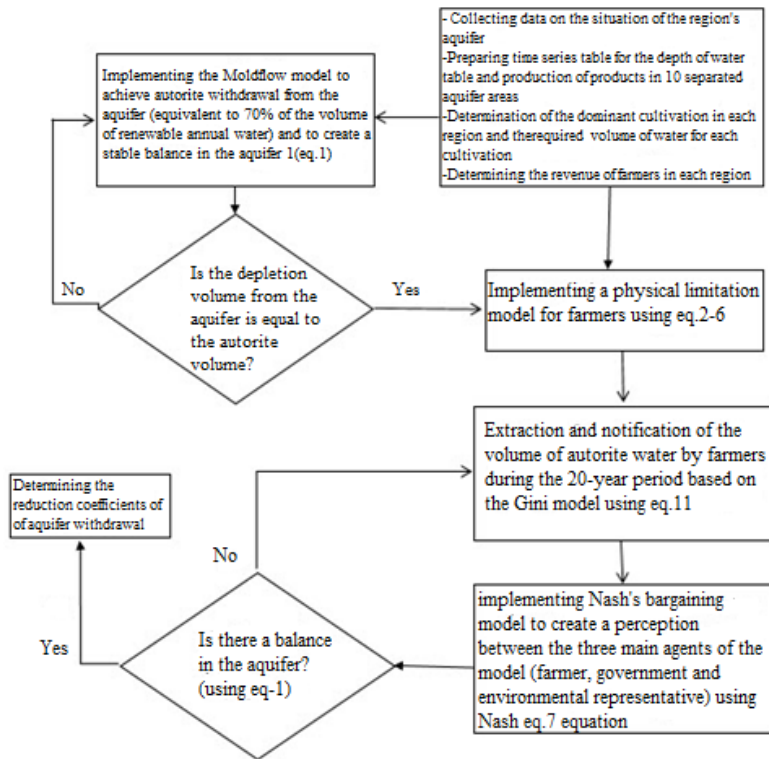


Figure 4: Stages of developing the ABM

#### 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	—	✓	—	✓ <td ✓	
Reducing the depletion of autorite wells	—	—	✓	—	✓

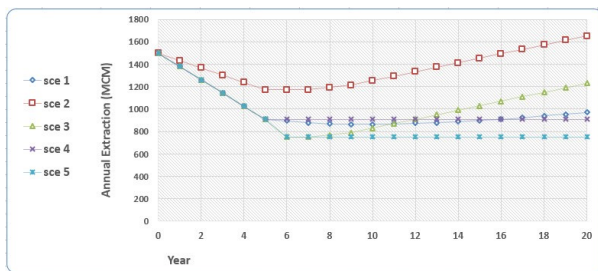


Figure 5: Output parameters variations: Total annual extraction in different scenarios

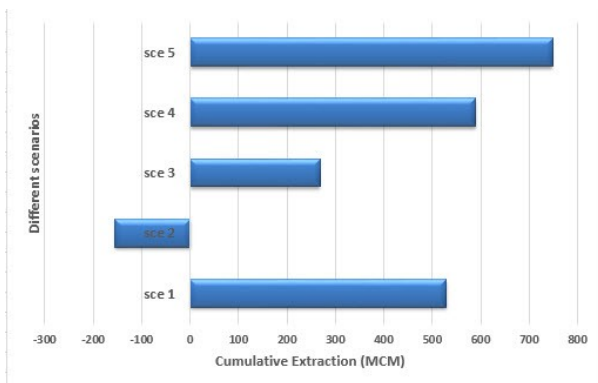


Figure 6: Total cumulative extraction; in different scenarios

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 five 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

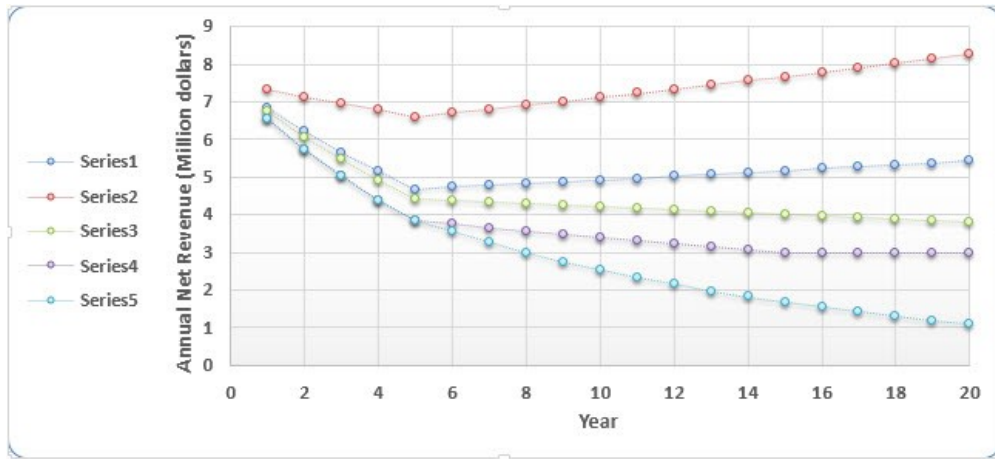


Figure 7: Output total annual net revenue variations in different scenarios

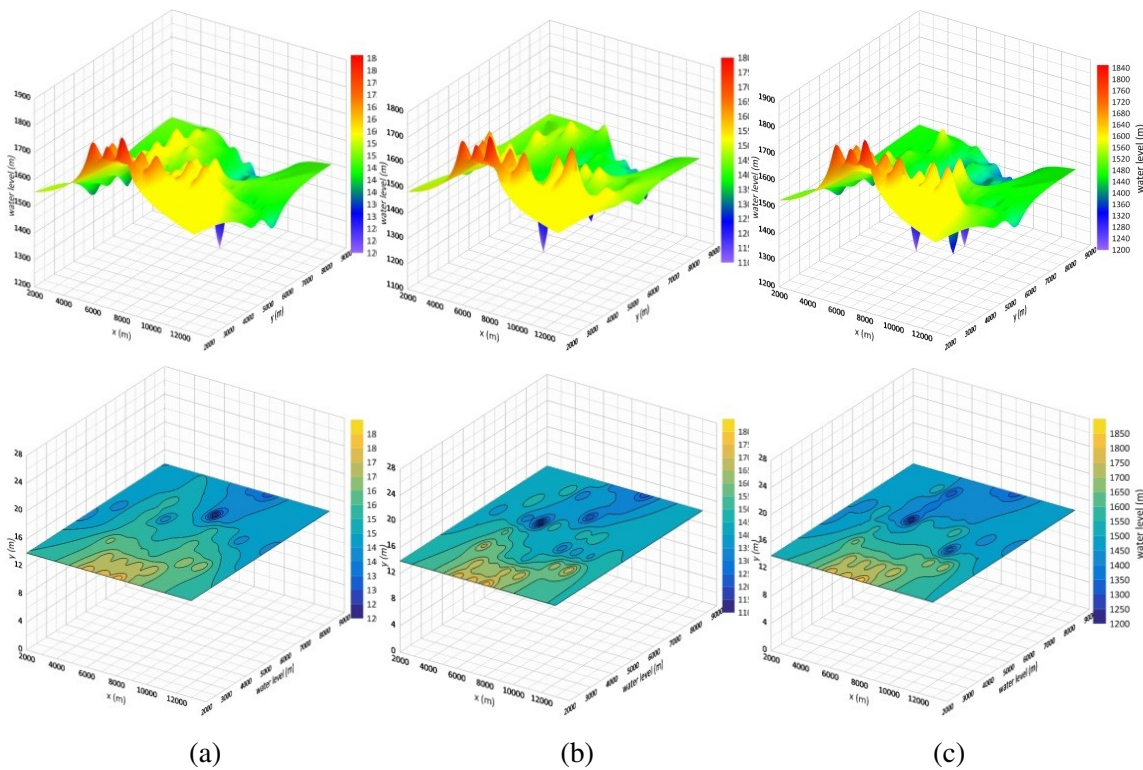


Figure 8: Changes in the iso-piez map of the study area in two and three-dimensional forms. Images from a to c indicated the effect of reduced groundwater depletion on the region’s iso-piez map

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. Elsayah, 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, "Integrating 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 regulatory mechanism 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 by agent-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 agriculture and 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 importance of 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,” *Water Resources 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 <sup>\*,a</sup> , Jesús David Sosa <sup>b</sup>, Rene Lujano <sup>c</sup> , Apolinario Lujano <sup>d</sup> ,

<sup>a</sup>Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

<sup>b</sup>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Lima, Perú

<sup>c</sup>Programa de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

<sup>d</sup>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 escurriente, 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<sup>2</sup>), 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 cobertura 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 los parámetros morfométricos de la cuenca y los que se utilizaron para la modelación hidrológica.

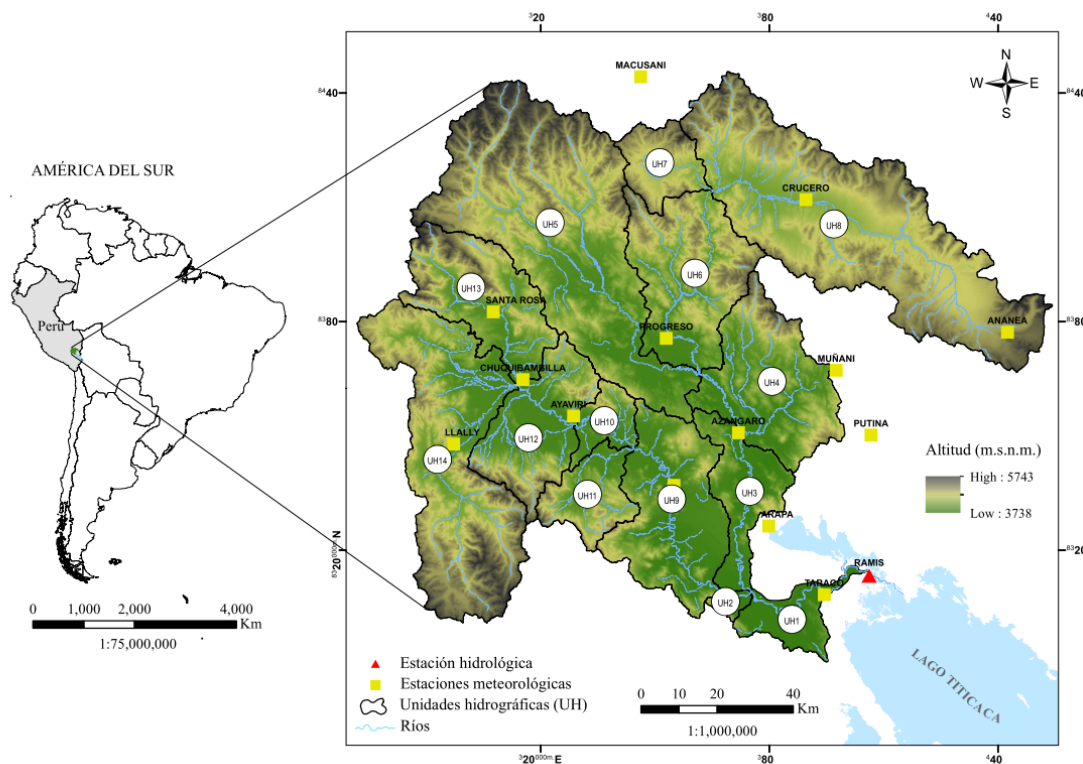


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca Ramis y estaciones hidrometeorológicas

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 paramètres). El modelo GR3 también tiene

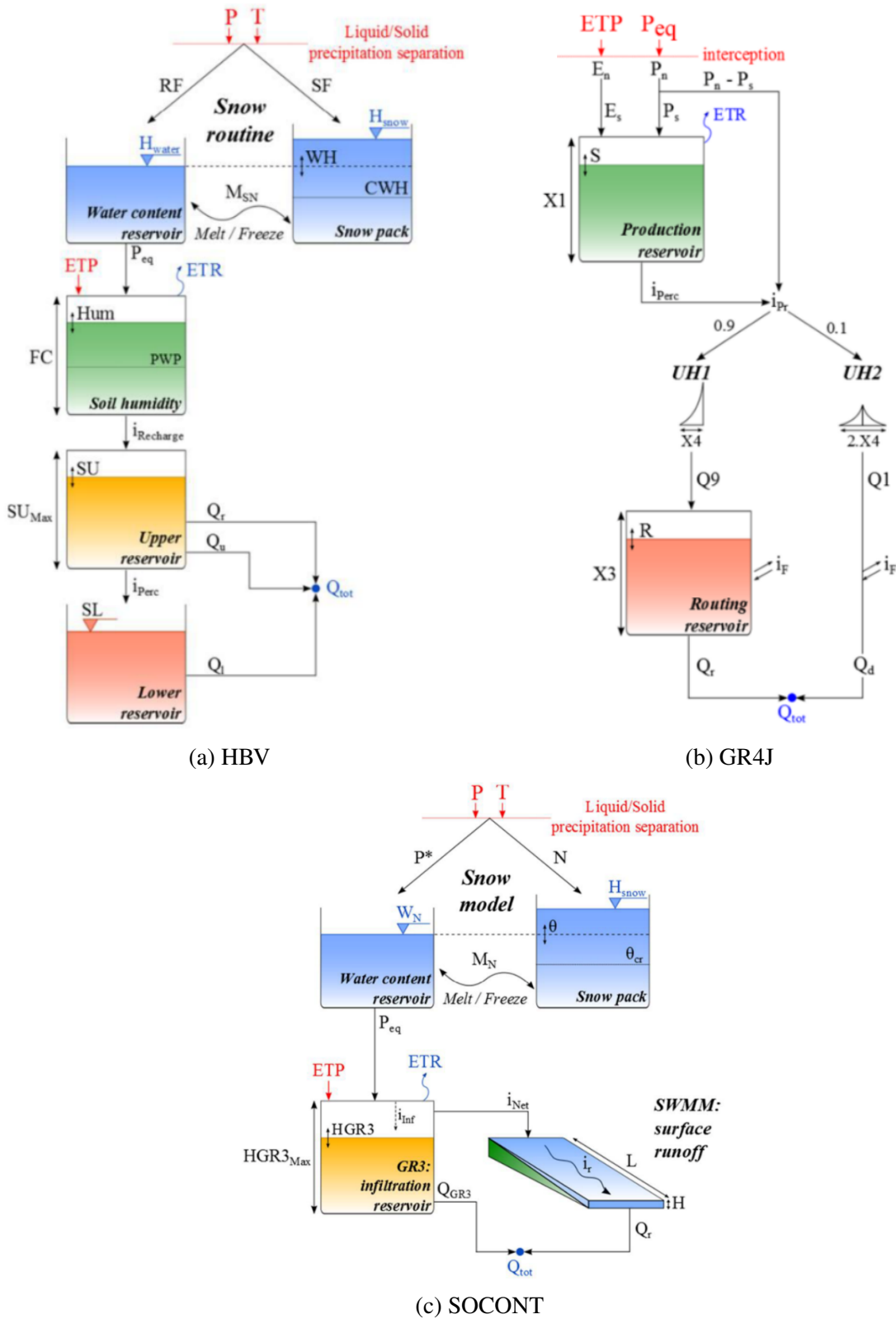


Figura 2: Estructura de los modelos hidrológicos [19]

en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP) y (Storm Water Management Model) [19]. proporciona la intensidad neta al modelo SWMM

#### 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-In, 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-In 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-In 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-In = 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) <sup>2</sup>	$DE_{Q_{sim}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2}$	0
Coficiente de correlación de Pearson (CC)	$CC = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}}$	1
Bias Score (BS)	$BS = 1 - \left  \max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right $	1
Coficiente de Nash (Nash)	$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}$	1
Coficiente de Nash para valores logaritmo (Nash-ln)	$Nash-ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\bar{Q}_{ref}))^2}$	1
Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE)	$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}}{\bar{Q}_{ref}}$	0
Raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD)	$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} [(Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) - (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})]^2}$	0

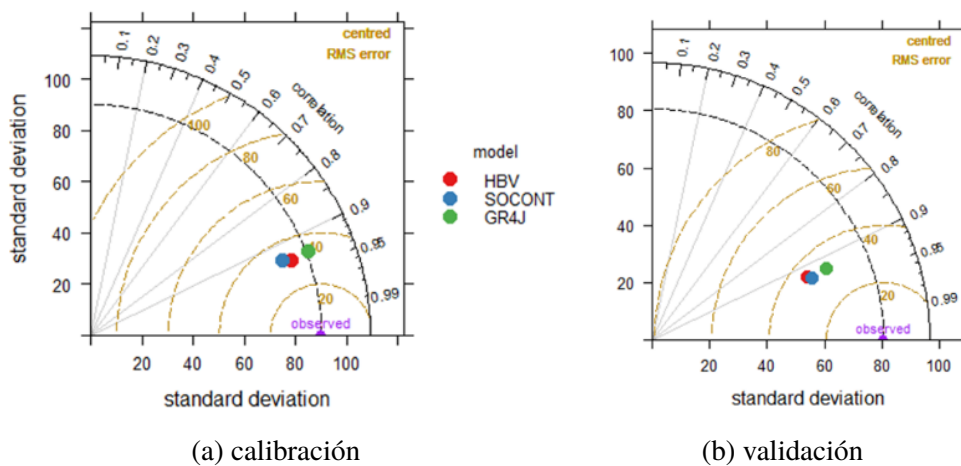


Figura 3: Diagrama de Taylor para HBV, GR4J y SOCONT

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	Coefficiente 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	Coefficiente forma	2.5000000	-
	FC	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	<b>0.0631195</b>	M
	PWP	Punto de marchitez permanente del suelo	0.1538436	-
	SUMax	Nivel umbral de agua del Reservorio superior	<b>0.0539669</b>	M
	Kr	Coefficiente de liberación del flujo superficial	<b>0.0500484</b>	1/d
	Ku	Coefficiente de liberación del interflujo	<b>0.0178894</b>	1/d
	Kl	Coefficiente de liberación del flujo base	<b>0.0000691</b>	1/d
	Kperc	Coefficiente de liberación de percolación	<b>0.017696</b>	1/d
GR4J	X1	Capacidad del depósito de producción	<b>0.2223317</b>	M
	X2	Coefficiente de intercambio de agua	<b>-0.0049951</b>	M
	X3	Capacidad de depósito de laminación	<b>0.1765772</b>	M
	X4	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	<b>2.8978348</b>	D
SOCONT	Asn	Coefficiente de deshielo grado-día	<b>9.3206044</b>	mm/°C/día
	AsnInt	Intervalo de deshielo grado-día	<b>2.278902</b>	mm/°C/día
	AsnPh	Cambio de fase de la función sinusoidal	<b>35.1478456</b>	D
	ThetaCri	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.1000000	-
	Bp	Coefficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida	0.0125000	d/mm
	Tcp1	Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida	<b>-0.1042677</b>	°C
	Tcp2	Temperatura máxima crítica para la precipitación líquida	<b>3.8369999</b>	°C
	Tcf	Temperatura crítica de la nieve	<b>0.5353516</b>	°C
	HGR3Max	Altura máxima del reservorio de infiltración	<b>0.21473</b>	M
	KGR3	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración.	<b>0.0002539</b>	1/s
	L	Ancho del plano	1000.0000	M
J0	Pendiente del plano	0.0100000	-	
Kr	Coefficiente de Strickler	<b>0.1012983</b>	m <sup>1/3</sup> /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

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

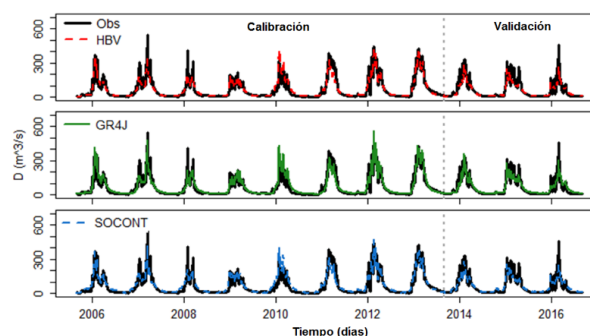


Figura 4: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de Calibración y Validación

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-In	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

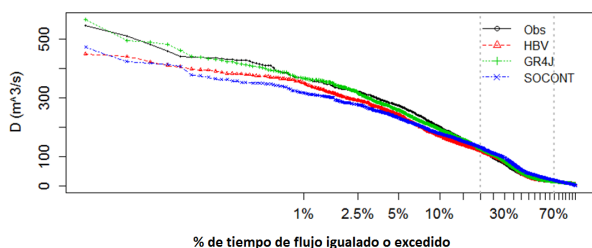


Figura 5: Curva de duración de descargas observadas y simuladas

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 (SE-NAMHI) – 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. Schaeffli, 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, “Modèle 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. Schaeffli, 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 río 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 précipitations, l’évaporation et l’écoulement*. 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<sup>®</sup> as a tool work. The minimum average flow of wastewaters for each carwash ranged from 12,64 m<sup>3</sup>/h to 51,82 m<sup>3</sup>/h. According to the physical and chemical characteristics of these tests referring to total solids, total dissolved solids, total suspended solids, sedimentables solids, BOD<sub>5</sub>, 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<sub>5</sub>, 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<sup>®</sup> como herramienta de trabajo. El caudal mínimo promedio generado de aguas residuales para cada autolavado varió de 12,64 m<sup>3</sup>/h a 51,82 m<sup>3</sup>/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<sub>5</sub>, 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<sub>5</sub>, 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 como 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  $259 \pm 40$  mg/L; conductividad a  $446 \pm 55$   $\mu$ S/cm y turbidez a  $139 \pm 45$  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<sub>5,20</sub>), 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).

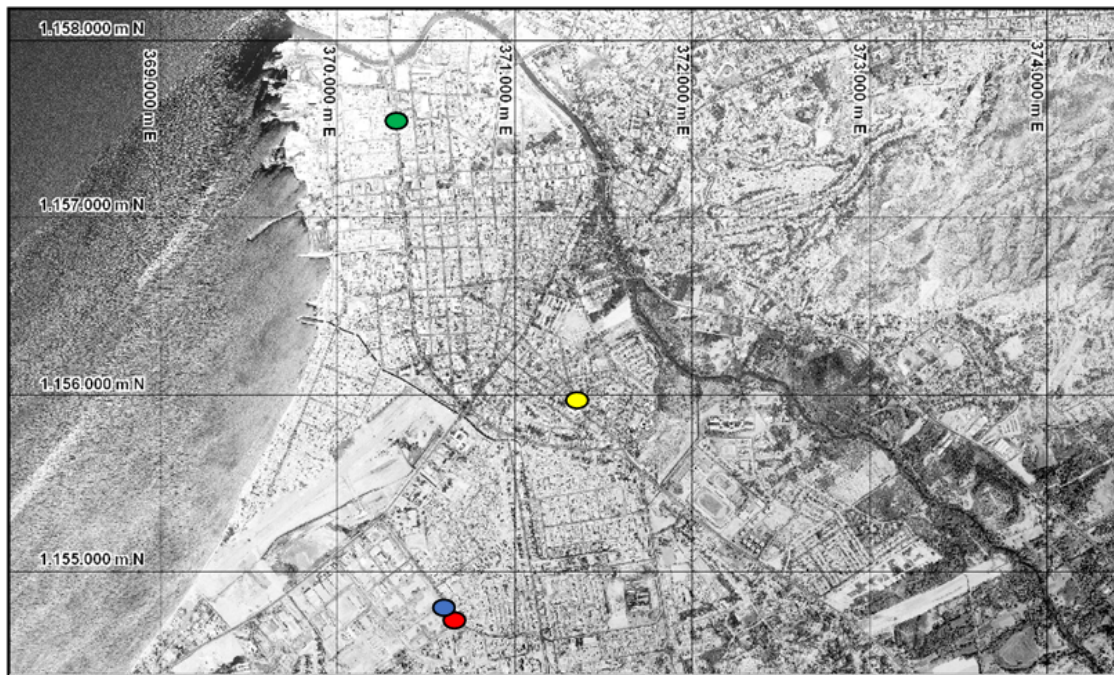


Figura 1: Geoposicionamiento de los autolavados mediante coordenadas UTM PSAD 56 Venezuela ( ● Autolavado A, ● Autolavado B, ● Autolavado C, ● Autolavado D)

### 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<sup>3</sup>/h (para el autolavado A, correspondiente

al martes) y 51,82 m<sup>3</sup>/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 multiplicado por 0,632 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup> (600 L) y 0,634 m<sup>3</sup> (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 I					
	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 I (m <sup>3</sup> /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.

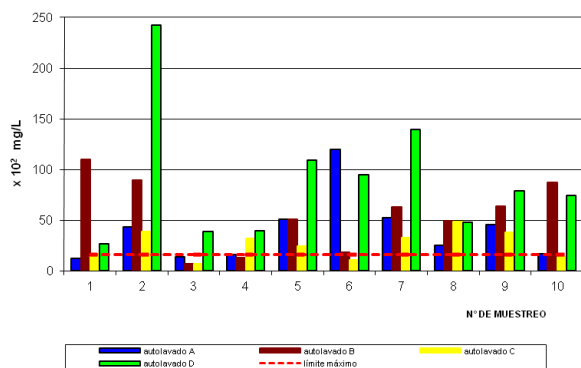


Figura 2: Variación de los sólidos totales (mg/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

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.

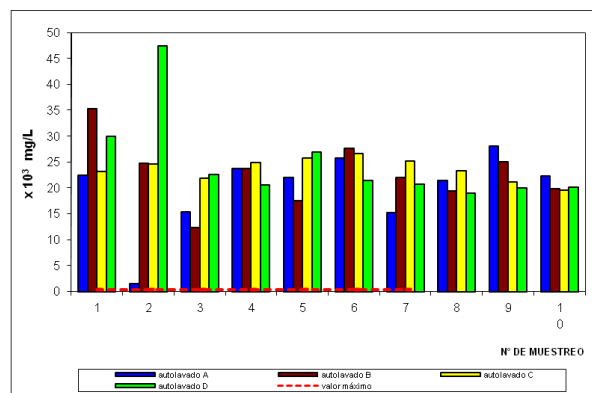


Figura 3: Variación de los sólidos suspendidos totales (mg/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

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  $\mu\text{m}$  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.

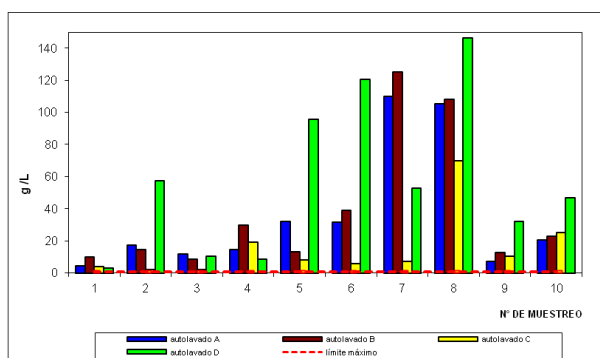


Figura 4: Variación de aceites y grasas (g/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

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<sub>2</sub>/L, y un valor mínimo de 1430,40 mg O<sub>2</sub>/L.

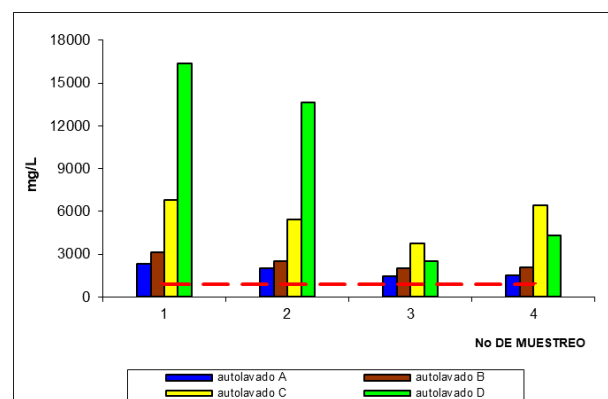


Figura 5: Variación de la demanda química de oxígeno (mg/L) en aguas residuales de los autolavados

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<sub>2</sub>/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<sub>2</sub>/L y un valor mínimo de 558,43 mg O<sub>2</sub>/L DBO<sub>5</sub>. Los altos valores encontrados en la prueba de la DBO<sub>5</sub> 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.

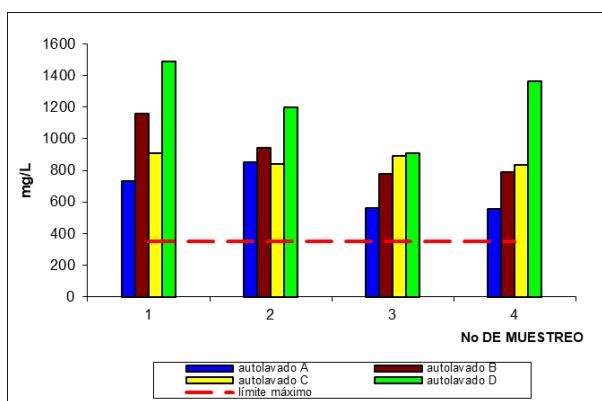


Figura 6: Variación de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

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

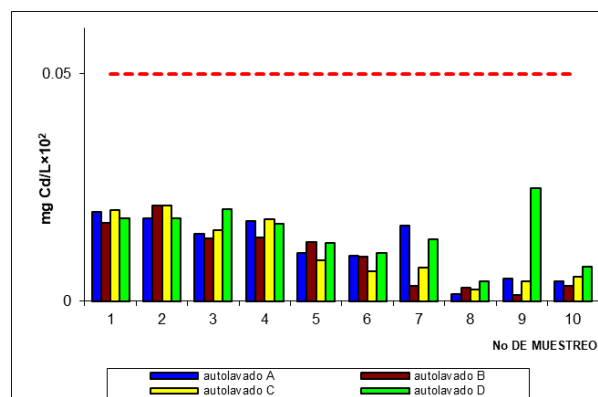


Figura 7: Variación de la concentración de cadmio (mg Cd/L), en aguas residuales de los distintos autolavados

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<sup>®</sup>. El

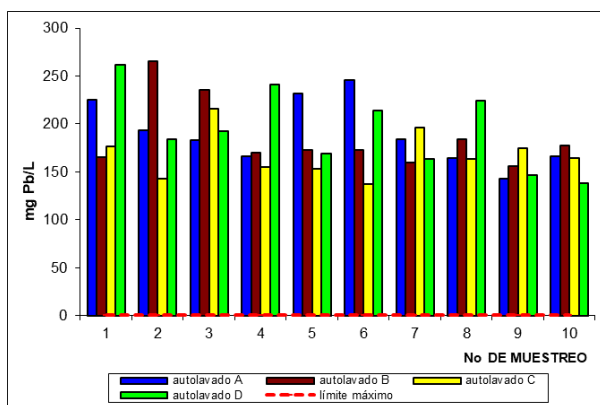


Figura 8: Concentración de plomo total (mg Pb/L) en las aguas residuales de los autolavados

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

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

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

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<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O 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. Balcioglu, 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*, 1<sup>era</sup> 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 N° 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*, 1<sup>era</sup> 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 <sup>a</sup>, Sergio Guerra <sup>a</sup> , Maritza Villalta <sup>\*,a</sup> , Carmelo Torres <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>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 respecto 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.



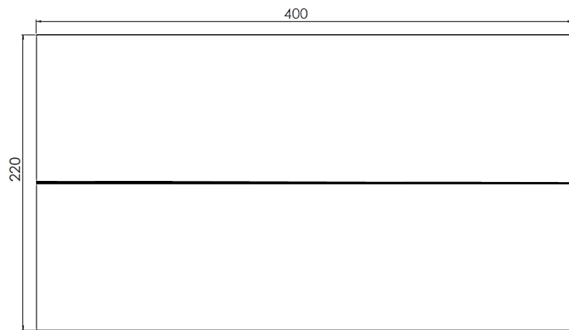


Figura 1: Lámina soldada a utilizar en procedimientos experimentales

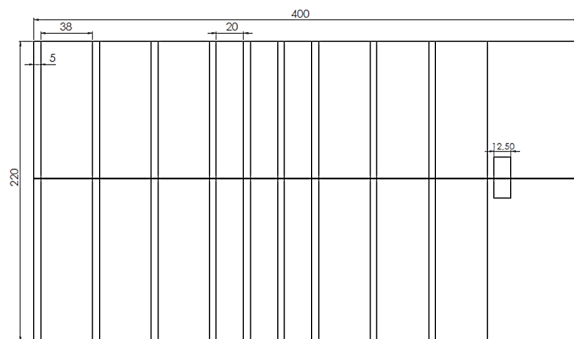


Figura 2: Corte de las láminas para la realización de probetas según la norma ASME sección IX QW-463.1 (a). [9]

#### 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.

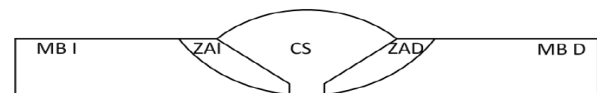


Figura 3: Representación de las zonas donde se realizó la indentación para evaluar la microdureza [12]

#### 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.

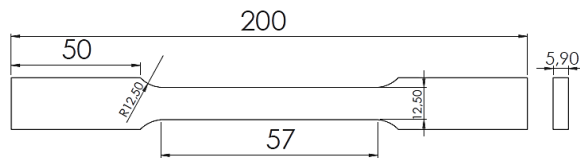


Figura 4: Plano de probeta de tracción según la norma ASTM E-8. [14]

### 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.

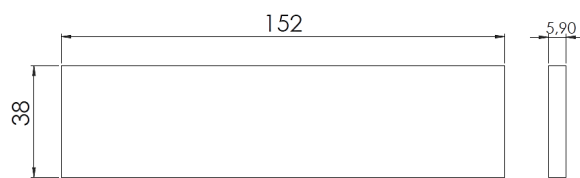


Figura 5: Plano de probeta de doblado, según la norma ASTM E190. [15]

### 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].

$$\sigma_{res} = SY_{PT} - SY_{PTN} \quad (1)$$

$$\sigma_{res} = (-90,7 + 2,876Hv)_{PT} - (-90,7 + 2,876Hv)_{PNT} \quad (2)$$

Los resultados del ensayo de tracción se calcularon a través de las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$\sigma_{res,f} = \sigma_{t,f} - \sigma_{nt,f} \quad (3)$$

$$\sigma_{res,max} = \sigma_{t,max} - \sigma_{nt,max} \quad (4)$$

$$\sigma_{res,R} = \sigma_{t,R} - \sigma_{nt,R} \quad (5)$$

## 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 microfotografías 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 indentaciones 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

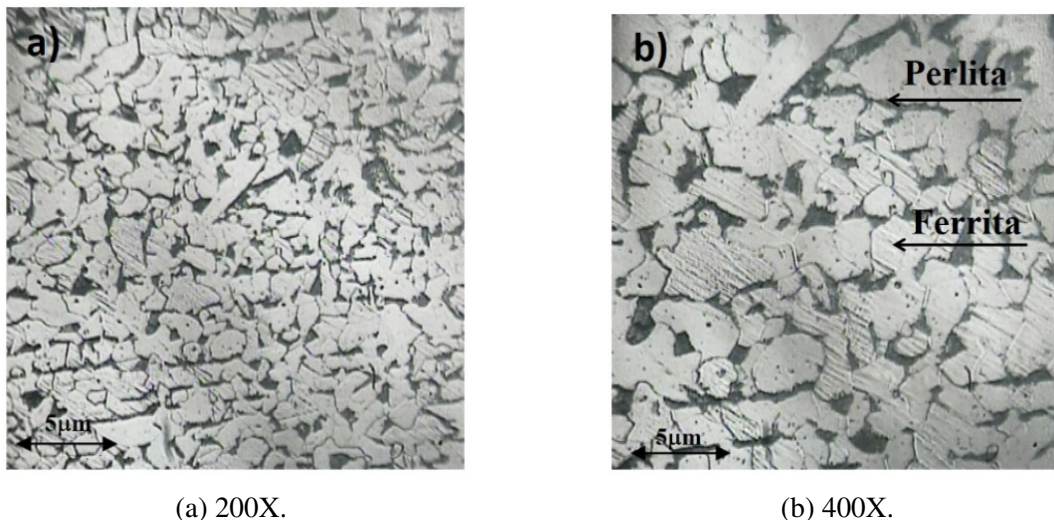


Figura 6: Micrografías de probetas de metal base

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
<b>Promedio</b>	<b>146,6</b>

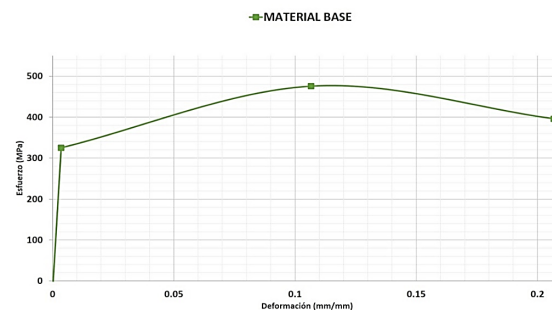


Figura 7: Curva esfuerzo-deformación de metal base

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

### 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

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

### 3.5. 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 puede 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 oscura) 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

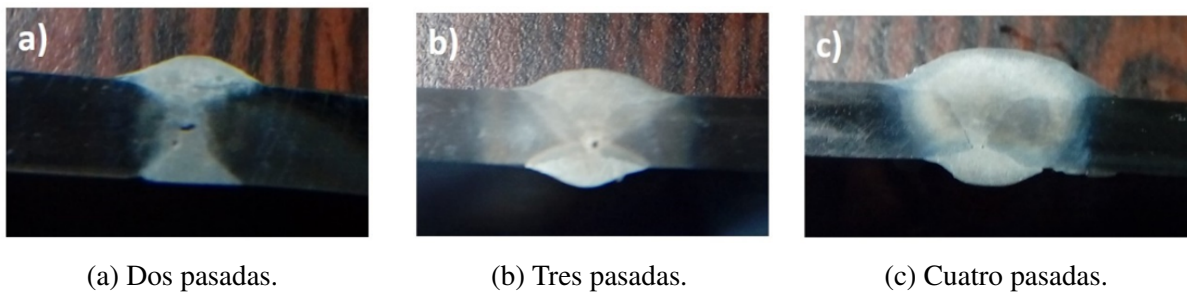


Figura 8: Macroscopía de probeta soldada

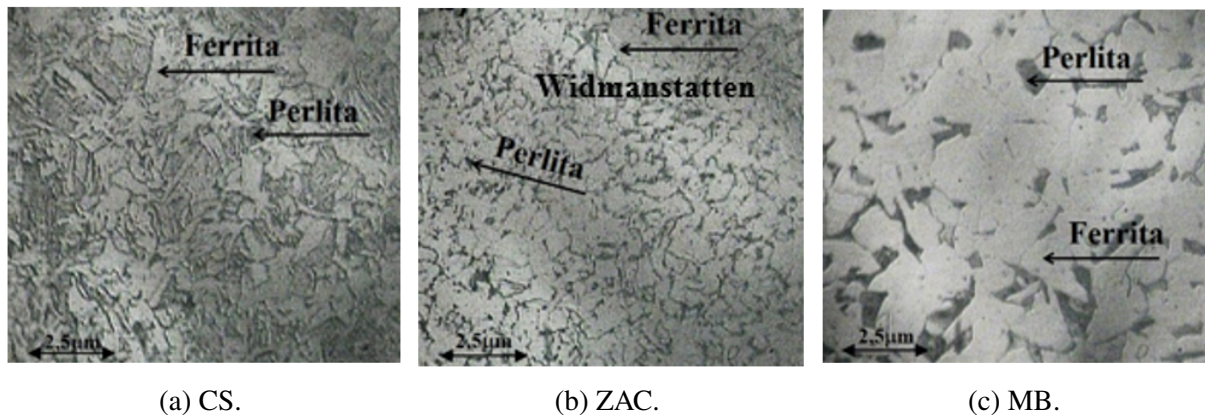


Figura 9: Micrografías de probetas soldadas II cordones a 400X

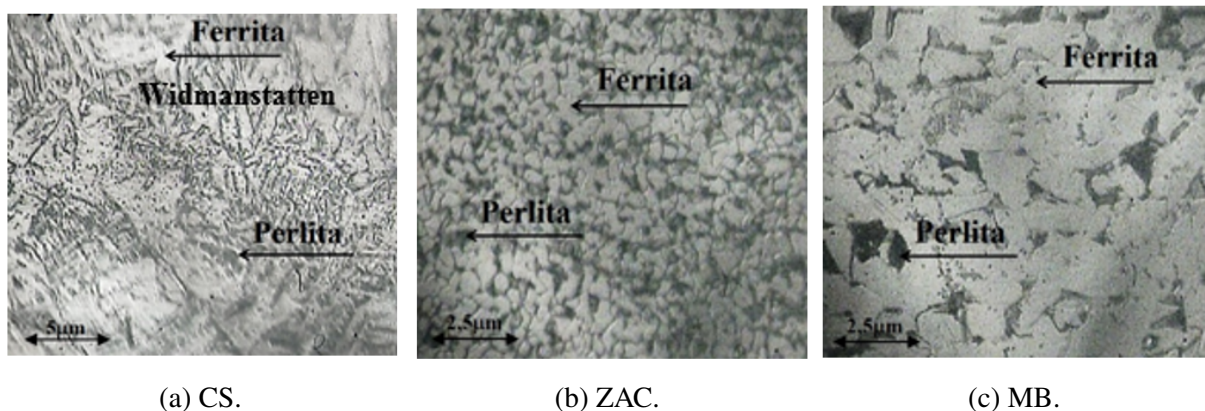


Figura 10: Micrografías de probetas soldadas III cordones a 400X

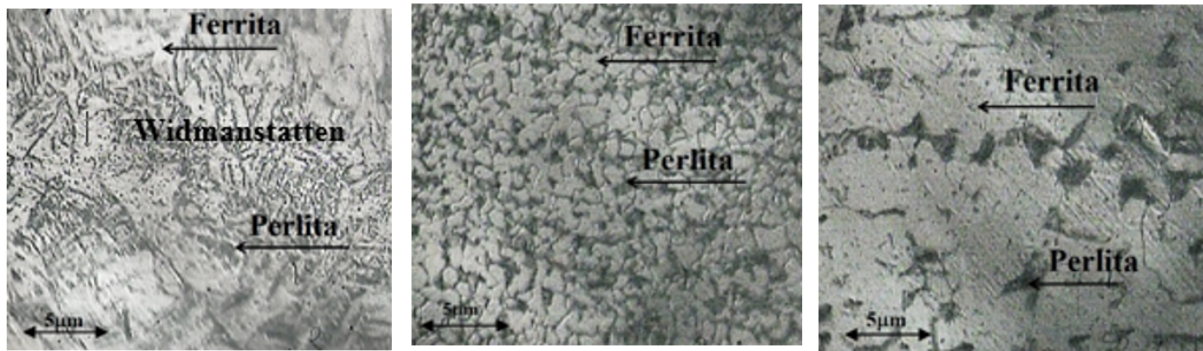
granos ferrítica en su totalidad, además de algunos granos de perlita.

### 3.10. Ensayo de microdureza Vickers

Este ensayo se realizó utilizando una carga de 50grf. Se realizaron seis indentaciones 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

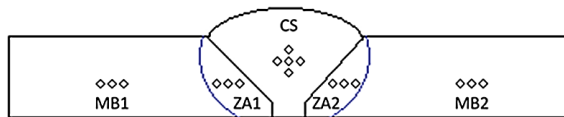


Figura 12: Representación de las zonas donde se realizó la indentación para evaluar la microdureza

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).

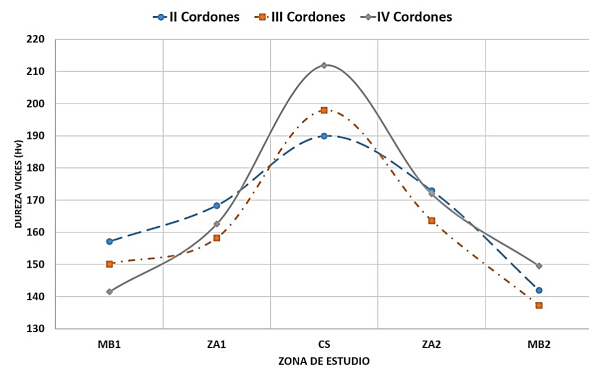


Figura 13: Curva de microdureza de cada cordón de soldadura

### 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

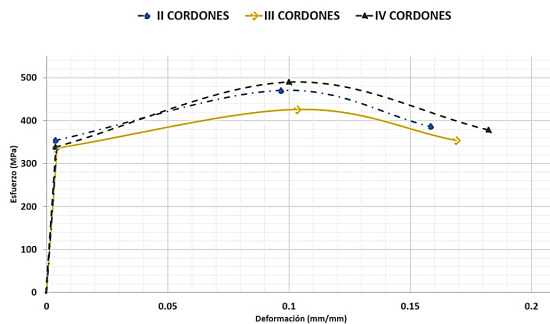


Figura 14: Curvas esfuerzo–deformación valores promedio para condición de soldadura

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

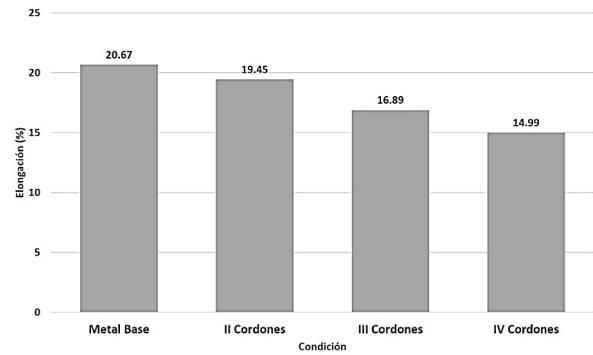


Figura 15: Comparación del % ductilidad de metal base y número de pasadas

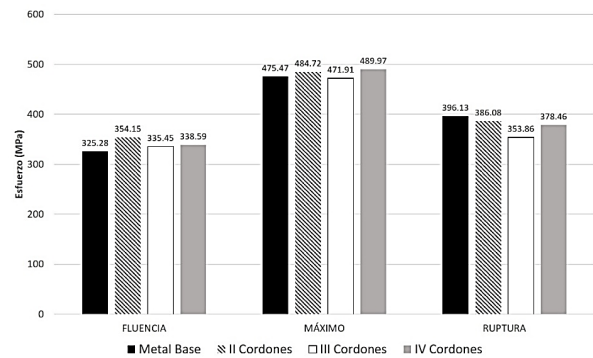


Figura 16: Comparación del esfuerzo de fluencia de metal base y número de pasadas

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 las regiones soldadas.

### 3.13. Esfuerzos residuales

El cálculo de esfuerzos residuales por microdureza 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
$\sigma_{res}$ (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).

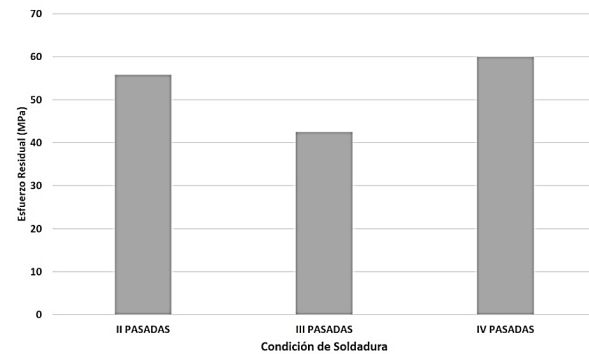


Figura 17: Esfuerzos residuales obtenidos por microdureza Vickers

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

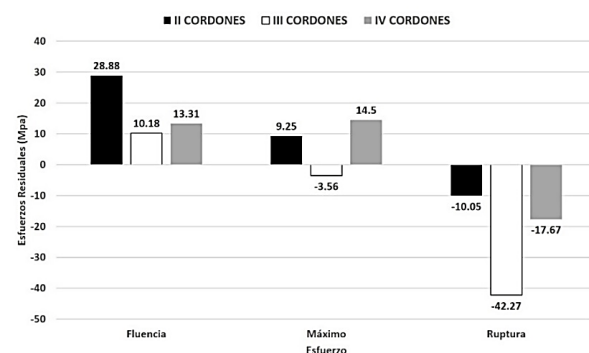


Figura 18: Esfuerzos mecánicos residuales obtenidos mediante el ensayo de tracción



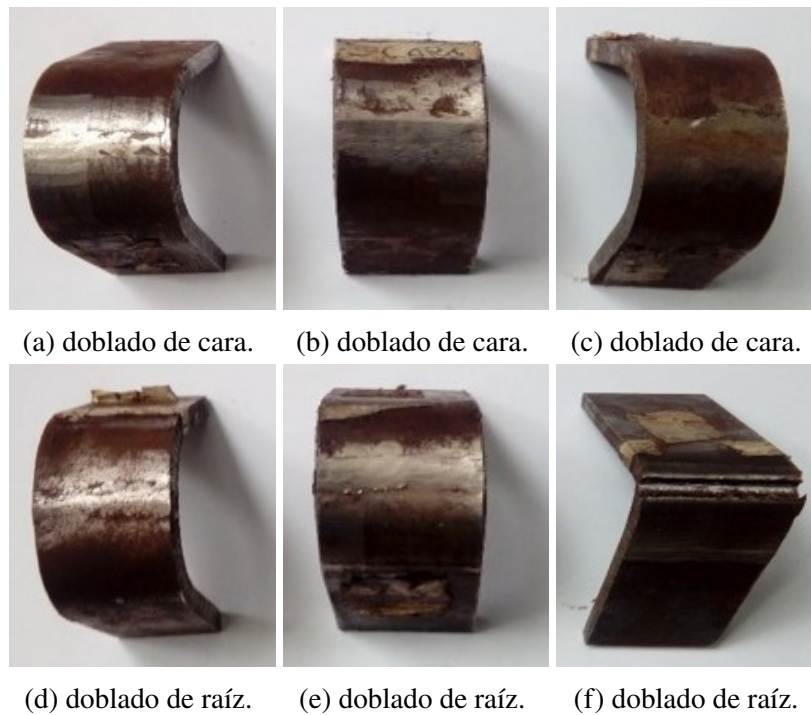


Figura 19: Probetas con 2 cordones de soldadura

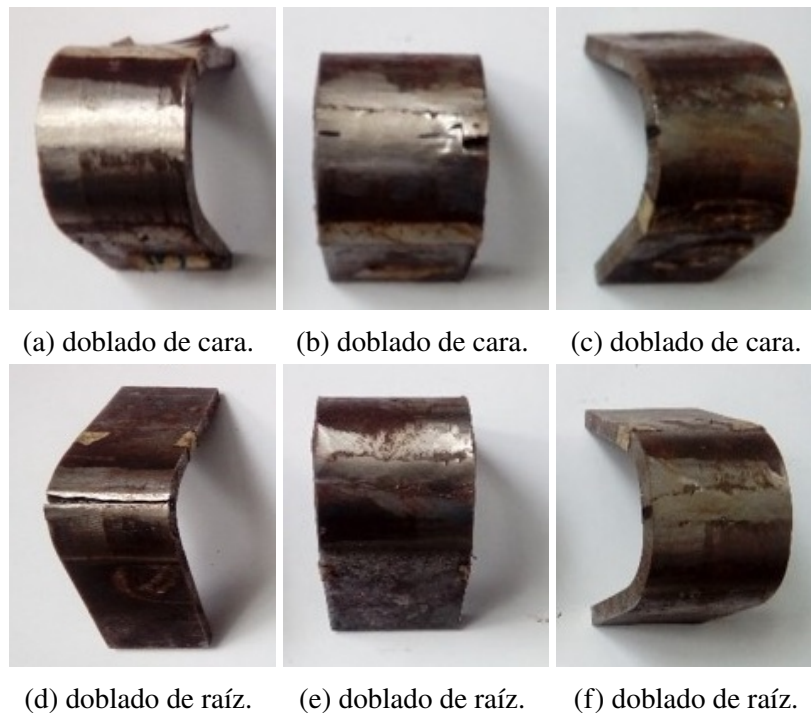


Figura 20: Probetas con 3 cordones de soldadura

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



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 desgarrar 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 <sup>\*a</sup> , G. S. Vasilyev <sup>a</sup> , D. I. Surzhik <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Belgorod State University, Belgorod, Russia

<sup>b</sup>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).

$$\rho(W(j\omega)) < M^{-1} \quad \forall \omega \in (-\infty, \infty), \quad (1)$$

where  $W(j\omega)$  is estimated by equation (2).

$$W(j\omega) = \frac{P(j\omega)K(j\omega)}{(I + P(j\omega)K(j\omega))}, \quad (2)$$

$I$  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).

$$1 + N_2W(p) = 0, \tag{3}$$

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):

$$N_2(\omega) = Re [N_2(\omega)] + jIm [N_2(\omega)] = -\frac{1}{M_2(j\omega)} \tag{4}$$

An arbitrary frequency value  $\omega$  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  $\omega_k$  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  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ . 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:

$$A_{1i}(\omega) = Re [A_i(j\omega)] = \alpha_{4i}\omega^{4i} - \beta_{4i+2}\omega^{4i+2} \tag{7}$$

$$B_{1i}(\omega) = Re [B_i(j\omega)] = \beta_{4i}\omega^{4i} - \beta_{4i+2}\omega^{4i+2} \tag{8}$$

$$A_{2i}(\omega) = Im [A_i(j\omega)] = \alpha_{4i+1}\omega^{4i+1} - \alpha_{4i+3}\omega^{4i+3} \tag{9}$$

$$B_{2i}(\omega) = Im [B_i(j\omega)] = \beta_{4i+1}\omega^{4i+1} - \beta_{4i+3}\omega^{4i+3} \tag{10}$$

Then (6) taking into considering (7), (8), (9), (10) will take the form of equation (11)

$$M_2(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^I [A_{1i}(\omega) + jA_{2i}(\omega)]}{\sum_{i=0}^I [B_{1i}(\omega) + jB_{2i}(\omega)]} = \frac{A_1(\omega) + jA_2(\omega)}{B_1(\omega) + jB_2(\omega)} \quad (11)$$

Substituting (7)-(10) and (11) in (5), we get equation (12).

$$\left( \sum_{i=0}^I \alpha_{4i+1} \omega_k^{4i+1} - \alpha_{4i+3} \omega_k^{4i+3} \right) \cdot \left( \sum_{i=0}^I \beta_{4i} \omega_k^{4i} - \beta_{4i+2} \omega_k^{4i+2} \right) - \left( \sum_{i=0}^I \alpha_{4i+1} \omega_k^{4i+1} - \alpha_{4i+3} \omega_k^{4i+3} \right) \cdot \left( \sum_{i=0}^I \beta_{4i} \omega_k^{4i} - \beta_{4i+2} \omega_k^{4i+2} \right) = 0 \quad (12)$$

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  $\omega_0$  to  $\omega_N$ ,  $N$  is maximum number of the approximation node,  $\Delta_\omega$  is step,  $n$  is current number of the approximation node. The CPLF approximating the polynomial  $f(\omega)$  in the interval  $\omega_0-\omega_N$ , takes the form of the equations (13), (14), (15), (16), (17), (18).

$$f_\Sigma(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n(\omega) Q_n(\omega) \quad (13)$$

$$f_n(\omega) = K_n \omega + L_n \quad (14)$$

$$K_n = \frac{f(\omega_{n+1}) - f(\omega_n)}{\Delta_\omega} \quad (15)$$

$$L_n = f(\omega_n) - K_n \omega_n \quad (16)$$

$$\Delta_\omega = \frac{\omega_N - \omega_0}{N} \quad (17)$$

$$Q_n(\omega) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^1 \sum_{\gamma=0}^1 (-1)^{\lambda+\gamma} |\omega - \omega_n - \gamma \Delta_\omega + \Delta(1 - \lambda)| \quad (18)$$

where  $f_n(\omega)$  is the line approximating  $f(\omega)$  on the section  $\omega_n-\omega_{n+1}$ ,  $K_n$  and  $L_n$  are approximation coefficients,  $Q_n(\omega)$  is inclusion CPLF that forms the approximating segment of a straight line,  $\Delta$  - an arbitrarily small number,  $\lambda$  and  $\gamma$  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  $f_n(\tilde{\omega}_{k n}) = 0$

$$\tilde{\omega}_{k n} = -\frac{L_n}{K_n}. \quad (19)$$

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).

$$\omega_{k n} = \tilde{\omega}_{k n} Q_n(\tilde{\omega}_{k n}) \quad (20)$$

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).

$$N_{2k} = N_2(\omega_k) = -\frac{1}{M_2(j\omega_k)}. \quad (21)$$

$$N_{2k} = -\frac{\left(\sum_{i=0}^I \alpha_{4i} \omega_k^{4i} - \beta_{4i+2} \omega_k^{4i+2}\right) \cdot \left(\sum_{i=0}^I \beta_{4i+2} \omega_k^{4i+2} - \beta_{4i} \omega_k^{4i}\right) \cdot \left(\sum_{i=0}^I \alpha_{4i+1} \omega_k^{4i+1} - \alpha_{4i+3} \omega_k^{4i+3}\right) \cdot \left(\sum_{i=0}^I \beta_{4i+3} \omega_k^{4i+3} - \beta_{4i+1} \omega_k^{4i+1}\right)}{\left(\sum_{i=0}^I \alpha_{4i} \omega_k^{4i} - \beta_{4i+2} \omega_k^{4i+2}\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^I \alpha_{4i+1} \omega_k^{4i+1} - \alpha_{4i+3} \omega_k^{4i+3}\right)^2} \quad (23)$$

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 ( $\alpha_i, \beta_i$ ) 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  $N_2^{low} \leq N_2 \leq N_2^{up}$ . 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

Given the equation (6), we get equation (22).

$$N_{2k} = -\frac{1}{M_2(j\omega_k)} = -\frac{\sum_{i=0}^I \beta_i (j\omega_k)^i}{\sum_{i=0}^I \alpha_i (j\omega_k)^i} \quad (22)$$

According to equation (22), the values are real. Omitting the imaginary co-operator, we write this expression in the form of the equation (23).

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)  $N_2^{low} \leq N_2 \leq N_2^{up}$ .

The stability (instability) of the system when fixed  $N_2 = N_{2k}^*$  determines the stability (instability) of the segment  $N_{2k} \leq N_{2k}^* \leq N_{2k+1}$  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



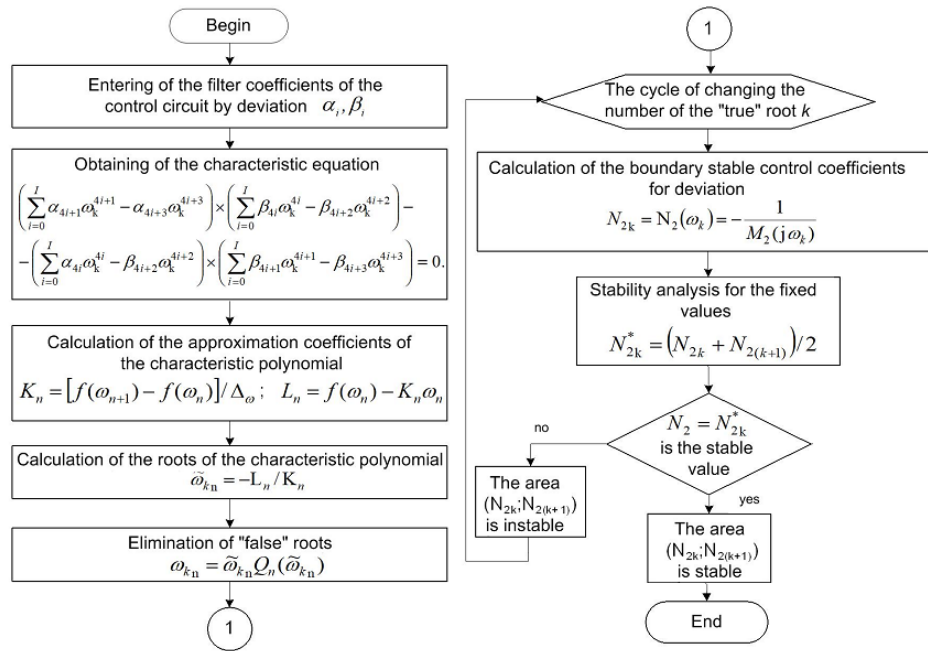


Figure 1: Block diagram of the algorithm for analyzing the parametric stability of mobile agent formations based on the Nyquist criterion and CPLF

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 ( $I = 1 \dots 10$ ), 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):

$$M_2^{LPF}(p) = \frac{1}{(1 + Tp)^I}, \quad (24)$$

$$M_2^{HPF}(p) = \frac{(Tp)^I}{(1 + Tp)^I}, \quad (25)$$

$$M_2^{BPF}(p) = H_{LPF}(p)H_{HPF}(p) = \frac{(\gamma Tp)^{0.5I}}{[(1 + Tp)(1 + \gamma Tp)]^{0.5I}} \quad (26)$$

$$M_2^{NF}(p) = 1 - M_2^{BPF}(p) \quad (27)$$

Here,  $T$  is the time constant of the LPF and HPF link,  $\gamma$  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 HPF (not shown in the figure). For these types of filters, there are no upper boundary values for  $I=1$  and  $I=2$  ( $N_2^{up} \rightarrow \infty$ ), and the formation with the inertial characteristic of the LPF or HPF 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

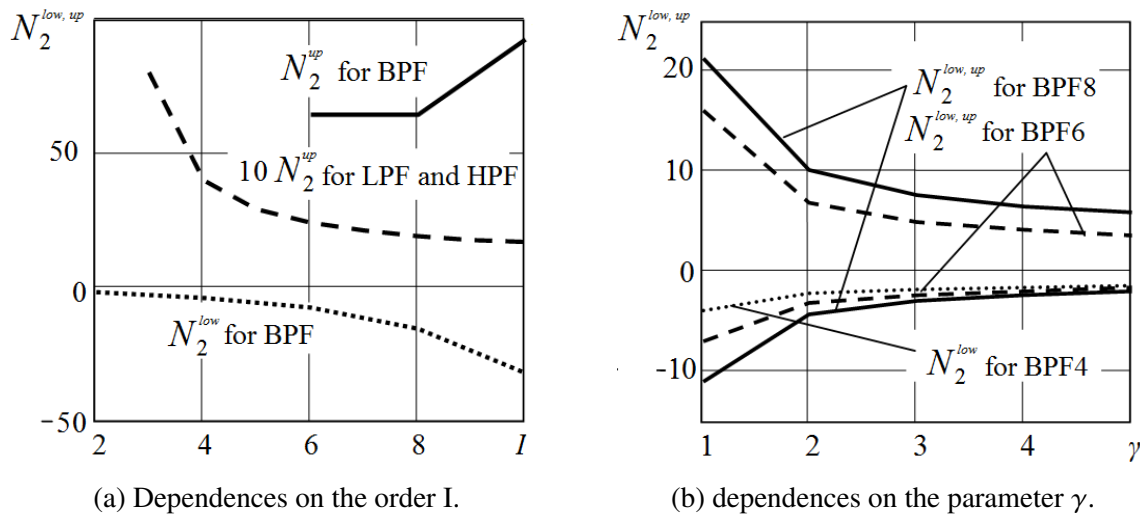


Figure 2: Areas of stability of mobile agent formations with different inertial properties using MATLAB software

(Figure 2a). For values  $I=2$  and  $I=4$ , there is no upper bound ( $N_2^{up} \rightarrow \infty$ ). 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  $\gamma :1-5$  are shown in Figure 2b. As can be seen from the figure, when increasing  $\gamma$  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  $\gamma$ , the approximate value  $N_2^{low} \approx -1$ , and the upper bound is equal to  $N_2^{up} \rightarrow \infty$  (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 Dynamics*, 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, “Encoding 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 quadcopters 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 Conference Control 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 <sup>\*,a</sup> , Yu. A. Zhuravleva <sup>b</sup>, S. A. Mikaeva <sup>b</sup> ,

<sup>a</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education. National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia

<sup>b</sup>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 spectrophotometric 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 gonióforo 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 (GPL). Demostrando que es aconsejable el reemplazo de la lámpara de incandescencia GPL 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:satsf@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 spectroradiometric 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  $T_{cv}$  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- Ж 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

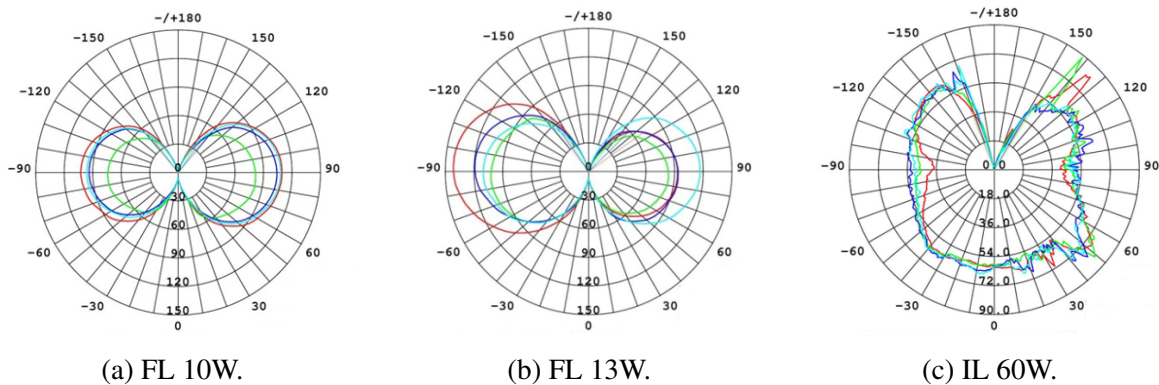


Figure 1: LEDFL and GPN light intensity curves

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

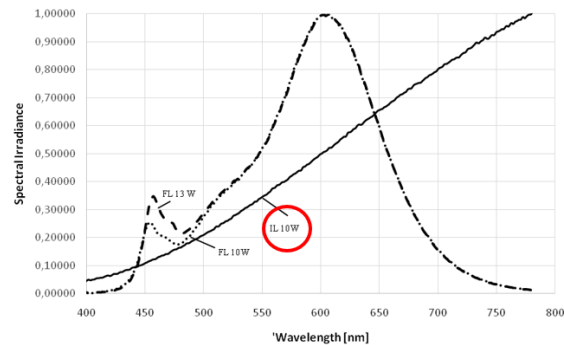


Figure 2: Spectral distribution of the studied lamp radiation

### 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 (DWI) [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. Tuv, "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.

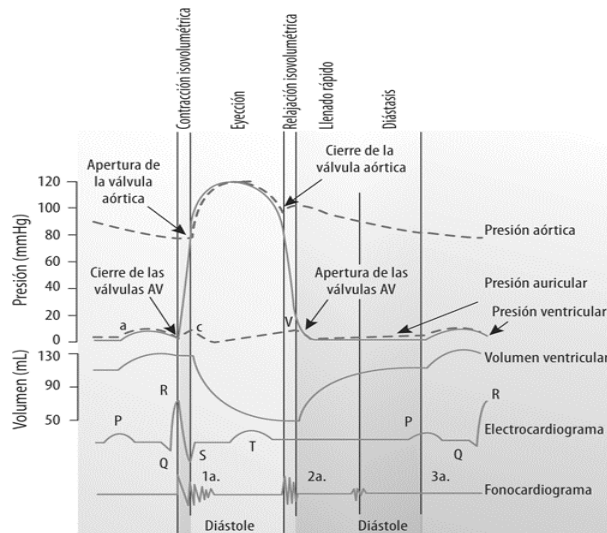


Figura 1: Gráficas de presión, volumen, electrocardiograma y fonocardiograma para el ciclo cardiaco [4]

#### 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 isovolumétrica 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 isovoluméticamente, 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.

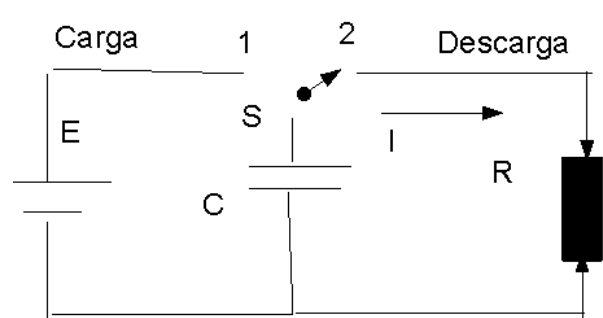


Figura 2: Conexión serie

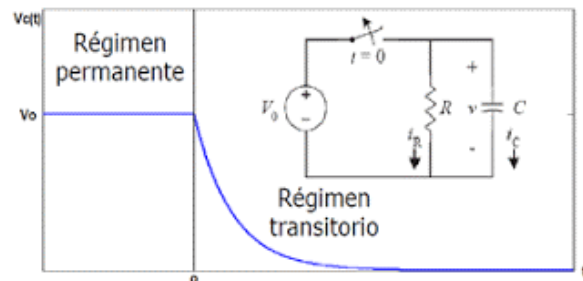


Figura 3: Conexión paralelo

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].

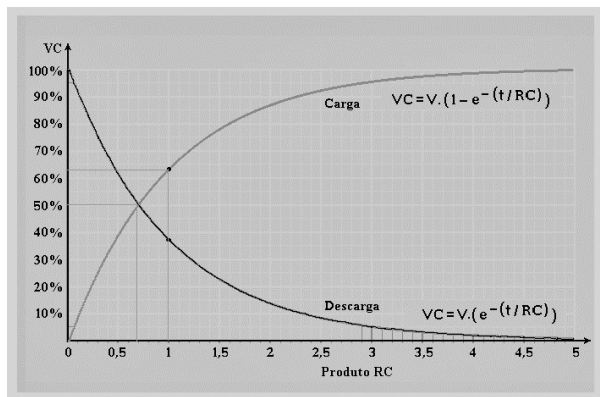


Figura 4: Carga y descarga de un condensador. Conexión serie [4].

### 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  $\tau$  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  $\tau$  [6].

$$v_c = v_0 \cdot e^{\frac{-\tau}{RC}} \quad (1)$$

$$v_c = v_0 \cdot \left( 1 - e^{\frac{-\tau}{RC}} \right) \quad (2)$$

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.

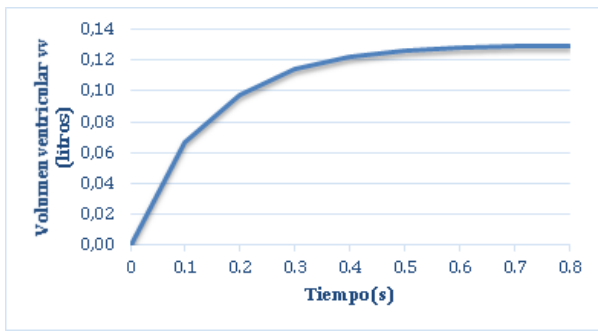


Figura 5: Gráfica de Volumen (proceso de Carga)-contracción isovolumétrica

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

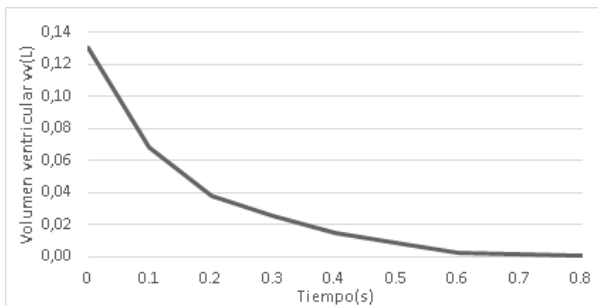


Figura 6: Gráfica de Volumen (proceso de descarga). Eyección rápida

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

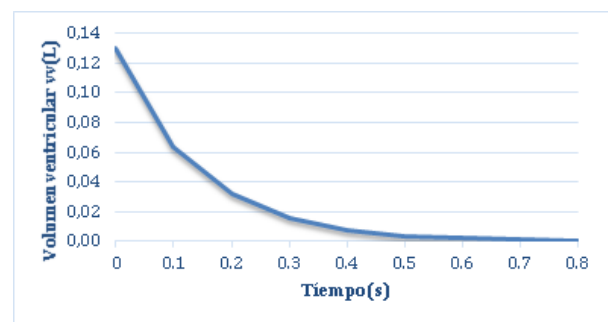


Figura 7: Gráfica de Volumen (proceso de descarga). Relajación isovolumétrica

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

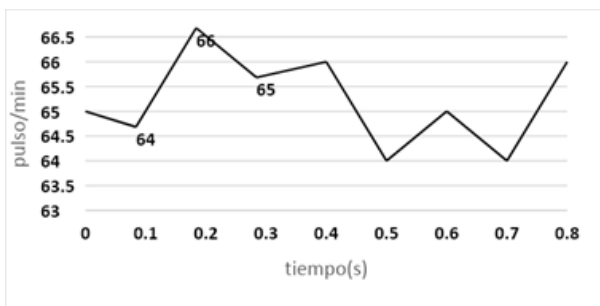


Figura 8: Ritmo cardíaco RS

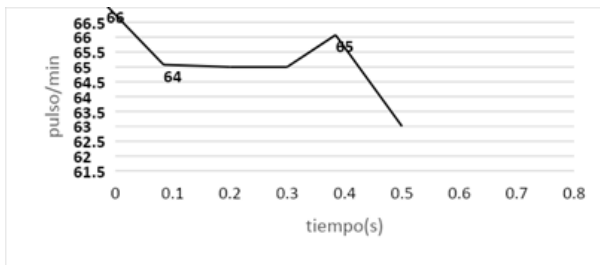


Figura 9: Ritmo cardíaco ST

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.

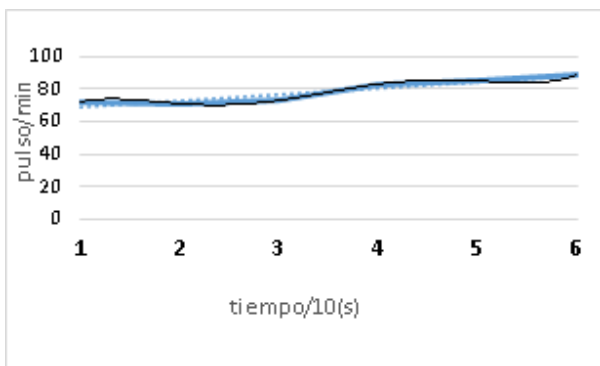


Figura 10: Ritmo cardíaco U

### 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 en 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 (s)	Etapa (pulsos/s)		
		A	B	C
$\bar{x}$	0,4	1,0796	1,2611	1,0833
$\sigma$	0,273	0,016	0,122	0,014
EI	0,1	1	1	1
EE	0,273	0,016	0,122	0,014
$\Delta x$	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
$\Delta Vol$ (%)	—	2,90	3,70	2,92
Uvol (%)	—	2,03	2,35	2,03
$\bar{x}vol$ (L)	—	0,028	0,03	0,101

A: Rápida eyección (sístole/vaciado) (VSF)  
 B: Relajación isovolumétrica (sístole/vaciado) (VSF)  
 C: isovolumétrico (diástole/llenado) (VDF)  
 EI: Error instrumental, EE: Error estadístico  
 $\Delta x$ : Error absoluto  
 UA: Incertidumbre Tipo A, UB: Incertidumbre Tipo B  
 UV: Incertidumbre variable directa  
 $\Delta Vol$ : 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

Etapa	Volumen (mL)	Error (%)	Procesamiento digital		
			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 eyección(sístole/vaciado)(VSF)  
 B: Relajación isovolumetrica(sístole/vaciado) (VSF)  
 C: isovolumétrico(diástole/lleñado) (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 eyección(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

$\chi^2$  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

$\chi^2$  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
			$\chi^2_{cal} = 0,675348$
			$\nu = 8$ $\chi^2_{0,05} = 15,507$

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 explícita 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 Bioingeniería: 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*.

# **Volumen 27 Número 3**

## Editorial

Cerramos un año de grandes cambios y transformaciones, un año que nos ha dejado muchas lecciones y que también nos ha permitido redimensionar muchos aspectos de nuestra vida personal y laboral. Queremos aprovechar la oportunidad de recordar los logros alcanzados como lo fue la incorporación de la Revista Ingeniería UC a DOAJ y REDIB, así como también hacer extensivo nuestro agradecimiento a todo el equipo de Latindex y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por los programas de formación y capacitación de editores para asegurar la calidad y visibilidad de nuestras revistas científicas tanto en el contexto regional como internacional y por último, ratificar una vez más nuestro firme compromiso de continuar siendo el principal órgano de divulgación científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo expandiéndonos cada vez más, para seguir brindando la mayor visibilidad posible de los productos de investigación de gran calidad asociados a las diversas ramas de la ingeniería y ciencias afines.

Abrimos la edición de nuestro Volumen 27, Número 3, presentando el estado del arte desarrollado por Monroy y Pereira con los avances más recientes en lo referente al diseño de nanoemulsiones, resaltando el interés científico-tecnológico vinculados con los avances y desarrollos sobre nanotecnología cosmética, producción y tendencias de uso.

En segundo lugar, Scotti y su grupo realizan la caracterización de un extracto de semillas de parchita (*Passiflora edulis*), estudio que resalta su importancia por su potencial como agente antimicrobiano y antioxidante para su incorporación en elaboración y producción de hidrogel.

Por otro lado, Parvizi y colaboradores proponen un circuito sumador completo de baja potencia y alta velocidad, que utiliza una nueva familia lógica de dominó CMOS basada en elementos de unión de túnel magnético (UTM) y memristor en la técnica de entrada de difusión de puerta (GDI).

Fooladvand, Abbasian y Baghban muestran que se podría obtener una simplificación importante mediante el diseño de circuitos integrados basados en CNTFET a través de una configuración lógica de transistor de paso tipo CMOS en el uso de transistores de efecto de campo, en lugar de la configuración tradicional de semiconductores de óxido de metal complementario (CMOS).

Así, Viera junto a su grupo de investigación, determina las características físico-mecánicas de los fardos de paja producidos en Ecuador, para definir su posible uso en la construcción de viviendas sismorresistentes. Mientras que, Vásquez-Ramírez y colaboradores estimaron la eficiencia de captación de agua contenida en la niebla y neblina en una zona de las alturas de la sierra norte del Perú, utilizando atrapanieblas con diseño bidimensional, construidas con tres tipos de mallas, fundamentando así la implementación de este tipo de captación de agua no convencional en la zonas rurales altoandinas con déficit de agua para uso múltiple.

Díaz-Salas, Guevara-Pérez y Rosales-Cueva establecen un modelo novedoso para determinar el coeficiente de rugosidad ( $n$ ), en un sector montañoso del río Santa en el departamento de Ancash, Perú. Por otro parte, Duarte-González estudia las relaciones de orden físico-matemático que rigen la conductividad eléctrica y la hidrodinámica en suelos porosos, involucrada en los sistemas de riego agrícola y también en sistemas de puesta a tierra (SPAT).

Hasanvandian y colaboradores evalúan el nivel de desarrollo de las aldeas en la provincia de Lorestan utilizando el método de taxonomía numérica. Mientras que Kuzichkin y su grupo presentan la medición de las coordenadas angulares en los sistemas de posicionamiento de Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) desarrollando un nuevo método fase-métrico para el control goniométrico de los VANT.

Para cerrar el número, Franco-Camacho y su grupo de investigación abordan el diseño de un sistema de suspensión para un vehículo BAJA SAE bajo los Parámetros SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices).

Cerramos este editorial, expresándoles nuestros mejores deseos para el año 2021 e 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. Recent advances in nanoemulsions design: concepts and trends across nanocosmetics

Ruth Monroy , Juan Pereira\* 

*Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y derivados (PHD), Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología FACYT, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela*

**Abstract.-** The cosmetic industry has boomed in recent years as one of the markets with enormous growth potential. Cosmetic products that contain nanoemulsions, as carriers of active compounds, can move through the stratum corneum, promoting the release of active ingredients into the dermis. The lipophilic active ingredients that are most interesting in skin care are: vitamin E, lycopene, carotenoids, polyphenols, or coenzyme Q-10 or simply non-alcoholic fragrances. The small size of the dispersed phase droplets is another important factor that confers important physicochemical and biological characteristics. It prevents flocculation and coalescence of nanoemulsions, and the Brownian movements are sufficient to overcome the sedimentation of the droplets by gravity. Additionally, the reduced droplet size also provides better skin deposition and penetration of nanoemulsions, enabling efficient delivery of active ingredients compared to conventional vehicles. This review highlights some of the most important scientific-technological contributions, a documentary review on the methods of making nanoemulsions, both high energy and low energy, their advances and outstanding developments in the area currently.

**Keywords:** nanoemulsions; PIT; PIC; dermal delivery; transdermal delivery; spontaneous emulsion.

### *Estado del arte. Avances recientes en el diseño de nanoemulsiones: conceptos y tendencias sobre nanocosméticos*

**Resumen.-** La industria cosmética ha experimentado un auge en los últimos años como uno de los mercados que tiene un enorme potencial de crecimiento. Los productos cosméticos que contienen nanoemulsiones (NE), como portadores de compuestos activos, pueden moverse a través del estrato córneo, promoviendo la liberación de activos hacia la dermis. Los ingredientes activos lipofílicos que presentan mayor interés en el cuidado de la piel son: la vitamina E, el licopeno, carotenoides, los polifenoles, o coenzima Q-10 o simplemente las fragancias no alcohólicas. El pequeño tamaño de las gotas de la fase dispersa es otro factor que confiere características fisicoquímicas y biológicas importantes. Impide la floculación y la coalescencia de las nanoemulsiones, y los movimientos brownianos son suficientes para superar la sedimentación de las gotas por gravedad. Además, el tamaño reducido de las gotas también proporciona una mejor deposición sobre la piel y penetración, lo que permite una entrega eficiente de ingredientes activos en comparación con los vehículos convencionales. En esta revisión se destacan algunas contribuciones científicas-tecnológicas importantes, se presenta una revisión documental sobre los métodos de elaboración de nanoemulsiones, tanto de alta energía como de baja energía, así como los avances y desarrollos resaltantes sobre nanocosméticos.

**Palabras clave:** nanoemulsiones; PIT (Por sus siglas en inglés, temperatura de inversión de fase); PIC (Por sus siglas en inglés, composición de inversión de fase); administración transdérmica; emulsión espontánea.

Recibido: 28 de agosto, 2020.

Aceptado: 26 de noviembre, 2020.

#### 1. Introducción

Las nanoemulsiones son un sistema prometedor para el uso cosmético debido a varias ventajas sobre

otras tecnologías (como emulsiones, liposomas y microemulsiones, espumas, geles, dispersiones, etc.), incluida la facilidad de fabricación, tamaños de partículas controlables, alta estabilidad cinética y niveles de tensioactivos relativamente bajos [1, 2, 3]. La eficacia de los productos cosméticos depende de sus propiedades de textura y de su capacidad para transportar ingredientes activos y funcionales. Los componentes lipofílicos, hidrofílicos y

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: juanpereira73@gmail.com (J. Pereira)

anfílicos se pueden incorporar fácilmente en las nanoemulsiones porque contienen aceite, agua y regiones interfaciales de gran área. La aplicación tópica de nanoemulsiones en la piel proporciona una formación uniforme de una película lipídica delgada, lo que permite un mayor rendimiento y biodisponibilidad [4].

Las nanoemulsiones (gotas de tamaño submicro-métrico), también referidas como mini emulsiones [5, 6], son sistemas atractivos para uso en la industria cosmética, farmacéutica, alimentaria y otras, debido a sus propiedades tales como su baja cantidad de surfactante, falta de toxicidad o características irritantes, baja viscosidad, buena apariencia y versatilidad de formulación como espumas, cremas, líquidos y aerosoles.

Las nanoemulsiones son una clase de emulsiones con un tamaño de gota entre 20 y 500 nm [7]. Sus gotas están estabilizadas por surfactantes. Sus propiedades dependen no solo de las condiciones termodinámicas, sino también de los métodos de preparación y el orden de adición de los componentes [8, 9]. Los diferentes rangos de tamaño para las nanoemulsiones encontradas en la literatura, se establecen, generalmente, según criterios basados en propiedades ópticas, ya que no hay un cambio drástico en las propiedades fisicoquímicas cuando el tamaño de las gotas de la emulsión disminuye de micrómetros a la escala de nanómetros [10].

## 2. Generalidades de las emulsiones

### 2.1. Estabilidad de las emulsiones

Las emulsiones en general, incluyendo las nanoemulsiones, presentan inestabilidad termodinámica debido al hecho de que la energía libre  $\Delta G_f$  asociada con su formación es mayor que cero. Este cambio de energía libre se debe principalmente al aumento del contacto entre los dos líquidos inmiscibles:  $\Delta G_f = \Delta A\gamma$ , donde  $\Delta A$  es el incremento del área interfacial y  $\gamma$  es la tensión interfacial. Por lo tanto, el área interfacial tiene una tendencia a disminuir espontáneamente, favoreciendo así la floculación y coalescencia de las gotas. Por otro lado, una vez formadas, las nanoemulsiones tienden a tener muy buena

estabilidad cinética, porque su pequeño tamaño de gota reduce la tasa de separación gravitacional y la agregación de gotas [11].

Aunque las nanoemulsiones son estables a la sedimentación o la formación de crema (el movimiento browniano supera la gravedad debido al tamaño pequeño), pueden experimentar floculación, coalescencia y/o maduración de Ostwald, este último es el principal proceso de descomposición de las nanoemulsiones [12, 13].

La maduración de Ostwald consiste en la difusión de moléculas de la fase dispersa desde pequeñas a grandes gotas, a través de la fase continua, como consecuencia de sus diferentes presiones de Laplace. Sin embargo, con la selección apropiada de componentes del sistema, composición y método de preparación, se pueden lograr nanoemulsiones con alta estabilidad cinética. Las nanoemulsiones, al ser emulsiones (sistemas termodinámicamente inestables), requieren un aporte de energía para su formación, que puede ser externa (métodos de dispersión o de alta energía) o interna (métodos de condensación o de baja energía) [14].

Las nanoemulsiones son sistemas particularmente atractivos para su aplicación en cuidado personal y cosméticos así como en el cuidado de la salud debido a las siguientes ventajas [15]:

- El tamaño de gota muy pequeño causa una gran reducción en la fuerza de gravedad y el movimiento browniano puede ser suficiente para superar la gravedad. Esto significa que no se produce cremosidad ni sedimentación durante el almacenamiento.
- El pequeño tamaño de gota también evita cualquier floculación de las gotas y esto permite que el sistema permanezca disperso sin separación de las fases.
- El pequeño tamaño de las gotas también evita su fusión, ya que estas gotas son no deformables y, por lo tanto, se evitan las fluctuaciones de la superficie. Además, el espesor significativo de la película de tensioactivo (en relación con el radio de la

gota) evita el adelgazamiento o la interrupción de la película líquida entre las gotas.

- Las nanoemulsiones son adecuadas para la administración eficiente de ingredientes activos a través de la piel. La gran superficie del sistema de emulsión permite una rápida penetración de los activos.
- La naturaleza transparente del sistema, su fluidez (a concentraciones razonables de aceite), así como la ausencia de espesantes, pueden darles un carácter estético agradable y sensación en la piel.
- A diferencia de las microemulsiones (que requieren una alta concentración de tensioactivo, generalmente en la región del 20 % m/m o más), las nanoemulsiones se pueden preparar utilizando concentraciones razonables de tensioactivo. Para una nanoemulsión de 20 % m/m aceite en agua (O/W) en inglés Oil in Water, puede ser suficiente una concentración de surfactante en la región de 5 a 10 % m/m.
- El pequeño tamaño de las gotas les permite depositarse uniformemente sobre sustratos; la humectación, la dispersión y la penetración también pueden mejorarse debido a la baja tensión superficial de todo el sistema y la baja tensión interfacial de las gotas (O/W).
- Las nanoemulsiones pueden ser empleadas en la encapsulación de fragancias, al ser incorporadas en productos de cuidado personal, para su posterior liberación durante la aplicación del producto utilizado. Esto también podría aplicarse en la formulación de perfumes sin alcohol.
- Las nanoemulsiones se pueden aplicar como sustitutos de los liposomas y las vesículas (que son mucho menos estables) y en algunos casos es posible construir fases cristalinas líquidas lamelares alrededor de las gotas de nanoemulsión.

Estas características mencionadas, tamaño de gota extremadamente pequeño, baja cantidad de

surfactante, baja toxicidad y viscosidad, las hacen atractivas y una excelente opción para aumentar la efectividad dérmica y transdérmica, debido a la transferencia rápida de principios activos a través de la piel, de los ingredientes activos utilizados en la industria cosmética y cosmeceutica.

Cuando hablamos de cosméticos nos referimos a los artículos destinados a ser frotados, vertidos, rociados, introducidos o aplicados al cuerpo humano para limpiar, embellecer, promover el atractivo o alterar la apariencia. Por ejemplo, humectantes para la piel, perfumes, barras de labios, esmaltes de uñas, preparaciones de maquillaje facial y para ojos, champús limpiadores, ondas permanentes, tintes para el cabello y desodorantes, así como cualquier sustancia destinada a ser utilizada como componente del producto cosmético. Así lo define la Ley Federal de Alimentos, Medicamentos y Cosméticos (Ley FD&C) [16].

En este artículo, además de las nanoemulsiones en cosméticos, también se incluyen los productos cosmeceuticos, los cuales fueron definidos por Kligman como, una clase de productos con acción intermedia entre productos cosméticos y productos farmacéuticos. Por lo tanto, los cosmeceuticos no son una clase restringida al adorno, sino como productos tópicos que promueven cambios tanto estructurales como funcionales en la piel, las membranas mucosas y sus uniones sin reclamo terapéutico, pero con posible acción preventiva [16, 17].

## 2.2. Diferencia entre nanoemulsión y microemulsión

Cuando se habla sobre nanoemulsión, es importante aclarar una confusión que a menudo se puede presentar entre lo que son las nanoemulsiones y microemulsiones [11].

Tanto las microemulsiones como las nanoemulsiones son sistemas coloidales que resultan de la dispersión de dos líquidos inmiscibles, y el sistema disperso formado presenta gotas finas con tamaños por debajo de 100 y 200 nm, respectivamente [18, 19]. Pero ambas poseen el mismo aspecto macroscópico (transparente o translúcido) [20] (Figura 1). En algunos casos, la estructura y morfología de las microemulsiones puede ser muy



(a) microemulsión



(b) nanoemulsión

Figura 1: Imagen de una microemulsión y una nanoemulsión, ambas constituidas por un surfactante no iónico, cosurfactantes, agua y aceite mineral, formuladas para uso cosmético

cercana a las nanoemulsiones, es decir, cuando se trata de microemulsiones aceite en agua (O/W) o agua en aceite (W/O) en forma de micelas esféricas hinchadas, como las describió Schulman y colaboradores [21].

Schulman y colaboradores [21] también encontraron que las principales características de las microemulsiones en comparación con las soluciones micelares no sólo eran la hinchazón excesiva y la baja curvatura (asociada con la baja tensión), sino también la presencia de una estructura de interconexión entre las gotas. Al intentar diluir estos sistemas, encontraron que la estructura de la microemulsión se ve ampliamente afectada, perdiendo así sus características originales, mientras que en las nanoemulsiones no hay una afectación en el tamaño de las gotas, ni en la distribución del tamaño de estas [22, 23, 24].

Una diferencia importante entre las microemulsiones y las nanoemulsiones, es su estabilidad termodinámica. Como casi todos los sistemas emulsionados, existen en un estado termodinámico metaestable, en lugar de en el estado con la energía libre más baja. Sin embargo, debido al pequeño tamaño de las gotas (que reduce la separación gravitacional y la agregación de las gotas), el proceso principal que induce su desestabilización es la maduración de Ostwald.

Este factor da como resultado la estabilidad de las nanoemulsiones durante meses e incluso más si los aditivos específicos (inhibidores de la maduración) ralentizan la transferencia de aceite entre gotas. Por otro lado, las microemulsiones son sistemas estables desde un punto de vista termodinámico. Se forman como resultado del equilibrio entre aceite, agua y tensioactivos, es decir, se mezclan todas las fases de manera homogénea, sea cual sea el orden de introducción, y la mezcla se sella y se pone a temperatura constante hasta alcanzar el equilibrio [11].

Ambos sistemas poseen distinta cantidad de tensioactivo. Generalmente las microemulsiones poseen un contenido de surfactante superior al 20 %, lo que permite su formación espontánea [20], mientras que las nanoemulsiones están constituidas por una menor cantidad de tensioactivos (entre el 3 % y el 10 %) [25].

### 3. Fabricación de nanoemulsiones

Desarrollar productos seguros, estables, eficientes y atractivos, con un beneficio de costo óptimo para los consumidores, siempre es un desafío para la industria cosmética. Los aspectos de seguridad y medioambientales, la productividad y la calidad deben considerarse muy temprano en el proceso de desarrollo de nuevos productos [4].



Las nanoemulsiones ofrecen una gran versatilidad, incluida la selección del proceso de fabricación y la selección de compuestos, como tensioactivos, lípidos e ingredientes activos [26].

La selección de un proceso apropiado para un sistema en particular depende de la capacidad de ampliación (facilidad de escalar a un nivel industrial de mayor capacidad de producción), reproducibilidad y optimización del tiempo de fabricación.

La elección del método más apropiado depende principalmente de la composición del sistema y / o los requisitos de ampliación [4].

En cosmética, las nanoemulsiones se pueden obtener mediante procesos de alta o baja energía (respectivamente, entrada de energía externa e interna) [4].

### 3.1. Métodos de alta energía

Se puede utilizar una amplia gama de métodos de emulsión para producir nanoemulsiones, la homogeneización de alto flujo (es decir, alta energía) proporciona una ruta simple para formar gotas a nanoescala en las que la cizalladura aplicada externamente y / o el flujo elongacional superan las tensiones viscosas internas e internas para romper las gotas más grandes en gotas más pequeñas, los ejemplos incluyen homogeneización microfluidica a alta presión [27] y emulsión ultrasónica [28].

En la homogeneización a alta presión, la presión de operación es de hasta 150 MPa para producir nanoemulsiones con gotas de menor tamaño. Este método tiene la ventaja de una fácil escalabilidad en la producción industrial [16, 29].

La técnica de emulsión de membrana directa, en la cual se emplean membranas de vidrio poroso Shirasu<sup>®</sup> estándar, se usa para preparar nanoemulsiones con un tamaño uniforme. En este método, la fase dispersa es forzada a través de la membrana hacia la fase continua [16, 30].

La emulsión ultrasónica, también conocida como emulsión acústica, es un método de alta energía que utiliza ondas de sonido en una frecuencia superior a 20 kHz. Este método da como resultado nanoemulsiones con bajo tamaño y baja polidispersidad, además de ser rápido [16].

La microfluidización es un método de homogeneización de alta energía que es aplicable en las operaciones de la industria, debido al control flexible del tamaño de gota de la emulsión, que proporciona, y a su capacidad de producir emulsiones finas a partir de una amplia diversidad de materiales como vitaminas, lípidos bioactivos, drogas, antioxidantes y sabores [27].

En la industria cosmética se utilizan varios dispositivos de homogeneización industriales de alta presión diferentes como: GEA Niro-Soavi Spa (GEA Niro-Soavi Spa, Parma, Italia) de L'Oreal [31, 32] O Boticario [33] y Microfluidizador de Microfluidics Corp. (Newton, Massachusetts, Estados Unidos) por Shiseido [34].

#### 3.1.1. Proceso y componentes para la formación de nanoemulsiones a alta energía

La fabricación de nanoemulsiones generalmente se realiza en dos pasos y, a veces, en tres pasos, con un paso de dilución adicional para aumentar la productividad o funcionalizar el producto.

La Figura 2 muestra que el primer paso para preparar una nanoemulsión O/W mediante un método de alta energía es preparar una macroemulsión O/W, que generalmente se logra mezclando aceite, agua y surfactante en un sistema de agitación por lotes simple, usando una herramienta de corte clásica (por ejemplo, un rotor o mezclador), para un período de tiempo suficiente [4].

En el segundo paso, la macroemulsión se convierte en una nanoemulsión. A través de un homogeneizador, una bomba de alta presión empuja la macroemulsión a través de un espacio estrecho (la altura del espacio es del orden de unas pocas micras), donde las gotas grandes se rompen en gotas más pequeñas, cuando se someten a un esfuerzo de cizallamiento y alargamiento extremo. El proceso de homogeneización se repite típicamente varias veces (denominado número de pasadas) hasta que el tamaño de la gota se vuelve constante. En un ultrasonicador, las ondas de choque de alta energía crean turbulencia (debido a la cavitación) que rompe las gotas, hasta que el tamaño de las mismas se vuelve constante [35, 36, 37, 38, 39].

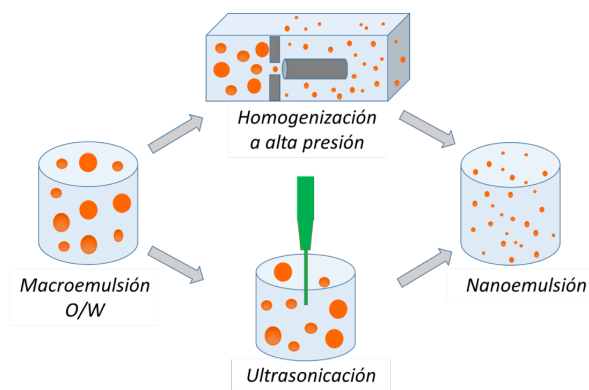


Figura 2: Descripción general del método de alta energía para preparar nanoemulsión O/W. La alta energía, como la homogeneización a alta presión (HPH) y la ultrasonificación, rompen las gotas de microemulsión en gotas más pequeñas. Modificado de [35]

### 3.1.2. Parámetros de formulación

**Aceites:** se puede usar una gran variedad de aceites en cosméticos dependiendo de los beneficios específicos: emolencia y sensación de riqueza, solubilización activa y biodisponibilidad, desmaquillante, volatilidad, sensación de luz, brillo, etc. Algunos de los aceites utilizados para preparar nanoemulsiones cosméticas son: aceite de aguacate, miristato de isopropilo, isododecano, isohexadecano, vaselina, etc. [4].

**Poliolios:** los polioles son ingredientes clásicos en cosmética, donde se usan como humectantes, potenciadores de la penetración para ingredientes activos, solventes, etc. También pueden verse como colaboradores de formulación para reducir el tamaño de las gotas y la transparencia del producto formulado durante el proceso de homogeneización [4].

Un ejemplo de la acción de los polioles se evidencia en el dipropilenglicol. Este poliol ejerce un impacto positivo sobre la transparencia de la nanoemulsión: ocurre una disminución en la diferencia del índice de refracción entre la fase oleosa y acuosa. Se presenta un aumento en la viscosidad de la fase acuosa de 1,8 cP en una formulación sin dipropilenglicol a 4,0 cP con dipropilenglicol al 10% [4].

**Tensoactivos:** en cosméticos, se puede usar

una amplia variedad de tensoactivos para obtener nanoemulsiones a través de la homogeneización.

Éstos incluyen (a) tensoactivos no iónicos clásicos tales como alcoholes grasos etoxilados o ácidos grasos, ésteres grasos de sacarosa, poliglucósidos de alquilo y ésteres de poliglicerol; (b) oligómeros anfifílicos; y (c) mezclas de alcoholes grasos y tensoactivos o fosfolípidos [4].

Estos métodos de alta energía tienen una serie de ventajas que los han llevado a ser ampliamente utilizados en procesos industriales, como su versatilidad y alto rendimiento y ofrece a los formuladores la oportunidad de crear productos nuevos y atractivos que respondan a los requisitos técnicos, toxicológicos y ambientales de los productos cosméticos (Tabla 1). Sin embargo, los métodos de alta energía también tienen una serie de limitaciones: (i) El proceso generalmente implica varios pasos, que incluyen la dispersión, la premezcla y la homogeneización; (ii) existen necesidades de alta energía; (iii) existe un riesgo potencial de degradación o desnaturalización de moléculas frágiles en la formulación; y (iv) existen altos costos asociados con la compra, mantenimiento y operación del equipo. En consecuencia, ha habido interés en métodos de emulsión alternativos, como los métodos de baja energía, que permiten la formulación de nanoemulsiones muy pequeñas y monodispersas sin necesidad de ningún equipo especializado [4, 11].

### 3.2. Métodos de baja energía

Los métodos de emulsión de baja energía, hacen uso de la energía química interna del sistema, a menudo son más eficientes energéticamente ya que solo se necesita agitación simple, y generalmente permiten producir un tamaño de gota más pequeño que los métodos de alta energía [48]. Sin embargo, dependiendo del sistema y las variables de composición, se pueden lograr tamaños de gota similares por ambos tipos de métodos [49].

La formación de nanoemulsión desencadenada por la rápida difusión de las moléculas de surfactante y/o solvente desde la fase dispersa a la fase continua sin que implique un cambio en

Tabla 1: Algunas nanoemulsiones con aplicaciones cosméticas y cosmeceúticos, elaboradas por métodos de alta energía

Fase dispersa	Aplicación cosmética	Método	Referencia
Toxina botulínica, aceite insaturado de soya, girasol y almendra	Nanoemulsiones que comprenden toxinas botulínicas para el tratamiento cosmético y médico de estados de contractura muscular	Microfluidización	Edelson y Nicolsi (2016) [40]
Péptidos, almendra, aceite de aguacate	Fórmula para incorporar péptidos cortos (de 2 a 30 aminoácidos) con efectos cosméticos y terapéuticos beneficiosos sobre la piel.	Microfluidización	Edelson y Kotyla (2016) [41]
Polisacáridos de Agave sisalana, Isostearil neopentanoato, etilhexil palmitato	Fórmula para incorporar polisacáridos de Agave sisalana como materia prima cosmética hidratante	Ultrasonificación	Barreto (2017) [42]
Coenzima Q10, miristato de isopropilo	Fórmula para incorporar coenzima Q10 para mejorar la permeabilidad da la piel mediante aplicación tópica.	Ultrasonificación	El-Leithy (2018) [43]
Carotenoides microbianos, aceite de burití y vitamina E	Mejorar la estabilidad y aumentar el factor de protección solar en las nanoemulsiones foto protectoras	Ultrasonificación	Mansur (2020) [44]
Coenzima Q10, aceite de copaiba	Proteger los queratinocitos contra los daños oxidativos y en la dermis para estimular la proliferación de fibroblastos y colágeno	Ultrasonificación	Nigro (2019) [45]
Coenzima Q10, aceite de linaza, aceite de onagra y aceite de oliva.	Desarrollar una crema de nanoemulsión de coenzima Q10	Homogeneización con un mezclador de alto cizallamiento	Tou (2019) [46]
Alcohol graso	Desarrollo de una formulación más transparente que una loción lechosa convencional	Homogeneización a alta presión	Okamoto (2016) [34]
Tocomin <sup>®</sup> , miristato de isopropilo	Formulación para mejorar el suministro de eficacia de compuestos naturales preventivos /quimioterapéuticos	Homogeneización Ultra Turrax-10	Brownlow (2015) [47]

la curvatura espontánea del surfactante se conoce como “autoemulsión” [10].

Cuando se producen cambios en la curvatura espontánea del surfactante durante el proceso de emulsión de negativo a positivo (para obtener emulsiones O/W) o viceversa (para emulsiones W/O), se designan como métodos de “inversión de fase”. Estos se clasifican como métodos de temperatura de inversión de fase (en inglés, Phase Inversion Temperature, PIT ) y composición de inversión de fase (en inglés, Phase Inversion Composition PIC) si la emulsión se desencadena por un cambio en la temperatura o la composición, respectivamente [10].

### 3.2.1. Formación de nanoemulsión por métodos de autoemulsión

La emulsión se crea como resultado de una mezcla de dos líquidos a temperatura ambiente. Uno es una fase acuosa pura, el otro es una mezcla de aceite, surfactante y un solvente miscible en agua. El método de autoemulsión o emulsión espontánea hace uso de la energía química liberada debido a un proceso de dilución con la fase continua, sin que se produzca ninguna transición de fase (sin cambio en la curvatura espontánea del tensioactivo) en el sistema durante la emulsión [10, 50].

La emulsión espontánea se produce por diferentes mecanismos que parecen verse afectados por la composición del sistema, las características fisicoquímicas y el protocolo de emulsión

(es decir, la forma en que se añaden los componentes y cómo se modifican las propiedades termodinámicas del sistema). En primer lugar se propusieron tres posibles mecanismos principales: dos de ellos implicaban la rotura mecánica de la interfase debida, en un caso, a la intensidad de la turbulencia interfacial y, en el otro, a la existencia de valores negativos de tensión interfacial. El criterio de tensión interfacial negativa es una simplificación excesiva porque otros factores además de la tensión (por ejemplo, fuerzas eléctricas en capas dobles) pueden influir significativamente en la estabilidad cuando la tensión es baja (menos de aproximadamente 1 mN/m). Por tanto, este segundo mecanismo se describe mejor como inestabilidad mecánica de las interfaces de baja tensión. El tercer mecanismo fue llamado “difusión y varado” y es completamente diferente de los dos anteriores porque involucra una inestabilidad química en lugar de mecánica. La idea básica en este caso es que las regiones de sobresaturación local son producidas por el proceso de difusión y las gotitas de emulsión se forman debido a la transformación de fase en estas regiones. La sobresaturación cerca de una interfaz también puede promover su ruptura por un mecanismo de inestabilidad química distinto, pero estrechamente relacionado [51].

Por lo tanto, al diluir una microemulsión o una mezcla de disolvente, tensioactivo y / o cosurfactante, se produce la difusión de los componentes miscibles en agua, desde la fase orgánica, hacia la fase acuosa, lo que induce una gran turbulencia en la interfase agua / aceite, lo que resulta en un aumento dramático de la área interfacial, dando lugar al estado de emulsión metaestable, haciendo que se formen gotas nanoescaladas (nanoemulsiones O/W) [10, 52].

Según el tipo de nanopartícula requerida, la formulación también puede incluir componentes adicionales tales como tensioactivos, monómeros, polímeros, macromoléculas y / u otros ingredientes activos. Aunque estas adiciones pueden causar una ligera interferencia con el proceso, los mecanismos a nivel general permanecerán sin cambios [50, 52].

La formación de nanoemulsiones por au-

toemulsión, a través de la dilución de microemulsiones O/W empleando un alcohol como cosurfactante, es debido a la difusión del alcohol en la interfase de las gotas, hacia el agua tras el proceso de dilución [10].

Como consecuencia, la microemulsión, ahora es termodinámicamente inestable, ya que la concentración de tensioactivo no es lo suficientemente alta, como para mantener la tensión interfacial muy baja requerida ( $\gamma < 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ) para la estabilidad termodinámica, convirtiéndose en una nanoemulsión (Figura 3) [10].

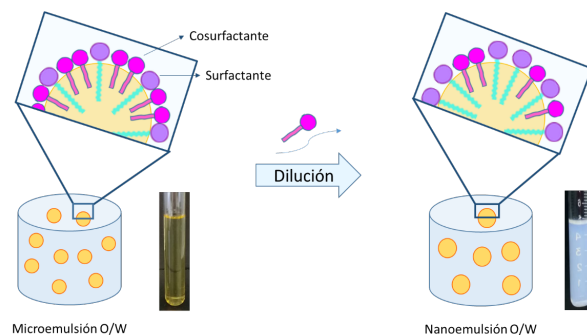


Figura 3: Representación esquemática del mecanismo propuesto para la autoemulsión por dilución de una microemulsión O/W: por dilución con agua, el cosurfactante difunde de la interfase aceite / agua a la fase acuosa. Modificado de [10]

Las nanoemulsiones también se pueden formar mediante la dilución de agregados tensioactivos distintos de las microemulsiones. De hecho, la formación de nanoemulsiones O/W por dilución directa a partir de una fase cristalina líquida cúbica con estructura (Pm3n), en sistemas mixtos de tensioactivos no iónicos / iónicos [49, 53]. Estas fases cristalinas Pm3n, es un tipo de estructura micelar basada en agregados micelares discretos [54].

Durante la dilución, las micelas que se empaquetaron en la red cúbica se separan, interrumpiendo la estructura cúbica, y al mismo tiempo una parte del tensioactivo que estabilizaba la interfase puede migrar a la fase acuosa en el seno del líquido, desestabilizando una parte de la interfase, dando pie a la formación de las gotas finales de nanoemulsión (Figura 4). Vale la pena señalar que no se produce ningún cambio en la

curvatura espontánea del tensioactivo durante la etapa de dilución [10].

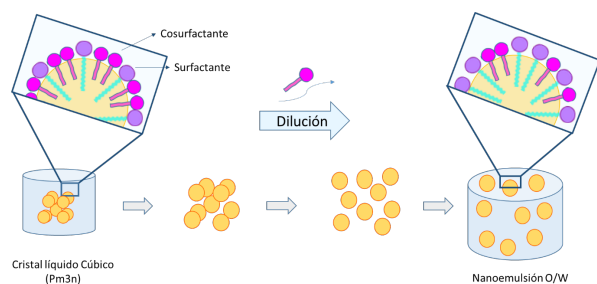


Figura 4: Representación esquemática del mecanismo propuesto para la formación de nanoemulsiones O / W por dilución directa a partir de una fase cristalina líquida cúbica con estructura Pm3n, en sistemas mixtos de tensioactivos no iónicos / iónicos. Modificado de [10]

Se obtienen nanoemulsiones con un tamaño de gotas pequeño, independientemente de la composición de la microemulsión y el procedimiento de dilución utilizado. Adicionalmente, no se presentan cambios en la curvatura del surfactante durante el proceso.

El procedimiento de dilución empleado por Solé y colaboradores [55] mostró que se pueden obtener nanoemulsiones, por dilución de microemulsiones de aceite en agua (O/W) y agua en aceite (W/O). Además, tanto la velocidad de adición como el orden de adición de la microemulsión o del agua, producen nanoemulsiones.

A partir de microemulsiones O/W, se obtienen nanoemulsiones con diámetros de gota de 20 nm, independientemente de la composición de microemulsión y el procedimiento de dilución utilizado. A partir de microemulsiones W/O, las nanoemulsiones sólo se obtienen si las condiciones de emulsión permiten alcanzar el equilibrio en un dominio de microemulsión O/W durante el proceso [55].

Pereira y col [56], evaluaron una metodología que plantea ser una herramienta útil y sencilla para la evaluación del desempeño de la emulsión espontánea. La metodología de la gota permite la evaluación de sistemas surfactante-aceite-agua, en procesos de emulsión espontánea que resultan en desempeños que van desde muy bueno hasta

malo, con medianas de tamaño de gota 2,3  $\mu\text{m}$  con 28,7  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

El procedimiento consiste en colocar con una pipeta Pasteur una gota de aceite en contacto con una gota de la fase acuosa. En el aceite se mezclan los surfactantes y alcoholes en diferentes proporciones de acuerdo con cada sistema. La clasificación de cada sistema fue realizada a través de la inspección visual, empleando las palabras: *muy bueno*, *bueno*, *regular* y *malo*, para calificar el proceso de emulsión observado.

Para el sistema clasificado muy bueno, al colocar en contacto las gotas de ambas fases, se observó la aparición de un color blanquecino, a veces observándose, un movimiento persistente. En el sistema clasificado bueno, cuando transcurren 10 segundos de ocurrir el contacto entre las gotas de ambas fases, se observó la aparición del color blanquecino, la cual persistió por 10 min. En algunos casos puede observarse o no, movimiento en las gotas. El caso regular, mostró cierta evidencia de emulsión, mediante un color ligeramente blanquecino, después del contacto intergota, transcurrido 1 minuto o más. En este caso no hay movimiento en las gotas. El sistema clasificado malo mostró muy poca o ninguna evidencia de emulsión espontánea. Los sistemas fueron observados por un microscopio óptico acoplado con una cámara digital (equipo marca MOTIC) [56].

Este método representa un ahorro en reactivos y proporciona la información adecuada y previa sobre la emulsión del sistema que se desea estudiar.

### 3.2.2. Formación de nanoemulsión por métodos de inversión de fases

Estos métodos hacen uso de la energía química liberada por las transiciones de fase durante el proceso de emulsión. Estas transiciones de fase a menudo, implican la inversión de la curvatura de la película de surfactante de positiva a negativa o viceversa. Se ha demostrado que las transiciones de estructuras que tienen una película de surfactante con una curvatura cero, (como la fase cristal líquido lamelar o microemulsión bicontinua) juegan un papel importante en la formación de

las nanoemulsiones [57, 58]. La fase laminar o lamelar ( $L\alpha$ ) consiste en bicapas de moléculas de una sustancia anfifílica separadas entre sí por capas de agua. Esta fase líquida cristalina se caracteriza por su relativa fluidez, a pesar de poseer una elevada proporción de tensioactivo [54]. La microemulsión bicontinua es una partición bicontinua en la que cada subvolumen se llena con una composición o fase distinta, no necesariamente uniforme. Las estructuras bicontinuas pueden estar presentes en fases mesomórficas, similares a cristales líquidos, consideradas como dispersiones de esferas, cilindros o láminas [59].

### 3.2.3. Método de la temperatura de inversión de fase (PIT)

El método PIT, introducido por Shinoda y Saito [60], se basa en los cambios en la curvatura espontánea del tensioactivo inducidos por la temperatura.

El método PIT solo se puede aplicar a los tensioactivos sensibles a los cambios de temperatura, es decir, los tensioactivos no iónicos de tipo polioxietileno en los que los cambios de temperatura inducen un cambio en la hidratación de las cadenas de poli (oxietileno) y por consiguiente el cambio de su curvatura [10, 60].

El aceite, el agua y los tensioactivos no iónicos se mezclan todos a temperatura ambiente y se agitan ligeramente. A continuación, la mezcla se calienta gradualmente, como resultado la solubilidad del tensioactivo cambia progresivamente de la fase acuosa a la oleosa. Por encima de la temperatura de inversión de fase, el tensioactivo se solubiliza completamente en aceite y, por lo tanto, la mezcla sufre una inversión de fase, desde una emulsión de aceite en agua (O/W) hasta una emulsión de agua en aceite (W/O) [50, 61].

Estas diferentes estructuras pueden ser fases esféricas, tubulares o de disco, láminas o esponjas y presentan una estabilidad que solo depende de los cambios variables termodinámicos como temperatura, composición y dilución. Las nanoemulsiones se generan instantáneamente realizando una transformación irreversible: un enfriamiento rápido o una dilución repentina con agua fría, a

este sistema mantenido en la PIT o más alto que el mismo [50].

En cuanto al mecanismo de formación, se cree ampliamente que las gotas a escala nanométrica se originan a partir de plantillas nanométricas: Las microemulsiones PIT. Estos últimos simplemente se rompen por el rápido enfriamiento y/o dilución, “congelando” la red de microemulsiones en forma de nanoemulsiones.

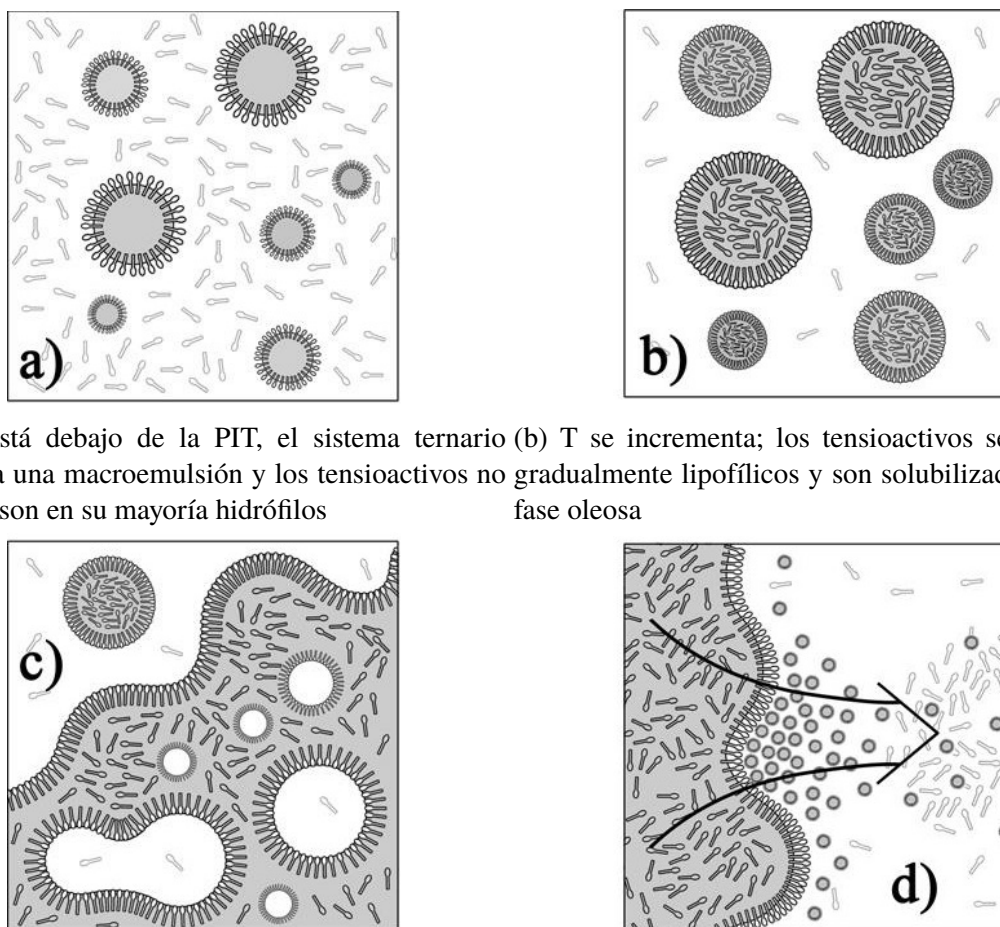
Básicamente, las nanoemulsiones se generan cuando el equilibrio de fase correspondiente es un sistema Winsor III o IV, relacionado a la cantidad de tensioactivo [50].

Este mecanismo, ilustrado en la Figura 5, se puede describir de la siguiente manera: debajo de la PIT, la Figura 5a, se forma una macroemulsión lechosa y la mayoría de los tensioactivos no iónicos se solubilizan en la fase acuosa, de acuerdo con un coeficiente de partición del tensioactivo desplazado hacia la solubilidad en agua [49, 50].

A medida que aumenta la temperatura de la mezcla, Figura 5b, estos anfífilos no iónicos se vuelven hidrofóbicos gradualmente, haciendo que migren dentro de la fase oleosa. Luego, dado que las cantidades de tensioactivo son del mismo orden de magnitud que las del aceite, aumenta la fracción de volumen de la fase dispersa. Además, la curvatura interfacial y la tensión interfacial se reducen, dando lugar a condiciones propicias para el establecimiento de microemulsiones Winsor III o Winsor IV en equilibrio, como se muestra en la Figura 5c, [20, 62, 63, 64, 65].

La temperatura que marca la frontera entre las emulsiones O/W y W/O se llama temperatura de inversión de fase (PIT), la cual está intrínsecamente cerca del punto de turbidez, pero posiblemente cambia según la naturaleza del aceite (para lo cual la solubilidad del surfactante en el aceite puede variar) [11].

Finalmente, cuando la temperatura se incrementa por encima de la PIT, el sistema sufre una inversión de fase y el agua se dispersa en la mezcla de aceite más surfactante (los surfactantes son lipofílicos a esta temperatura). En este punto, después del enfriamiento rápido, se crean nanoemulsiones. Este último paso simplemente recrea las condiciones de emulsión del



(a)  $T$  está debajo de la PIT, el sistema ternario presenta una macroemulsión y los tensioactivos no iónicos son en su mayoría hidrófilos  
 (b)  $T$  se incrementa; los tensioactivos se vuelven gradualmente lipofílicos y son solubilizados por la fase oleosa

(c)  $T$  está en la PIT, se forman microemulsiones bicontinuas  
 (d) La temperatura se eleva por encima de la PIT, la emulsión se invierte y luego el agua se dispersa en la mezcla de aceite y tensioactivo lipofílico

Figura 5: Diagrama del mecanismo de generación de nanoemulsiones utilizando el método PIT. El sistema agua / tensioactivo no iónico / aceite sufre una inversión de fase [50]

procedimiento de emulsión espontánea. El sistema se configura muy rápidamente a una temperatura que cambia drásticamente los coeficientes de partición del tensioactivo, haciéndolos completamente hidrófilos. Como resultado, los anfílicos se mueven espontáneamente del aceite a la fase acuosa, tal como ocurre en la emulsión espontánea. Finalmente, como se muestra en la Figura 5d, se generan nanoemulsiones, debido únicamente a este desplazamiento de materiales hidrofílicos.

La proporción de aceite y tensioactivo solo influye en el tamaño de la nanoemulsión. Puede significar que el mismo mecanismo, estrechamente relacionado con la proporción de aceite tensioactivo, gobierna ambos procesos.

Se deduce que los conceptos involucrados en el procedimiento PIT pueden de hecho ser los mismos que los involucrados en la emulsión espontánea, basados en la rápida difusión de una especie desde la fase oleosa a la acuosa [50].

En la formulación de nanofarmacéutica o cosmética, los métodos de baja energía parecen ser preferidos como un medio para encapsular fármacos frágiles o termosensibles (Tabla 2). Hasta la fecha, estos métodos se clasificaron en diferentes métodos gobernados por diferentes mecanismos.

Este estudio indica que, finalmente, todos estos métodos de baja energía, incluido el método PIT, siguen un mecanismo único y universal controlado por un rápido desplazamiento de los tensioactivos

de la fase oleosa a la acuosa, este fenómeno da lugar a nanoemulsión espontánea [50].

### 3.2.4. *Papel de los surfactantes no iónicos polietoxilados sobre los métodos de emulsión transitorios*

Los métodos de emulsión de baja energía se basan casi exclusivamente en el uso de surfactantes para los cuales la cabeza polar es una cadena de poli etilenglicol (PEG y tensioactivos PEGilados), que son una forma particular de surfactantes no iónico. Se han utilizado en los métodos de temperatura de inversión de fase (PIT), emulsión espontánea y sistema de administración de fármacos autoemulsionantes, pero su comportamiento global y su papel en estos procesos de emulsión siguen un mecanismo universal [11].

Típicamente utilizados en la formación de nanoemulsiones por emulsión de baja energía son, son el Triolato de sorbitano con 20 moles de polioxietileno (Tween 85) empleado en nanoemulsiones cosméticas y farmacéuticas [66, 67]. El monooleato de polioxietilensorbitano (Tween 80) empleado en nanoemulsiones cosméticas, alimenticias [68, 69, 70]. PEG-4 dodecil éter (Brij 30) [71], estos se observan en la Figura 6.

Todos estos tensioactivos tienen un número relativamente alto de unidades de etilenglicol, o longitud de la cadena PEG, con valores en un rango de tamaño comparable (15-35 por cadena lipídica). Además, todos estos tensioactivos tienen valores de balance hidrofílico-lipofílico (HLB) alrededor de 13-15, que está relacionado con los tamaños relativos de la cabeza polar y la cadena no polar. Las cadenas de PEG más cortas o mucho más largas inducirán una pérdida de solubilidad en agua o actividad superficial, respectivamente [11].

En general, la solubilidad de los tensioactivos etoxilados es inducida, no sólo por las interacciones entre la cadena de PEG y el agua a través de la formación de puentes de hidrógeno, en el seno del agua [74, 75], pero también por la conformación de la cadena PEG que puede crear un momento dipolar localizado (en la conformación cis), la cual mejora las interacciones dipolo-dipolo con el agua [76] y por lo tanto su solubilidad. La

solubilidad de los tensioactivos no iónicos se determina principalmente por las interacciones entre los grupos etoxilados y el agua, y se modifica por el tamaño de los grupos fluctuante (no es una interacción fija). Tales asociaciones se forman por la estructuración de las moléculas de agua, asociadas por enlaces de hidrógeno que envuelve las cabezas polares etoxiladas. Esto se ve afectado en gran medida por los cambios de temperatura, disminuyendo fuertemente la solubilidad con el calentamiento, porque la excitación térmica de las moléculas de agua reduce sus interacciones con los grupos de óxido de etileno [11].

Estas interacciones, son responsables del fenómeno llamado punto de enturbiamiento o punto de nube, también de la separación del tensioactivo no iónico de la mezcla, dando lugar a una fase rica en tensioactivo en equilibrio con una fase acuosa con concentración de tensioactivo próxima a la CMC. Además, son responsables del fenómeno de la inversión de fase de una emulsión [11].

Si el uso de tensioactivos no iónicos suele ser necesario para obtener una emulsión de baja energía, la elección de la fase de aceite también es muy importante para el éxito del proceso. Los métodos de emulsión de transición utilizados para producir nanoemulsiones se basan en cambios en las interacciones relativas de los tensioactivos PEGilados con las fases de aceite y agua y particularmente en la posibilidad de modificar estas interacciones usando variables termodinámicas [11].

### 3.2.5. *Método de composición de inversión de fase (PIC)*

En el método PIC, las transiciones de fase son inducidas por cambios en la composición durante la emulsión, a temperatura constante representada esquemáticamente en la Figura 7. En consecuencia, se puede aplicar a tensioactivos que no sean de tipo etoxilado.

Para el método PIC, al igual que para el PIT, es común encontrar las transiciones de fase (fases cristalinas líquidas laminares o microemulsiones bicontinuas) durante el proceso de emulsión que conduce a la formación de nanoemulsiones, lo que



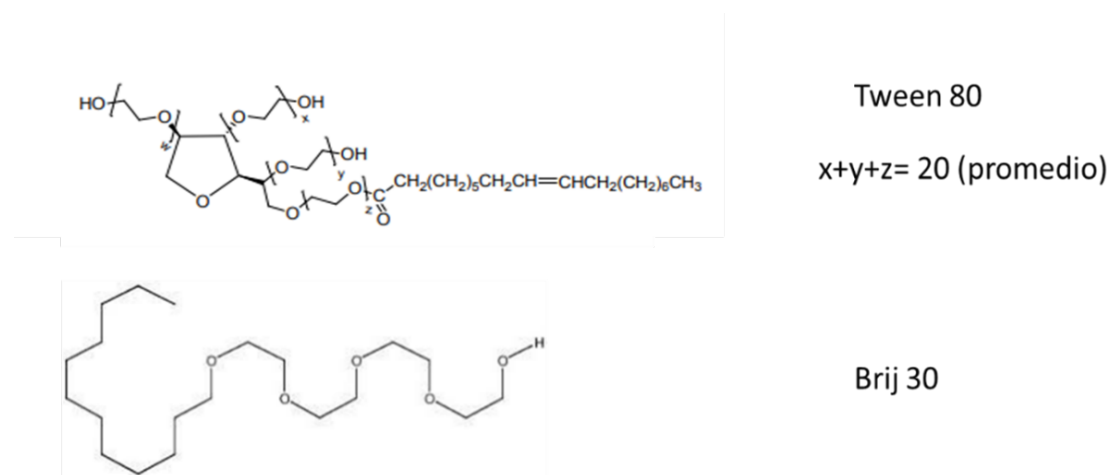


Figura 6: Algunos surfactantes no iónicos empleados en la emulsión transicional [72, 73]

implica que se rigen por los mismos mecanismos [10].

El procedimiento para obtener nanoemulsiones por el método PIC consiste en agregar progresivamente uno de los componentes (agua o aceite) sobre una mezcla de los otros dos componentes (surfactante de aceite o surfactante de agua, respectivamente [77, 78].

Se considera que el método PIC tiene un mayor potencial para una producción a gran escala que el PIT porque es experimentalmente más fácil agregar un componente a un gran volumen de emulsión que producir un cambio repentino de temperatura. Además, también se prefiere el método PIC cuando se trata de componentes con problemas de estabilidad de temperatura. Además, como se discutió anteriormente, este método no está restringido a los tensioactivos de tipo POE [10].

El sistema inicial, generalmente, es una microemulsión de agua en aceite, cuando se agrega agua progresivamente a la fase oleosa para formar una nanoemulsión O/W. A medida que aumenta la fracción de volumen de agua, el grado de hidratación de las cadenas POE del tensioactivo aumenta progresivamente, y la curvatura espontánea del tensioactivo cambia de negativo a cero. Alrededor de esta composición de transición, las propiedades tensioactivas hidrofílicas-lipofílicas están equilibradas, como a la temperatura HLB. En consecuencia, se forman estructuras bicontinuas

o lamelares. Cuando se excede la composición de transición, las estructuras con curvatura cero se separan en pequeñas gotas directas (O/W) metaestables que aún contienen el aceite, y tienen un diámetro muy pequeño, lo que implica una curvatura positiva muy alta de la capa tensioactiva [10].

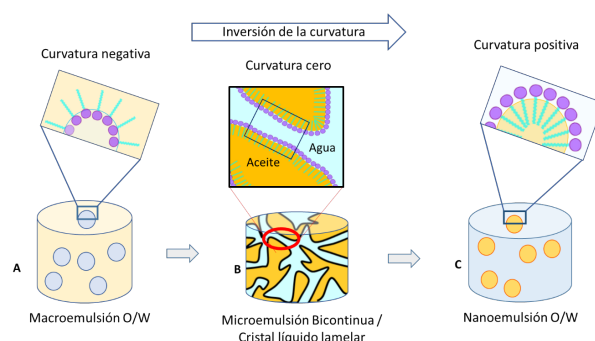


Figura 7: Representación esquemática de la formación de nanoemulsiones por el método PIC [10]

#### 4. Concepto de variable de formulación generalizada: SAD y HLD

Cuando se formula una emulsión se tiene una gran cantidad de variables a tomar en cuenta. Todas las propiedades de la emulsión, como por ejemplo, el tamaño de gota son influenciados por estas variables de formulación. Desde finales de los años 70 se logró desarrollar un concepto generalizado

Tabla 2: Algunas nanoemulsiones con aplicaciones cosméticas y cosmeceúticos, elaboradas por métodos de baja energía

Fase dispersa	Aplicación cosmética	Método	Referencia
Tegosoft G20 (octildodecanol)	Fórmula para incorporar ceramidas IIB con efectos cosméticos beneficiosos sobre la piel.	PIC	Su, R. (2017) [79]
Extractos vegetales	Nanoemulsiones como vehículo para la aplicación tópica con potencial hidratación y untuosidad.	PIT	Rocha-Filho (2017) [80]
Extracto de quercetina	Nanoemulsiones para aplicación como acondicionador de cabello	PIT	Dario (2016) [81]
Catequinas	Desarrollo de un nanogel cargado de catequina para la protección de la piel contra el foto daño inducido por la radiación UV	Emulsión espontánea	Harwansh (2016) [70]
Monooleato de sorbitan, lanolina acetilada	Desarrollo de formulaciones no son tóxicas como portadores para aplicaciones farmacéuticas y cosméticas.	Inversión de fase	Pereira (2016) [82]

de formulación llamado desviación hidrofílica-lipofílica (SAD) o su expresión adimensional, desviación hidrofílica-lipofílica (HLD) [83]. Este concepto fue desarrollado en base al barrido unidimensional de sistemas surfactante-aceite-agua, donde se cambia una sola variable mientras que las otras se mantienen constantes. El concepto del HLD corrige de alguna manera y toma en cuenta las deficiencias de las teorías del HLB y el PIT, y las relaciones de Winsor. Es una ecuación que relaciona las variables más importantes de formulación de un sistema SOW, tales como la salinidad de la fase acuosa, la fase aceite, los alcoholes, la temperatura, presión y estructura del surfactante. Ha sido empleado para formular emulsiones y microemulsiones, para romper emulsiones, para caracterizar surfactantes, fases aceites, modular tamaño de gota en emulsiones, entre otras aplicaciones. La ecuación del HLD resulta en una suma algebraica de las relaciones energéticas de los diferentes variables de formulación, y se expresa según la ecuación (1).

$$HLD = \alpha - EON - kEACN + \phi(A) + bS + C_T(T - 25) \quad (1)$$

Esta expresión corresponde para los surfactantes no iónicos del tipo etoxilado. Donde  $S$  es la salinidad de la fase acuosa ( $S$  expresa el porcentaje

en peso de cloruro de sodio),  $ACN$  es el número de átomos de carbono del alcano, como una medida de la lipofílicidad de la fase aceite,  $\phi(A)$  es una función del tipo y concentración de alcohol y  $T$  la temperatura en °C. La constante  $k$  depende del grupo hidrofílico del surfactante y  $\alpha T$  es un coeficiente de temperatura. Donde  $\alpha$  depende del grupo lipofílico del grupo surfactante,  $EON$  es el número de grupo de óxidos de etileno por molécula surfactante y  $\phi(A)$  depende de la concentración y naturaleza del alcohol. El parámetro  $b$  depende del tipo de electrolito;  $k$  y  $C_T$  son constantes.

Una aplicación importante es el uso de este concepto para remediar suelos contaminados con petróleo. Pérez y colaboradores hicieron formulación que mostró el 90% del desempeño en la solubilización de petróleo que estaba impregnado en un suelo de la zona de Yaracal, Edo. Falcón, Venezuela. El barrido de salinidad empleado fue calculado para tomar en cuenta la fase aceite a remover y así lograr minimizar el uso de solventes orgánicos [84].

## 5. Diversas nanotecnologías cosméticas

La piel humana es el órgano más grande del cuerpo, compuesto por distintas capas, proporcionando, como función principal, una protección al cuerpo de los daños ambientales [1].

La aplicación cosmética se produce principalmente en la superficie de la piel y, por tanto, la eficacia clínica del producto se basa a menudo en la difusión de las sustancias activas a través de la capa de la epidermis. La principal barrera para la penetración de sustancias a través de la piel es el estrato córneo, la capa más externa de la epidermis, que está en contacto directo con el medio ambiente [16].

Partiendo de la capa más externa de la piel, el estrato córneo (SC) de la epidermis está formado por un conjunto de células queratinizadas y anucleadas dispuestas planas unas contra otras. Estas células se recogen en 10 - 20 capas de células rodeadas de material lipídico extracelular. (Figura 8) Esto confiere a la superficie cutánea una importante característica estructural y organizativa, así como una propiedad hidrofóbica, siendo estos los factores clave para su función protectora y, también, para el control selectivo de la permeabilidad cutánea. Debido a estas características, algunas sustancias apenas penetran a través de la piel por difusión pasiva en cantidades suficientes para alcanzar niveles terapéuticos [16, 85, 86].

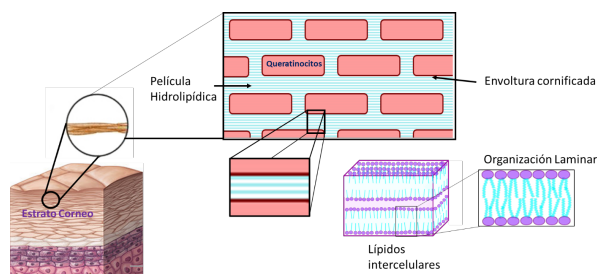


Figura 8: Esquema del estrato córneo (SC) de la epidermis

Hay varias vías posibles para que las moléculas penetren a través de la barrera cutánea y, en general, se consideran tres vías principales. En primer lugar, la vía intercelular más conocida se produce por difusión molecular a través de capas de lípidos entre la interfase de los corneocitos. En segundo lugar, la vía folicular con su densa red de capilares sanguíneos también actúa como un “reservorio” del componente activo. En tercer lugar, la vía transcelular que implica el transporte molecular

directamente a través de los corneocitos y las capas de lípidos [4, 87, 86].

Debido a estas características, algunas sustancias apenas penetran a través de la piel por difusión pasiva en cantidades suficientes para alcanzar niveles terapéuticos. En este contexto, la nanotecnología es fundamental en el desarrollo de estrategias que permitirían una mayor penetración de activos por vía transepidérmica, como las nanoemulsiones [16].

### 5.1. Otras nanotecnologías aplicadas en cosméticos

Además de las nanoemulsiones, hay otro tipo de nanosistemas empleados en el campo cosmético, como nanoesferas, nanocápsulas, nanopartículas de lípidos sólidos (SLNP), liposomas, ciclodextrinas y micelas. Cada uno de ellos presenta peculiaridades que son importantes conocer (Figura 9) [87, 88].

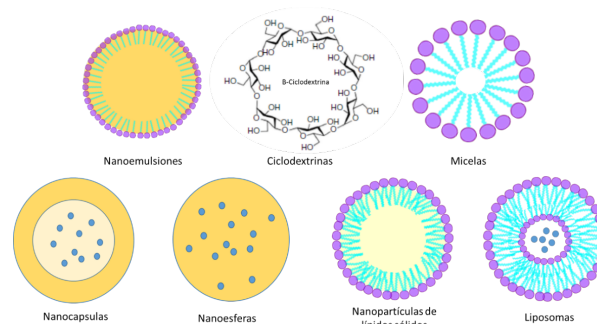


Figura 9: Diagrama de algunas nanotecnologías aplicadas en cosméticos. Modificado de Dutta 2020 [89] y Dhawan 2020 [90]

#### 5.1.1. Ciclodextrinas

Las ciclodextrinas (CD), también conocidas como cicloamilosas, cicloamilosas, o  $\gamma$ -dextrina de Schardinger [91], son oligosacáridos cíclicos de origen natural, obtenidos de fuentes renovables, compuestos por unidades de D-(+)-glucopiranosas unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4 [16].

Existen naturalmente tres tipos de CD:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  donde las cavidades están formadas por 6, 7 y 8 unidades de glucopiranosas, respectivamente. Estos tipos de CD se obtienen a partir de la

degradación enzimática del almidón por la acción de la glicosiltransferasa bacteriana [92, 93].

La forma es similar a los conos, donde la capa externa es hidrófila debido a los grupos hidroxílicos guiados en este sentido y la cavidad interna está estructurada por los enlaces carbonos y éteres de los residuos de glucosa que confieren una alta hidrofobicidad. Debido a esta conformación, los CD son solubles en agua y pueden unirse selectivamente a las diferentes sustancias activas. (Moléculas orgánicas, inorgánicas o biológicas) en la cavidad [94, 95].

Se han desarrollado formulaciones cosméticas basada en CD para el rejuvenecimiento de la piel y para aumentar la solubilidad y la actividad biológica de algunos compuestos. La formulación cosmética para el rejuvenecimiento de la piel basada en CD fue desarrollada por Gnain en 2008 [96]. La formulación puede albergar ácido ascórbico (vitamina C), que posee un activo antioxidante que protege la piel de los rayos ultravioleta.

En la formulación para aumentar la solubilidad y la actividad biológica se ha empleado retinol, ubiquinona y un agente que contiene nitrógeno (biotina o carnitina). Esta formulación es capaz de proteger la piel contra factores ambientales (extrínsecos), como la luz ultravioleta, el ozono, el humo del cigarrillo y otros, mejorando los daños y el envejecimiento de la piel. Otra ventaja es la reducción de líneas finas y arrugas, además de mejorar la elasticidad de la piel [16, 97].

Las micelas son “partículas” dispersas en agua, con un tamaño que varía de 10 a 100 nm y compuestas por fosfolípidos o preparadas a partir de polímeros sintéticos anfífilos. La parte hidrófila generalmente está compuesta por unidades de óxido de polietileno y su parte hidrófoba está compuesta por aminoácidos [98].

La forma esférica es el tipo de micela más utilizado. Sin embargo, son posibles varias morfologías dependiendo de las características del copolímero, por lo que puede ocurrir una transición entre micelas y vesículas [99, 100].

La estructura micelar permite la incorporación de sustancias de baja solubilidad en su núcleo hidrófobo, mejorando así su estabilidad y biodis-

ponibilidad. Además, su capa externa tiene un papel importante en el comportamiento in vivo debido a su estabilización estérica y su capacidad para interactuar con las células. Las micelas poliméricas (son micelas formadas por surfactantes poliméricos), también facilitan el transporte de fármacos a través de la endocitosis [101].

Además, debido al pequeño tamaño, las micelas mejoran la penetración de las sustancias en las capas más profundas de la piel en los sistemas tópicos. Por tanto, se han introducido diferentes usos de las micelas en la aplicación cosmética. Algunas empresas reconocidas en el campo cosmético, como Garnier, L’Oreal, Avène, La Roche-Posay, entre otros han empleado esta tecnología en sus productos. Este producto, conocido como agua micelar, es empleado para eliminar el maquillaje y las impurezas de la piel [16].

### 5.1.2. *Nanocapsulas*

Las nanocápsulas son sistemas que pueden caracterizarse como nanovesículas porque están compuestas por una matriz polimérica, que forma su capa, y un núcleo aceitoso conectado con tensioactivos, que pueden ser más hidrófilos o más lipófilos. Las sustancias activas a incorporar en este sistema pueden ser sólidas o líquidas [102, 103, 104].

Los polímeros utilizados para la síntesis de nanocápsulas pueden ser de diversos orígenes, como natural, sintético o semisintético. Los más utilizados son el ácido poliláctico, ácido poliglicólico, PLGA (poli (ácido láctico-co-glicólico)), derivados de celulosa como hidroxipropilmetilcelulosa, quitosano, etc. [105, 106].

El tamaño obtenido durante la síntesis está directamente relacionado con el proceso y con los materiales utilizados, como el tipo de polímero, la cantidad de tensioactivo y el grado de hidro / lipofilia del mismo. Teniendo en cuenta el proceso, la interferencia debe atribuirse a la velocidad de agitación, el tipo de disolvente utilizado para solubilizar el polímero, etc [107, 108]. Las nanocápsulas son una especie de nanopartículas que se han aplicado en formulaciones cosméticas y dermocosméticas para

actuar como reservorio de liberación prolongada de principios activos, protegerlos de procesos oxidativos, reducir olores desagradables, entre otros [103].

Se han desarrollado nanocápsulas como sistema de portador de vitamina A en formulación emulsionada con fines antienvjecimiento [109]. Estas nanocápsulas actuaron como un sistema reservorio liberando vitamina A con acción prolongada. También se desarrollaron una nanocápsula de  $\gamma$ -ácido poliglútamico / quitosanos que contenía esencia de jazmín [16]. Estas nanocapsulas mostraron una liberación sostenida de la esencia a temperatura ambiente.

### 5.1.3. *Nanoesferas*

Las nanoesferas son nanopartículas que, que tienen un tamaño inferior a 1  $\mu\text{m}$  (1000 nm), son sistemas matriciales que están formados por una matriz polimérica, que puede contener un polímero o una mezcla del mismo para obtener diferentes propiedades, donde se incorpora o adsorbe la sustancia activa. Por tanto, no se emplea ningún componente oleoso en su composición [102, 110, 111].

Este tipo de nanopartículas se puede utilizar en la industria cosmética con el propósito de liberación prolongada de sustancias activas que brindan beneficios a la piel, como las vitaminas, o para prolongar la liberación de fragancias [112].

### 5.1.4. *Nanopartículas de lípidos sólidos*

Las nanopartículas lipídicas sólidas (NSL) son sistemas formados a partir de lípidos sólidos [103, 110], que presentan diámetros menores a 1  $\mu\text{m}$  (1000 nm). Entre sus principales características se encuentran la estabilidad física, la protección de sustancias inestables, el control de la liberación de la sustancia activa y la capacidad de formación de película en la piel [88, 103, 113, 114]. Por tanto, los SLNP son una alternativa importante para mejorar la eficacia de los productos cosméticos.

Estos tipos de nanopartículas se utilizan para la incorporación de sustancias lipofílicas, incluso cuando se requiere un vehículo a base de agua. Esta aplicación también puede ser útil cuando el objetivo es incorporar filtros solares y químicos

lábiles, aquellos que se disuelven por medios químicos o físicos al contacto con la piel, protegiéndolas de la degradación y favoreciendo la liberación controlada [88, 103, 110, 113, 115]. En comparación con sistemas como micelas y liposomas, los LNS presentan desventajas que pueden afectar la estabilidad del sistema, como la dificultad para mantener la encapsulación activa e inestabilidad física durante la administración en el período de almacenamiento [103].

### 5.1.5. *Liposomas*

Los liposomas y las nanocápsulas son sistemas de depósito. Son vesículas esféricas que pueden estar compuestas por una membrana fosfolipídica que tiene en su interior un núcleo acuoso [88, 103, 110, 114]. Los liposomas pueden contener una o más membranas; de esta manera se clasifican en unilaminares o multilaminares, con un diámetro de partícula de 20 a 3500 nm. Los liposomas con una sola membrana y con un pequeño compartimento acuoso se denominan pequeños liposomas unilaminares, y su diámetro varía entre 20 y 50 nm. Sin embargo, cuando la cavidad acuosa es grande, las vesículas obtenidas varían de 200 a 1000 nm. Los liposomas multilaminares son aquellos en los que existen varias bicapas lipídicas y espacios acuosos entre ellos; este hecho provoca el aumento de diámetro y la estructura varía de 400 a 3500 nm [116]. Se agrega colesterol a la preparación para aumentar la estabilidad y mantener la sustancia atrapada dentro de las vesículas durante un período de tiempo más prolongado.

Las aplicaciones de los liposomas se han expandido a campos variados, especialmente a los cosméticos, donde ha sido reconocido como uno de los sistemas de administración de cosméticos más utilizados. Su composición estructural permite el atrapamiento de los fármacos hidrófilos y lipófilos en el núcleo acuoso y la porción no polar de la membrana bicapa, respectivamente [90].

Los liposomas cosméticos se pueden dividir en diferentes formas dependiendo de la composición y el propósito de uso.

- Transferosomas.

Son liposomas ultra deformables, biocompatibles, biodegradables y altamente eficientes. Su tamaño varía de 200 a 300 nm. Penetran a través de la piel por vías transcelulares e intracelulares. Compuestas por fosfolípidos, colesterol y un activador de bordes, es decir, tensioactivos como el colato de sodio [117].

#### ■ Niosomas

También conocidas como vesículas de tensioactivos no iónicos. Están compuestas de colesterol y tensioactivos no iónicos, como Spans, Tweens y Brij generalmente pertenecen a la clase de alquil o dialquil poliglicerol éter. Según la estructura, pueden clasificarse además, como pequeñas vesículas unilame-lares (25-500 nm de diámetro), vesículas multilaminares (0,5-10  $\mu\text{m}$  de diámetro) o grandes vesículas unilamelares (0,1-1  $\mu\text{m}$  de diámetro) [118].

#### ■ Novasomas

Es una técnica de encapsulación innovadora con varias ventajas como alta capacidad de carga, estética mejorada, estabilidad, rendimiento, rentable, irritación reducida y fácil de escalar. Estos son liposomas modificados o una variación de niosomas. Son vesículas no fosfolípídicas. Su tamaño puede oscilar entre 0,1 y 1  $\mu\text{m}$  [119].

#### ■ Marinosomas

Elaborado con extractos de lípidos marinos. Estos extractos son ricos en ácidos grasos poliinsaturados omega-3 como el ácido eicosapentaenóico y el ácido docosahexaenóico. Las enzimas presentes en la epidermis metabolizan estos lípidos y los convierten en los metabolitos que tienen propiedades antiinflamatorias y antiproliferativas. Por tanto, los marinosomas se pueden utilizar para tratar problemas inflamatorios de la piel [117].

#### ■ Fitosomas

Usados para mejorar la biodisponibilidad de los extractos herbales o de los componentes activos herbales aislados, se introdujo un

nuevo concepto de fitosomas. Es una mezcla compleja de fosfolípidos generalmente lecitina y extractos activos naturales como flavonoides, glucósidos y terpenoides [120].

#### ■ Nanosomas

Son pequeños liposomas con vesículas de rango nanométrico. Elaborado con fosfatidilcolina pura [121].

#### ■ Glicerosomas

Estos son una forma modificada de liposomas que contienen glicerol además de fosfolípidos. Tienen un alto potencial para ser utilizados en cosméticos para proporcionar compuestos activos debido a su alto rendimiento, propiedades curativas y de embellecimiento [122].

#### ■ Esfingosomas

Sistemas vesiculares lipídicos que consisten en un núcleo acuoso encerrado por una bicapa lipídica membrana. Los esfingolípidos sintéticos o naturales constituyen la bicapa lipídica [123].

## 6. Perspectivas a futuro

El consumo de mercado de productos cosméticos se está acelerando. OrbisResearch.com informó que el mercado mundial de productos cosméticos se valoró en \$ 532,43 mil millones en 2017, y se espera que crezca a \$ 805,61 mil millones para 2023 [124].

Hoy en día, existe una demanda significativa de productos innovadores en el mercado cosmético mundial. Los clientes buscan y prefieren los nuevos productos de alta eficacia y con la tendencia a lo natural, por ello los fabricantes de cosméticos y los productores de materias primas están cada vez más abiertos al uso de ingredientes naturales en los cosméticos y al uso de ingredientes y métodos de preparación respetuosos con el medio ambiente.

Se podrían obtener innumerables ventajas empleando nanosistemas en cosmética, incluida la preferencia de los consumidores potenciales, lo que sugiere que la nanotecnología es sinónimo de productos de buena calidad.

Esto puede verse como una oportunidad para nuevos desarrollos en las ciencias de sistemas dispersos y para llegar a otros mercados en un período en el que los consumidores con conciencia social son una nueva fuerza impulsora detrás del mercado de los cosméticos.

## 7. Referencias

- [1] R. Ribeiro, S. Barreto, E. Ostrosky, P. Da Rocha-Filho, L. Veríssimo, and M. Ferrari, "Production and characterization of cosmetic nanoemulsions containing *Opuntia ficusindica* (L.) mill extract as moisturizing agent," *Molecules*, vol. 20, no. 2, pp. 2492–2509, 2015.
- [2] F. Silva, E. Ricci-Junior, and C. Mansur, "Nanoemulsions containing octyl methoxycinnamate and solid particles of TiO<sub>2</sub>: preparation, characterization and in vitro evaluation of the solar protection factor," *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 39, pp. 1378–1388, 2013.
- [3] S. Samson, M. Basri, H. Masoumi, E. Malek, and R. Karjiban, "An artificial neural network based analysis of factors controlling particle size in a virgin coconut oil-based nanoemulsion system containing copper peptide," *PLoS ONE*, vol. 11, no. 7, pp. 1–15, 2016.
- [4] O. Sonnevile-Aubrun, M. Yukuyama, and A. Pizzino, *Nanoemulsions: Formulation, Applications, and Characterization*, 1st ed. Academic Press, 2018, ch. Application of Nanoemulsions in Cosmetics, pp. 345–375.
- [5] M. El-Aasser, C. Lack, Y. Choi, T. Min, J. Vanderhoff, and F. Fowkes, "Interfacial aspects of miniemulsions and miniemulsion polymers," *Colloids and Surfaces*, vol. 12, pp. 79–97, 1984.
- [6] D. Qi, Z. Cao, and U. Ziener, "Recent advances in the preparation of hybrid nanoparticles in miniemulsions," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 211, pp. 47–62, 2014.
- [7] S. Manickam, K. Sivakumar, and C. Heng Pang, "Investigations on the Generation of Oil-in-Water (O/W) Nanoemulsions through the Combination of Ultrasound and Microchannel," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 69, p. 105258, 2020.
- [8] T. Forster, *Surfactant Science Series*. New York: Marcel Dekker, 1997, vol. 68, ch. Surfactants in cosmetics.
- [9] A. Forgiarini, J. Esquena, C. González, and C. Solans, "Studies of the relation between phase behavior and emulsification methods with nanoemulsion formation," in *Trends in Colloid and Interface Science XIV. Progress in Colloid and Polymer Science*, V. Buckin, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000, vol. 115.
- [10] C. Solans and I. Solé, "Nano-emulsions: Formation by low-energy methods," *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 17, no. 5, pp. 246–254, 2012.
- [11] N. Anton, S. Akram, and T. Vandamme, *Nanoemulsions: Formulation, Applications, and Characterization*, 1st ed. Academic Press, 2018, ch. Transitional Nanoemulsification Methods, pp. 77–110.
- [12] P. Taylor and R. H. Ottewill, "The formation and ageing rates of oil-in-water miniemulsions," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 88, no. 2–3, pp. 303–316, 1994.
- [13] P. Taylor, "Ostwald ripening in emulsions," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 75, no. 2, pp. 107–163, 1998.
- [14] C. Solans and M. J. García-Celma, *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2017, ch. Microemulsiones y nano emulsiones para aplicaciones cosméticas, pp. 507–518.
- [15] T. Tadros, *Applied Surfactants: Principles and Applications*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2005.
- [16] B. Chiari-Andréo, M. Almeida-Cincotto, J. Oshiro, C. Yamada-Taniguchi, L. Chiavacci, and V. L. Borges-Isaac, *Nanoparticles in Pharmacotherapy*, 1st ed. Elsevier, 2019, ch. Nanoparticles for cosmetic use and its application, pp. 113–146.
- [17] K. Lintner, C. Mas-Chamberlin, P. Mondon, O. Peschard, and L. Lamy, "Cosmeceuticals and active ingredients," *Clinics in Dermatology*, vol. 27, no. 5, pp. 461–468, 2009.
- [18] Y. Maphosa and V. A. Jideani, *Science and Technology Behind Nanoemulsions*, 1st ed. London: IntechOpen, 2018, ch. Factors affecting the stability of emulsions stabilised by biopolymers, pp. 65–81.
- [19] L. Lopes, "Overcoming the Cutaneous Barrier with Microemulsions," *Pharmaceutics*, vol. 6, no. 1, pp. 52–77, 2014.
- [20] A. Faria-Silva, A. Costa, A. Ascenso, H. Ribeiro, J. Marto, L. Gonçalves, and S. Simões, *Nanocosmetics Fundamentals, Applications and Toxicity*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Nanoemulsions for cosmetic products, pp. 59–77.
- [21] J. Schulman, W. Stoeckenius, and L. Prince, "Mechanism of Formation and Structure of Micro Emulsions by Electron Microscopy," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 63, no. 10, pp. 1677–1680, 1959.
- [22] N. Anton and T. Vandamme, "Nano-emulsions and micro-emulsions: clarifications of the critical differences," *Pharmaceutical Research*, vol. 28, pp. 978–985, 2011.
- [23] C. Nastiti, T. Ponto, E. Abd, J. Grice, H. Benson, and M. Roberts, "Topical Nano and Microemulsions for Skin Delivery," *Pharmaceutics*, vol. 9, no. 4, pp. 1–25, 2017.

- [24] G. Broze, *Surfactant Science Series*, 1st ed. New York: Marcel Dekker, 1999, ch. Handbook of Detergents - Part A: Properties, pp. 253–302.
- [25] K. Bouchemal, S. Briançon, E. Perrier, and H. Fessi, “Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: solvent, oil and surfactant optimization,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 280, no. 1–2, pp. 241–251, 2004.
- [26] S. Jafari, P. Paximada, I. Mandala, E. Assadpour, and M. Mehrnia, *Nanoencapsulation Technologies for the Food and Nutraceutical Industries*, 1st ed. Academic Press, 2017, ch. Encapsulation by nanoemulsiones, pp. 36–73.
- [27] F. Villalobos-Castillejos, G. Granillo-Guerrero, D. Leyva-Daniel, L. Alamilla-Beltrán, G. Gutiérrez-López, A. Monroy-Villagrana, and S. Mahdi Jafari, *Nanoemulsion. Formulation, Applications, and Characterization*, 1st ed. Academic Press, 2018, ch. Fabrication of Nanoemulsions by Microfluidization, pp. 207–232.
- [28] S. Gharibzadeh and S. Jafari, *Nanoemulsions Formulation, Applications, and Characterization*. Academic Press, 2018, ch. Fabrication of Nanoemulsions by Ultrasonication, pp. 233–285.
- [29] L. Lee and I. Norton, “Comparing droplet breakup for a high-pressure valve homogenizer and a microfluidizer for the potential production of food-grade nanoemulsiones,” *Journal of Food Engineering*, vol. 114, no. 2, pp. 158–163, 2013.
- [30] D. Oh, P. Balakrishnan, Y. Oh, D. Kim, C. Yong, and H. Choi, “Effect of process parameters on nanoemulsion droplet size and distribution in SPG membrane emulsification,” *International Journal Pharmaceutics*, vol. 404, no. 1–2, pp. 191–197, 2011.
- [31] A. Ribier, J. Simonnet, and J. Michelet, “Dermatologic or Cosmetic Composition Made Up by an Oil-in-Water Emulsion Based on Oily Globules Coated With a Lamellar Liquid Crystal Coating,” French, Paris European Patent EP 0 641 557 B1, 1995.
- [32] A. Ribier, J. Simonnet, and S. Legret, “Transparent Nanoemulsion Less Than 100 nm Based on Fluid Non-Ionic Amphiphilic Lipids and Use in Cosmetics or in Dermopharmaceutics,” U.S. US Patent 5,753,241, 1998.
- [33] R. Knapik, M. Rocha dos Santos, C. Praes, and L. Lima de Oliveira, “Characterizing nanoemulsions prepared by high pressure homogenization under various emulsifying conditions,” *Cosmetics Toiletries*, vol. 125, pp. 72–78, 2010.
- [34] T. Okamoto, S. Tomomasa, and H. Nakajima, “Preparation and Thermal Properties of Fatty Alcohol/Surfactant/Oil/Water Nanoemulsions and Their Cosmetic Applications,” *Journal of Oleo Science*, vol. 65, no. 1, pp. 27–36, 2016.
- [35] A. Gupta, H. Eral, T. Hatton, and P. Doyle, “Nanoemulsions: formation, properties and applications,” *Soft Matter*, vol. 12, no. 11, pp. 2826–2841, 2016.
- [36] J. Floury, J. Bellettre, J. Legrand, and A. Desrumaux, “Analysis of a new type of high pressure homogeniser. A study of the flow pattern,” *Chemical Engineering Science*, vol. 59, no. 4, pp. 843–853, 2004.
- [37] T. Mason, S. Graves, J. Wilking, and M. Lin, “Extreme emulsification: formation and structure of nanoemulsiones,” *Condensed Matter Physics*, vol. 9, no. 1, pp. 193–199, 2006.
- [38] K. Meleson, S. Graves, and T. Mason, “Formation of Concentrated Nanoemulsions by Extreme Shear,” *Soft Materials*, vol. 2, no. 2–3, pp. 109–123, 2004.
- [39] T. Delmas, H. Piraux, A. C. Couffin, I. Texier, F. Vinet, P. Poulin, M. E. Cates, and J. Bibette, “How To Prepare and Stabilize Very Small Nanoemulsions,” *Langmuir*, vol. 27, no. 5, pp. 1683–1692, 2011.
- [40] J. Edelson and R. Nicolosi, “Botulinum Nanoemulsions,” U.S. U.S. Patent US 2014/0 099 342 A1, 2016.
- [41] J. Edelson and T. Kotyla, “Peptide nanoparticles and uses therefor,” U.S. U.S. Patent US 9.486.409 B2, 2016.
- [42] S. Barreto, M. Maia, A. Benicá, H. de Assis, V. Leite-Silva, P. da Rocha-Filho, and M. Ferrari, “Evaluation of in vitro and in vivo safety of the by-product of Agave sisalana as a new cosmetic raw material: Development and clinical evaluation of a nanoemulsion to improve skin moisturizing,” *Industrial Crops and Products*, vol. 108, pp. 470–479, 2017.
- [43] E. El-Leithy, A. Makky, A. Khattab, and D. Hussein, “Optimization of nutraceutical coenzyme Q10 nanoemulsion with improved skin permeability and anti-wrinkle efficiency,” *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 44, no. 2, pp. 316–328, 2017.
- [44] M. Mansur, C. Campos, A. Vermelho, J. Nobrega, L. da Cunha Boldrini, L. Balottin, and E. dos Santos, “Photoprotective nanoemulsions containing microbial carotenoids and buriti oil: Efficacy and safety study,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 13, no. 8, pp. 6741–6752, 2020.
- [45] F. Nigro, C. Cerqueira, A. Rossi, V. Cardoso, A. Vermelho, E. Ricci-Júnior, and C. Mansur, “Development, characterization and in vitro toxicity evaluation of nanoemulsion-loaded hydrogel based on copaiba oil and coenzyme Q10,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 585, p. 124132, 2019.
- [46] K. Tou, K. Rehman, W. Ishak, and M. Zulfakar, “Influence of omega fatty acids on skin permeation of a coenzyme Q10 nanoemulsion cream formulation: characterization, in silico and ex vivo determination,” *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 45, pp. 1451–1458, 2019.
- [47] B. Brownlow, V. Nagaraj, A. Nayel, M. Joshi, and T. Elbayoumi, “Development and In Vitro Evaluation of Vitamin E-Enriched Nanoemulsion Vehicles Loaded with Genistein for Chemoprevention



- Against UVB-Induced Skin,” *Damage Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 104, pp. 3510–3523, 2015.
- [48] I. Solè, A. Maestro, C. González, C. Solans, and J. Gutiérrez, “Optimization of nano-emulsion preparation by low-energy methods in an ionic surfactant system,” *Langmuir*, vol. 22, no. 20, pp. 8326–8332, 2006.
- [49] Y. Yang, C. Marshall-Breton, M. Leser, A. Sher, and D. McClements, “Fabrication of ultrafine edible emulsions: Comparison of high-energy and low-energy homogenization methods,” *Food Hydrocolloids*, vol. 29, no. 2, pp. 398–406, 2012.
- [50] N. Anton and T. Vandamme, “The universality of low-energy nano-emulsification,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 377, no. 1–2, pp. 142–147, 2009.
- [51] J. López-Montilla, P. Herrera-Morales, S. Pandey, and D. Shah, “Spontaneous Emulsification: Mechanisms, Physicochemical Aspects, Modeling, and Applications,” *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 23, no. 1–3, pp. 219–268, 2002.
- [52] C. Miller, “Spontaneous Emulsification Produced by Diffusion – A Review,” *Colloids and Surfaces*, vol. 29, no. 1, pp. 89–102, 1988.
- [53] I. Solè, A. Maestro, C. González, C. Solans, and J. Gutiérrez, “Influence of the phase behavior on the properties of ionic nanoemulsions prepared by the phase inversion composition method,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 327, no. 2, pp. 433–439, 2008.
- [54] R. Pasquali, C. Bregni, and R. Serrao, “Características e identificación de los cristales líquidos liotrópicos,” *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, vol. 37, no. 2, pp. 38–53, 2006.
- [55] I. Solè, C. Solans, A. Maestro, C. González, and J. Gutiérrez, “Study of nano-emulsion formation by dilution of microemulsions,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 376, no. 1, pp. 133–139, 2012.
- [56] J. Pereira, A. García, S. Ceballos, J. López-Montilla, A. Muñoz, and V. Coronel, “Una metodología alternativa para evaluar la producción espontánea de emulsiones,” *Faraute*, vol. 7, no. 2, pp. 38–42, 2012.
- [57] D. Morales, J. Gutiérrez, M. García-Celma, and Y. Solans, “A Study of the Relation between Bicontinuous Microemulsions and Oil/Water Nanoemulsion Formation,” *Langmuir*, vol. 19, no. 18, pp. 7196–7200, 2003.
- [58] A. Forgiarini, J. Esquena, C. González, and C. Solans, “Formation of Nano-emulsions by Low-Energy Emulsification Methods at Constant Temperature,” *Langmuir*, vol. 17, no. 7, pp. 2076–2083, 2001.
- [59] L. Scriven, “Equilibrium bicontinuous structure,” *Nature*, vol. 263, pp. 123–125, 1976.
- [60] K. Shinoda and H. Saito, “The effect of temperature on the phase equilibria and the types of dispersions of the ternary system composed of water, cyclohexane, and nonionic surfactant,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 26, no. 1, pp. 70–74, 1968.
- [61] N. Anton, J. Benoit, and P. Saulnier, “Design and production of nanoparticles formulated from nano-emulsion templates—A review,” *Journal of Controlled Release*, vol. 128, no. 3, pp. 185–199, 2008.
- [62] T. Forster, W. von Rybinski, and A. Wadle, “Influence of microemulsion phases on the preparation of fine-disperse emulsions,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 58, no. 2–3, pp. 119–149, 1995.
- [63] J. L. Salager, A. Forgiarini, L. Márquez, A. Peña, A. Pizzino, M. Rodriguez, and M. Rondón-González, “Using emulsion inversion in industrial processes,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 108–109, pp. 259–272, 2004.
- [64] P. Izquierdo, J. Esquena, T. Tadros, J. Dederen, J. Feng, M. García-Delma, N. Azemar, and C. Solans, “Phase behavior and nano-emulsion formation by the phase inversion temperature method,” *Langmuir*, vol. 20, no. 16, pp. 6594–6598, 2004.
- [65] C. Solans, P. Izquierdo, J. Nolla, N. Azemar, and M. J. Garcia-Celma, “Nanoemulsions,” *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 10, no. 3–4, pp. 102–110, 2005.
- [66] Z. Yang, W. Wang, G. Wang, and X. Tai, “Optimization of low-energy Pickering nanoemulsion stabilized with montmorillonite and nonionic surfactants,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 585, p. 124098, 2019.
- [67] N. Zadymova, M. Tao, and M. Poteshnova, “Tween 85 Oil-in-Water Nanoemulsions with Incorporated Chlorhexidine Base,” *Colloid Journal*, vol. 80, pp. 158–166, 2018.
- [68] Q. Meng, P. Long, J. Zhou, C. Ho, X. Zou, B. Chen, and L. Zhang, “Improved absorption of  $\beta$ -carotene by encapsulation in an oil-in-water nanoemulsion containing tea polyphenols in the aqueous phase,” *Food Research International*, vol. 116, pp. 731–736, 2019.
- [69] Y. J. Jo, H. Karbstein, and U. van der Schaaf, “Collagen peptide-loaded W1/O single emulsions and W1/O/W2 double emulsions: Influence of collagen peptide and salt concentration, dispersed phase fraction and type of hydrophilic emulsifier on droplet stability and encapsulation efficiency,” *Food & Function*, vol. 10, no. 6, pp. 3312–3323, 2019.
- [70] R. Harwansh, P. Mukherjee, A. Kar, S. Bahadur, N. Al-Dhabi, and V. Durairandiyar, “Enhancement of photoprotection potential of catechin loaded nanoemulsion gel against UVA induced oxidative stress,” *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 160, pp. 318–329, 2016.
- [71] W. C. Lu, D. W. Huang, C. C. Wang, C. H. Yeh, J. C. Tsai, Y. T. Huang, and P. H. Li, “Preparation, characterization, and antimicrobial activity of nanoemulsions incorporating citral essential oil,” *Journal of Food and*

- Drug Analysis*, vol. 26, no. 1, pp. 82–89, 2018.
- [72] A. Sahu, J. Mishra, and A. Mishra, “Introducing Tween-Curcumin Niosomes: Preparation, Characterization and Microenvironment study,” *Soft Matter*, vol. 16, no. 7, pp. 1779–1791, 2020.
- [73] A. Kakuste, M. Borse, and G. Sonawane, “Polyacrylic acid and polyacrylamide as cloud point modifier for Brij-30 in alcoholic aqueous solution,” *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 334–338, 2017.
- [74] R. Goldstein, “On the theory of lower critical solution points in hydrogen-bonded mixtures,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 80, no. 10, pp. 5340–5341, 1984.
- [75] S. Wartewig, I. Alig, W. D. Hergeth, J. Lange, I. Lochmann, and T. Scherzed, “Spectroscopic investigations on aqueous solution of poly(oxyethylene)-poly(oxypropylene)-poly(oxyethylene) triblockcopolymers,” *Journal of Molecular Structure*, vol. 219, pp. 365–370, 1990.
- [76] G. Karlstroem, “A new model for upper and lower critical solution temperatures in poly (ethylene oxide) solutions,” *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 89, pp. 4962–4964, 1985.
- [77] A. Machado, D. Lundberg, A. Ribeiro, F. Veiga, B. Lindman, M. Miguel, and U. Olsson, “Preparation of Calcium Alginate Nanoparticles Using Water-in-Oil (W/O) Nanoemulsions,” *Langmuir*, vol. 28, no. 9, pp. 4131–4141, 2012.
- [78] N. Sadurní, C. Solans, N. Azemar, and M. García-Celma, “Studies on the formation of O/W nanoemulsions, by low-energy emulsification methods, suitable for pharmaceutical applications,” *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 26, no. 5, pp. 438–445, 2005.
- [79] R. Su, L. Yang, Y. Wang, S. Yu, Y. Guo, J. Deng, and X. Jin, “Formulation, development, and optimization of a novel octyldodecanol-based nanoemulsion for transdermal delivery of ceramide IIIB,” *International Journal of Nanomedicine*, vol. 12, pp. 5203–5221, 2017.
- [80] P. Rocha-Filho, M. Ferrari, M. Maruno, O. Souza, and V. Gumiero, “In Vitro and In Vivo Evaluation of Nanoemulsion Containing Vegetable Extracts,” *Cosmetics*, vol. 4, no. 32, 2017.
- [81] M. Dario, M. Santos, A. Viana, E. Arêas, N. Bou-Chacra, M. Oliveira, and M. Velasco, “A high loaded cationic nanoemulsion for quercetin delivery obtained by sub-PIT method,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 489, pp. 256–264, 2016.
- [82] T. Pereira, C. Guerreiro, M. Maruno, M. Ferrari, and P. Rocha-Filho, “Exotic Vegetable Oils for Cosmetic O/W Nanoemulsions: In Vivo Evaluation,” *Molecules*, vol. 21, no. 3, p. 248, 2016.
- [83] J. Salager, R. Antón, J. Bullón, A. Forgiarini, and R. Marquez, “How to Use the Normalized Hydrophilic-Lipophilic Deviation (HLDN) Concept for the Formulation of Equilibrated and Emulsified Surfactant-Oil-Water Systems for Cosmetics and Pharmaceutical Products,” *Cosmetics*, vol. 7, no. 3, p. 57, 2020.
- [84] V. Perez, M. Sanchez, V. Coronel, J. Pereira, and R. Alvarez, “Uso de microemulsiones en la limpieza de suelos contaminados con crudo,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 19, no. 2, pp. 61–68, 2012.
- [85] T. Hirao, *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 1st ed. Elsevier, 2017, ch. Structure and Function of Skin From a Cosmetic Aspect, pp. 673–683.
- [86] A. Machado, P. Lopes, C. Raffier, I. Haridass, M. Roberts, J. Grice, and V. Leite-Silva, *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 1st ed. Elsevier, 2017, ch. Skin Penetration, pp. 741–755.
- [87] D. Morrow, P. McCarron, A. Woolfson, and R. Donnelly, “Innovative strategies for enhancing topical and transdermal drug delivery,” *The Open Drug Delivery Journal*, vol. 1, pp. 36–59, 2007.
- [88] A. Mihranyan, N. Ferraz, and M. Stromme, “Current status and future prospects of nanotechnology in cosmetics,” *Progress in Materials Science*, vol. 57, no. 5, pp. 875–910, 2012.
- [89] S. Dutta, S. Sivakamasundari, J. Moses, and A. Chinnaswamy, *Nanoengineering in the Beverage Industry*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Nanoencapsulation of Green Tea Polyphenols, pp. 229–261.
- [90] S. Dhawan, P. Sharma, and S. Nanda, *Nanocosmetics Fundamentals, Applications and Toxicity*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Cosmetic nanoformulations and their intended use, pp. 141–169.
- [91] S. Ghosh, A. Badruddoza, M. Uddin, and K. Hidajat, “Adsorption of chiral aromatic amino acids onto carboxymethyl- $\beta$ -cyclodextrin bonded  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  core-shell nanoparticles,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 354, no. 2, pp. 483–492, 2011.
- [92] L. Barreto and M. Cunha, “Cyclodextrin: important pharmaceutical functional excipient,” *Latin American Journal of Pharmacy*, vol. 27, no. 4, pp. 629–636, 2008.
- [93] A. Rasheed, C. Kumar, and V. Sravanthi, “Cyclodextrins as drug carrier molecule: a review,” *Scientia Pharmaceutica*, vol. 76, no. 4, pp. 567–598, 2008.
- [94] D. Alvarez-Dorta, E. León, A. Kennedy, A. Martín, I. Pérez-Martín, and E. Suárez, “Easy Access to Modified Cyclodextrins by an Intramolecular Radical Approach,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 54, pp. 3674–3678, 2015.
- [95] Y. Guo, S. Guo, J. Li, E. Wang, and S. Dong, “Cyclodextrin-graphene hybrid nanosheets as enhanced sensing platform for ultrasensitive determination of carbendazim,” *Talanta*, vol. 84, no. 1, pp. 60–64, 2011.

- [96] J. Gnaim, "Cyclodextrin containing polymers and uses thereof," U.S. Patent US20 080 275 139A1, 2008.
- [97] H. D. Max, T. D. Raschke, and R. D. Schimpf, "Skin care compositions with retinoids, ubiquinones, and biotin or carnitine," German European Patent EP1 449 514A1, 2004.
- [98] M. Adams, A. Lavasanifar, and G. Kwon, "Amphiphilic block copolymers for drug delivery," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 92, no. 7, pp. 1343–1355, 2003.
- [99] A. Choucair and A. Eisenberg, "Control of amphiphilic block copolymer morphologies using solution conditions," *The European Physical Journal E*, vol. 10, pp. 37–44, 2003.
- [100] L. Zhang, K. Yu, and A. Eisenberg, "Ion-Induced Morphological Changes in "Crew-Cut" Aggregates of Amphiphilic Block Copolymers," *Science*, vol. 272, no. 5269, pp. 1777–1779, 1996.
- [101] K. Yoncheva, P. Calleja, M. Agüeros, P. Petrov, I. Miladinova, C. Tsvetanov, and J. Irache, "Stabilized micelles as delivery vehicles for paclitaxel," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 436, no. 1-2, pp. 258–264, 2012.
- [102] A. Bizerra and V. Silva, "Sistemas de Liberação Controlada: Mecanismos e aplicações," *Revista Saúde e Medio Ambiente-RESMA*, vol. 3, no. 2, pp. 1–12, 2016.
- [103] R. Daudt, J. Emanuelli, I. Kulkap-Guerreiro, A. Pohlmann, and S. Guterres, "A nanotecnologia como estratégia para o desenvolvimento de cosméticos," *Ciência e Cultura*, vol. 65, no. 3, p. 2831, 2013.
- [104] J. Devissaguet and H. Fessi, "Process for the preparation of dispersible colloidal system of a substance in the form of nanocapsules," France Patent Application Patent US5 049 322A, 1991.
- [105] O. Pillai and R. Panchagnula, "Polymers in drug delivery," *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 5, no. 4, pp. 447–451, 2001.
- [106] S. Schaffazick, S. Guterres, L. Freitas, and A. Pohlmann, "Caracterización y estabilidad físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administración de fármacos," *Química Nova*, vol. 26, no. 5, pp. 726–737, 2003.
- [107] D. Moinard-Chécot, Y. Chevalier, S. Briançon, L. Beney, and H. Fessi, "Mechanism of nanocapsules formation by the emulsion-diffusion process," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 317, no. 2, pp. 458–468, 2008.
- [108] A. Esmaili, B. Saremnia, A. Koohian, and S. Rezazadeh, "Mechanism of nanocapsules of Matricaria recutita L. extract formation by the emulsion diffusion process," *Superlattices and Microstructures*, vol. 50, no. 4, pp. 340–349, 2011.
- [109] I. Kaur and I. Agrawal, "Nanotechnology: A New Paradigm in Cosmeceuticals," *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, vol. 1, no. 2, pp. 171–182, 2007.
- [110] P. Dos Santos, P. Miyashiro, and V. Da Silva, "A Nanotecnologia Em Formulação Cosmética," Master's thesis, Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas, 2015.
- [111] P. Morganti, "Use and potential of nanotechnology in cosmetic dermatology," *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, vol. 3, pp. 5–13, 2010.
- [112] T. Tree-Udom, S. Wanichwecharunguang, J. Seemork, and S. Arayachukeat, "Fragrant chitosan nanospheres: controlled release systems with physical and chemical barriers," *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 4, pp. 1602–1609, 2011.
- [113] A. Garud, S. Deepti, and N. Garud, "Solid lipid nanoparticles (SLN): method, characterization and applications," *International Current Pharmaceutical Journal*, vol. 1, no. 11, pp. 384–393, 2012.
- [114] I. Sarathchandiran, "A review on nanotechnology in solid lipid nanoparticles," *International Journal of Pharmaceutical Development & Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 45–61, 2012.
- [115] X. Wu and R. H. Guy, "Applications of nanoparticles in topical drug delivery and in cosmetics," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 371–384, 2009.
- [116] M. R. Mozafari, "Liposomes: an overview of manufacturing techniques," *Cellular & Molecular Biology Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 711–719, 2005.
- [117] T. Reva, A. Vaseem, S. Satyaprakash, and J. Md.Khalid, "Liposomes: the novel approach in cosmeceuticals," *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, vol. 4, no. 6, pp. 1616–1640, 2015.
- [118] S. Kurapati, "The current role of nanomaterials in cosmetics," *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, vol. 8, no. 5, pp. 906–914, 2016.
- [119] A. Singh, R. Malviya, and P. Sharma, "Novasome—a breakthrough in pharmaceutical technology a review article," *Advances in Biological Research*, vol. 5, no. 4, pp. 184–189, 2011.
- [120] N. Karimi, B. Ghanbarzadeh, H. Hamishehkar, F. Keyvani, A. Pezeshki, and M. Gholian, "Phytosome and liposome: the beneficial encapsulation systems in drug delivery and food application," *Journal Applied Food Biotechnology*, vol. 2, no. 3, pp. 17–26, 2015.
- [121] M. Nounou, L. El-Khordagui, N. Khalafallah, and S. Khalil, "Liposomal Formulation for Dermal and Transdermal Drug Delivery: Past, Present and Future," *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, vol. 2, no. 1, pp. 9–18, 2008.
- [122] P. Ganesan and D. Choi, "Current application of phytocompound-based nanocosmeceuticals for beauty and skin therapy," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 11, pp. 1987–2007, 2016.
- [123] K. Fathima, N. Antony, A. Paul, and S. Nair, "Sphingosome vesicular system," *International*

*Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, vol. 41, no. 1, pp. 208–213, 2016.

- [124] T. Nguyen and S. Rajendran, *Nanocosmetics Fundamentals, Applications and Toxicity*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Current commercial nanocosmetic products, pp. 445–453.

## Breve reseña de los autores






### 1. Ruth Desiree Monroy

Ruth Desiree Monroy Lic. En Química. Doctorante en el programa de Doctorado en Química Tecnológica de FACYT, Universidad de Carabobo. Investigadora del Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD) con 5 años de experiencia en el campo de formulación de microemulsiones, nanoemulsiones y emulsiones para el área cosmética y del cuidado personal.

### 2. Juan Pereira

Juan C. Pereira obtuvo un B.Sc. en química y un M.Sc. en Química de la Universidad Central de Venezuela (Venezuela), Doctor en Ciencias Aplicadas 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.

# Characterization and incorporation of an extract of passion fruit seeds (*Passiflora edulis*) in a hydrogel

Emilly Scotti <sup>a</sup> , Ingrid Velásquez <sup>\*,a,b</sup> , Luis Ojeda <sup>b</sup> , Franklin Pacheco <sup>b</sup> ,  
Nirza Noguera-Machado <sup>b</sup> ,

<sup>a</sup>Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados. Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

<sup>b</sup>Instituto de Investigaciones Biomédicas Francisco Javier Triana Alonso. Facultad Ciencias de la Salud. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

**Abstract.-** The potential for reusing passion fruit seeds to obtain functional ingredients may find applications in food, chemicals and the pharmaceutical industry. Studies have confirmed that the extracts of these seeds possess pharmacological properties that include their antimicrobial and antioxidant capacity. This research proposes obtaining an extract and its characterization, to be included in a hydrogel and establish its possible antibacterial activity. The extraction was carried out under total reflux with ethanol, with a yield of  $(19,65 \pm 0,01) \%$ . When characterized, it was found that it is soluble in alcohols, and in its infrared characteristic bands of phenolic groups, OH and radicals are observed. The extract has  $(64,45 \pm 0,01) \text{ mg}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{extracto}}$  of total phenols, of which 43 % are flavonoids. To formulate the hydrogel, the response surface methodology was used, establishing the proportions of 3 % carboxymethyl cellulose, 20 % polyethylene glycol and 5 % citric acid. The hydrogel has a stability of more than 90 days, a yellowish color and a smell of passion fruit, easy to spread. Through a qualitative study, the gel produced was compared with a commercial one and its antibacterial activity, finding that both had a bacteriostatic effect on a common microbial strain.

**Keywords:** Passion fruit; seed oil; hydrogel; chemical crosslinking; polyphenols.

## Caracterización e incorporación de un extracto de semillas de parchita (*Passiflora edulis*) en un hidrogel

**Resumen.-** El potencial de reutilización de las semillas de parchita para obtener ingredientes funcionales puede encontrar aplicaciones en alimentos, productos químicos y la industria farmacéutica. Estudios han confirmado que los extractos de estas semillas poseen propiedades farmacológicas que incluyen su capacidad antimicrobiana y antioxidante. Esta investigación plantea la obtención de un extracto y su caracterización, para ser incluido en un hidrogel y establecer su posible actividad antibacterial. La extracción se realizó a reflujo total con etanol, con un rendimiento del  $(19,65 \pm 0,01) \%$ . Al ser caracterizado se encontró que era soluble en alcoholes, y en su infrarrojo se observaron bandas características de grupos fenólicos, OH y radicales. El extracto posee  $(64,45 \pm 0,01) \text{ mg}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{extracto}}$  de fenoles totales, de los cuales el 43 % son flavonoides. Para formular el hidrogel se empleó la metodología de superficie de respuesta estableciéndose las proporciones de 3 % de carboximetil celulosa, 20 % polietilenglicol y 5 % ácido cítrico. El hidrogel posee una estabilidad de más de 90 días, un color amarillento y olor a parchita, fácil de esparcir. Mediante un estudio cualitativo se comparó el gel elaborado con uno comercial y su actividad antibacterial, encontrándose que ambos generan un efecto bacteriostático sobre una cepa microbiana común.

**Palabras clave:** Maracuyá; aceite de semilla; hidrogel; entrecruzamiento químico; polifenoles.

Recibido: 26 de octubre, 2020.

Aceptado: 27 de noviembre, 2020.

### 1. Introducción

La maracuyá o parchita (*Passiflora edulis*) es una planta trepadora del género *Passiflora*, nativa de las regiones cálidas de América del Sur. Este género es el más grande y de mayor importancia de la familia Passifloraceae, abarca aproximadamente

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: ivvelasquez@uc.edu.ve (I. Velásquez)

500 especies, entre ellas, las frutas de solo unas 20 variedades son comestibles [1]. Las plantas de parchita son estratégicas en el contexto de la biodiversidad para la alimentación y la nutrición, de la masa total de la fruta entre el 4 y 12 % son semillas las cuales contienen aproximadamente un 30 % de aceite [2]. La parchita es usada en la producción de jugo, generando una gran cantidad de desechos alcanzando hasta un 40 % de las frutas procesadas [3, 4], de esta cerca del 90 % son semillas y conchas.

El aceite que se encuentra en las semillas de maracuyá tiene un alto contenido de ácidos grasos insaturados, especialmente ácido linoleico, así como tocoferoles, carotenoides y compuestos fenólicos, conocidos por tener actividad antioxidante [5]. Así, el potencial de reutilización de semillas de maracuyá para obtener ingredientes funcionales podría encontrar diversas aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, permitiendo la conversión de un residuo agroindustrial en productos de valor agregado [6].

La demanda de aceites de semillas de alta calidad asociada con el desarrollo actual del mercado de productos “bio”, “orgánicos”, “naturales” o “ecológicos” resultó en un aumento del interés en materias primas de aceite inusuales [7]. Diversas investigaciones han reportado actividad antimicrobiana de extractos de origen natural, algunos investigadores los han incorporado en formulaciones con propósitos farmacológicos como lo muestra el trabajo de Troncoso [8], quien diseñó una loción contra el acné empleando extractos de *Mangifera indica* y *Psidium guayava*, o el de Procopio [9], quien incorporó a un hidrogel un extracto glicólico de *Punica granatum L.*, o el de Cáceres [10], que formuló una crema a base de extracto hidroalcohólico de las hojas de *Schinus molle L.*, entre otros.

La propagación de enfermedades ocasionadas por el crecimiento de ciertos microorganismos patógenos, ha incrementado el uso de productos antibacteriales como los geles, que emplean como agente antimicrobiano el alcohol en altas concentraciones. Sin embargo, existen compuestos fitoquímicos que pueden ser obtenidos de frutas y semillas que presentan buena actividad antibacte-

rial y fungicida, entre otras.

La finalidad de esta investigación fue evaluar la incorporación del extracto de semillas de parchita en un hidrogel, para establecer las características que este aporta al producto final y su posible actividad antibacteriana, como una alternativa a los geles a base de alcohol.

## 2. Metodología

### 2.1. Extracción de los compuestos bioactivos del material vegetal

Las parchitas (*Passiflora edulis var. flavicarpa*) maduras fueron adquiridas en un supermercado de la localidad (Maracay-Venezuela) y conservadas a temperatura ambiente hasta su procesamiento. Las frutas fueron lavadas, cortadas y se separaron las semillas de la pulpa. Estas fueron lavadas con abundante agua, para eliminar cualquier resto de la pulpa, y colocadas en estufa a 50 °C por 48 h, hasta peso constante. Las semillas secas fueron molidas, empleando un molino manual hasta obtener un tamaño de partícula de 1 mm. La extracción se realizó a reflujo total empleando como solvente etanol al 99 % (Sigma Aldrich). La relación sólido-líquido fue de 1:10, el proceso se realizó a 70 °C/3h. Se filtró empleando un papel Whatman No. 5, y luego se concentró empleando un evaporador (Büchi B- 480 Labortechnik AG, Suiza) a 78 °C.

### 2.2. Caracterización físico química del extracto

Al extracto obtenido se le realizó una Espectrofotometría de infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR), con la finalidad de conocer los grupos funcionales empleando un espectrómetro modelo PARAGON 1000PC. También se le determinó la densidad (Covenin 703:2001) e índice de refracción (Covenin 702: 2001) y su solubilidad en alcoholes de diferentes polaridades (de etanol hasta octanol). La prueba de solubilidad consistió en colocar en un tubo de ensayo 1 mL del alcohol, y posteriormente se adicionaron 2 gotas de extracto crudo, se agitó suavemente y se verificó la disolución o no de la misma.

### 2.3. Determinación de fenoles totales

Los fenoles fueron determinados según el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (grado analítico, Merck) y la metodología propuesta por Marinova [11]. Se tomó un volumen de 50  $\mu\text{L}$  del extracto al cual se le adicionaron 125  $\mu\text{L}$  del reactivo de Folin-Ciocalteu, la mezcla se agitó y se dejó en reposo por 8 minutos. Posteriormente, se adicionaron 400  $\mu\text{L}$  de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7,1%) y se completó con agua destilada hasta 2.000  $\mu\text{L}$ . Después de 1 hora de reposo en oscuridad se leyó la absorbancia a 760 nm, empleando para ello un equipo de absorción molecular Génesis 20 (Thermo Scientific). En paralelo se prepararon soluciones de ácido gálico (Sigma-Aldrich®) entre 50–250  $\mu\text{g}/\text{mL}$  para construir la curva de calibración ( $r^2 = 0,90$ ). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por g de extracto ( $\text{mg}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{extracto}}$ ).

Se determinaron los flavonoides, donde 100  $\mu\text{L}$  de muestra fueron mezclados con 30  $\mu\text{L}$  de nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_2$  al 5% (p/v)), 30  $\mu\text{L}$  de cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$  10% (p/v)), 200  $\mu\text{L}$  de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$  a 1 M) y se completó con agua destilada hasta un volumen final de 2000  $\mu\text{L}$ . Se prepararon cinco patrones de concentración de 50–250  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , a partir de una solución patrón madre. Se leyó la absorbancia a 510 nm. Los resultados fueron expresados como  $\text{mg}_{\text{Catequina Equivalente}}/100 \text{ g}_{\text{material vegetal}}$ . Todos los valores se presentan como la media de los análisis realizados por quintuplicado  $\pm$  desviación estándar.

### 2.4. Elaboración y estabilidad del hidrogel

Los polímeros seleccionados para la elaboración del hidrogel fueron la carboximetil celulosa (CMC) y el polietilenglicol (PEG), empleando como agente entrecruzante el ácido cítrico (AC). Se fijó la concentración de CMC 3% según lo planteado por Velásquez [12], mientras que para seleccionar la concentración del PEG y AC se propuso un diseño de experimento factorial  $3^2$ , con una réplica. Los niveles seleccionados fueron 5,10 y 20% (m/m) tomando como referencia la investigación de Cuadrado [13]. El resultado es analizado por la metodología de superficie

de respuesta, siendo la variable respuesta la estabilidad del gel medida en días. Los resultados obtenidos fueron analizados empleando el software estadístico Statgraphic plus 5.1 (versión prueba). Se consideró un gel inestable o fluido cuando la red polimérica colapsa en el tiempo. Para determinar el punto de fluidez se propuso un ensayo cualitativo, donde una porción del gel se colocó sobre una placa de vidrio inclinada  $45^\circ$ , si el gel permanece en la parte superior de la placa es considerado estable, mientras que si comienza a descender se considera inestable o fluido.

Se seleccionó la combinación de polímeros que proporcionó una mayor estabilidad en el tiempo, a esta se le incorporó el extracto, tomando como referencia la concentración mínima inhibitoria reportada por Noguera [14]. Para incorporarse a la matriz polimérica, el extracto es disuelto en 5 mL de alcohol isopropílico (70% v/v). Al hidrogel obtenido se le determinó la viscosidad dinámica (Covenin 2775-93), con un viscosímetro de Brookfield digital RVT (spindle No. 6), y el grado de hinchamiento se realizó según la metodología modificada propuesta por Akalin y Pulat [15].

### 2.5. Efecto antibacterial del hidrogel

Se diseñó una prueba cualitativa que consistió en pasar un hisopo estéril sobre las manos antes y después de aplicar el hidrogel. Cada hisopo se colocó en un vial con medio Luria Bertani (LB) estéril, y se sembró usando la técnica de dispersión en placas sobre un medio LB-agar, estas fueron invertidas e incubadas  $37^\circ\text{C}/24\text{h}$  y se observó si hubo crecimiento microbiano. Se empleó como referencia un gel antibacterial comercial y el gel sin extracto.

## 3. Resultados

### 3.1. Extracción y caracterización de los compuestos bioactivos del material vegetal

Bajo las condiciones de extracción se obtuvo un rendimiento del  $(19,65 \pm 0,01)\%$ , siendo este superior al obtenido por Noguera [16], quienes realizaron la extracción alcohólica por maceración al frío obteniendo un rendimiento del

3 %. Investigaciones precedentes reportan mejores rendimientos al cambiar el método o el solvente, como Malacrida y Jorge [6], quienes obtuvieron un rendimiento del 30,39 % al realizar una extracción por Soxhlet usando éter de petróleo, o el estudio de Cardoso [17], quienes emplearon acetona en la extracción asistida por ultrasonido logrando un rendimiento del 23,8 %.

En el espectro infrarrojo (FT-IR) del extracto crudo mostrado en la Figura 1, se encontró un estiramiento de la banda  $3.370,86\text{ cm}^{-1}$  que indica la presencia de un enlace O–H pudiendo ser un alcohol o fenol, las bandas identificadas entre  $3.009,40\text{ cm}^{-1}$  y  $2854,28\text{ cm}^{-1}$  están relacionadas con los grupos funcionales típicamente de ácidos carboxílicos, aminas, amidas primarias y secundarias. La banda  $1.743,82$  característico del grupo carbonilo, mientras que la banda en  $1.458,57\text{ cm}^{-1}$  representa la presencia de aromáticos en conjunto con la banda mayor a 3.000. En general, el extracto presenta grupos fenólicos, grupos OH y grupos radicales.

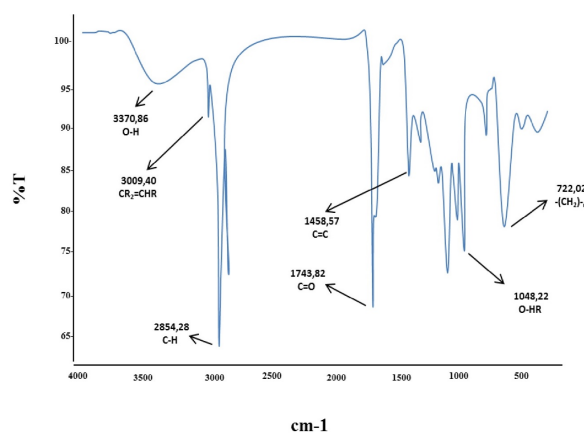


Figura 1: Espectro infrarrojo del extracto de la semilla de parchita

El extracto crudo presentó un color pardo oscuro, de aspecto poco viscoso y olor característico a parchita. La densidad e índice de refracción del extracto es comparado en la Tabla 1 con otras investigaciones realizadas sobre la *P. edulis flavicarpa*, donde el extracto se obtiene de las semillas. La diferencia entre las densidades puede deberse a la presencia de otros compuestos no cuantificados durante la extracción. En cuanto al

índice de refracción, utilizado como parámetro de control de calidad de un aceite, el valor obtenido es muy cercano a otras investigaciones, y se encuentra dentro del rango reportado para un aceite vegetal (1.465–1.468, Covenin 702:2001).

Tabla 1: Caracterización fisicoquímica del extracto de *P. edulis flavicarpa*

	Densidad (g/mL)	Índice de refracción
Extracto	$0,866 \pm 0,001$	$1,4667 \pm 0,0001$
Liu [18]	$0,9173 \pm 0,0102$	1,4731
Malacrida [6]	NR	$1,4682 \pm 0,0001$
Pereira [7]	0,9204	1,4680

El rendimiento y las propiedades fisicoquímicas de un extracto dependen del método y el solvente seleccionado al momento de la extracción.

### 3.2. Determinación de fenoles totales

En los extractos obtenidos de plantas se encuentran compuestos bioactivos, entre los que destacan los compuestos fenólicos, que aportan propiedades antioxidantes y antimicrobianas. Al evaluar la presencia de estos en el extracto de parchita, se encontró un contenido de fenoles totales de  $(64,45 \pm 0,01)\text{ mgGAE/g}_{\text{muestra}}$ , estos valores son cercanos a los reportados en investigaciones previas, como Noguera [14], donde se reportaron valores de  $(68,72 \pm 0,69)\text{ mgGAE/g}_{\text{muestra}}$ , mientras Oliveira [4] para la misma especie de *P. edulis flavicarpa* reportaron  $(75 \pm 2)\text{ mgGAE/g}_{\text{muestra}}$ . Las investigaciones muestran que, en función del material vegetal, el método de extracción y el tipo de solvente utilizado, afecta el contenido de fenoles.

En lo que respecta al contenido de flavonoides, se encontró un contenido  $(26,27 \pm 0,01)\text{ mgCatequina Equiv/100g}_{\text{muestra}}$ , lo cual representa cerca del 43 % de los fenoles totales. Este valor es superior al indicado por López [19], en cuanto a los flavonoides en un extracto metanólico, obtenido a partir de semillas y pulpa de parchita, reportando  $6,83\text{ mgCatequina Equiv/100g}_{\text{muestra}}$ , mientras que Nugraha [20], indicaron solo cualitativamente la presencia de flavonoides en el extracto etanólico, además de otros compuestos fitoquímicos como



taninos, saponinas y esteroides. Sin embargo, recientemente Alves [21], reportaron para la *P. edulis* un contenido de flavonoides de 11,42 mg/g. Entre los principales flavonoides identificados en *P. edulis* se encuentran las vitexina, isovitexina, isoorientina, apigenina, quercetina, luteolina y sus derivados, que representan clases importantes de compuestos eficaces con propiedades biológicas y farmacológicas [22, 23].

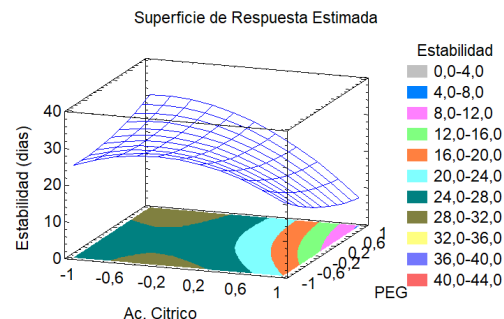
La *Passiflora edulis* ha sido la especie más analizada por su perfil fenólico. Los estudios, en total, identificaron 52 compuestos fenólicos, distribuidos en flavonoides (35 compuestos), fenólicosácidos (11 compuestos), estilbenos (cuatro compuestos) y cumarinas (un compuesto) en *P. edulis* [24]. Los extractos ricos en polifenoles, presentan varias aplicaciones de interés en la industria de alimentos como conservantes, capaces de inhibir el crecimiento bacteriano [25]. En la industria cosmética, el contenido fenólico de un aceite es utilizado para ayudar a retardar los diversos trastornos de la piel, como envejecimiento y daños ocasionados por quemaduras [26].

### 3.3. Elaboración y estabilidad del hidrogel

La elaboración del hidrogel se realizó entrecruzando la carboximetil celulosa (CMC) y el polietilenglicol (PEG) con ácido cítrico (AC), este último es un ácido tricarbónico capaz de formar enlaces covalentes entre las cadenas de polímeros por la presencia de grupos funcionales como  $-OH$  y  $-COOH$  presentes en los polímeros [27].

En el análisis de varianza mostrado en la Tabla 2, se encontró que solo el AC posee un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) lo que implica que la variación de la concentración de este afecta la estabilidad del hidrogel. En la Figura 2 se muestra la superficie de respuesta y el modelo matemático que maximiza la estabilidad del hidrogel en el tiempo, el modelo presentó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 73 %. La maximización de la respuesta se obtuvo para la concentración del 20 % PEG y 5 % AC, mientras la CMC se fijó en 3 %. Bajo estas condiciones se logró un producto estable por 30 días.

El hidrogel se preparó empleando las concentraciones que maximizan la estabilidad del mismo.



$$Est(dias) = 25,556 - 7,083 \cdot AC - 1,750 \cdot PEG - 6,583 \cdot AC^2 - 4,500(AC \cdot PEG) + 1,927 \cdot PEG^2$$

Figura 2: Superficie de respuesta para la estabilidad del hidrogel

Al incorporar el extracto, este se torna ligeramente amarillento con un aroma al fruto de parchita. La capacidad de hinchamiento fue de 207,9 %, este valor es bajo en comparación con otros hidrogeles cuya capacidad se encuentra entre (1000–1200) % [12]. Sin embargo, Barrera [28] en su estudio encontró que la matriz polimérica usada fue muy compacta observando un grado de hinchamiento de  $620 \pm 5$  % ( $pH = 7$ ) y  $500 \pm 10$  % ( $pH = 3$ ) a 40 h de un hidrogel formulado con polivinil, ácido succínico y ácido clorhídrico. En cuanto, a la viscosidad del hidrogel fue de  $(25200 \pm 1)$  cP, siendo más fluido que un gel comercial a base de alcohol cuya viscosidad fue (30,0001) cP, esta característica le permite esparcirse con menor esfuerzo al momento de su aplicación.

En la Figura 3, se muestran los espectros FT-IR para un hidrogel con y sin extracto y se compararon las bandas de absorción, encontrándose similitudes entre los mismos. Sin embargo, resalta una banda en  $2925,10 \text{ cm}^{-1}$  correspondiente al grupo fenólico. Esto pudiese sugerir que el extracto quedó ocluido en la red polimérica. La interacción entre los polímeros y el extracto viene dada por fuerzas intermoleculares del tipo puentes de hidrogeno, fuerzas de van der Waals, que lo mantienen unidas a las moléculas. Un fenómeno parecido fue observado por González [29], quienes evaluaron el FT-IR de un hidrogel (poliacrilamida/polihidroxibutirato-

Tabla 2: Análisis de Varianza para Estabilidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Acitrico	602,083	1	602,083	14,74	0,0028
B:PEG	36,75	1	36,75	0,9	0,3632
AA	173,361	1	173,361	4,24	0,0639
AB	162	1	162	3,97	0,0718
BB	14,6944	1	14,6944	0,36	0,5608
Bloque	174,222	1	174,222	4,27	0,0633
Error total	449,333	11	40,8485		
Total (corr.)	1612,44	17			

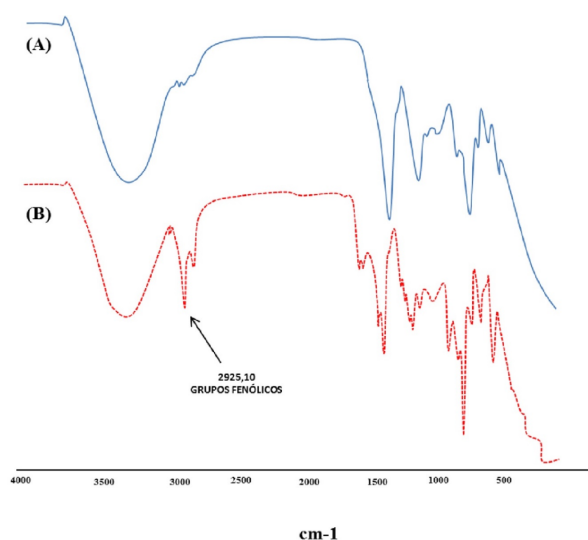


Figura 3: Espectro infrarrojo del gel formulado. (A) línea negra sin extracto, (B) línea roja con extracto de *Passiflora edulis*

cohidroxivalirato) con la incorporación de un biopolímero, y observaron la aparición de una banda en el espectro del gel que correspondía al biopolímero. Los resultados obtenidos mostraron que fue posible incorporar el extracto de la semilla de *Passiflora edulis* al hidrogel, las bandas reflejan la presencia de grupos fenólicos que pueden atribuir propiedades antioxidantes y antibacteriales al mismo.

### 3.4. Efecto antibacterial del hidrogel

Para establecer la posible acción antibacterial del gel, se realizó una comparación cualitativa entre el hidrogel con y sin extracto, y un gel comercial adquirido en el mercado. En la Figura 4a se muestra el hisopado realizado antes de aplicar

el hidrogel, en esta se evidencia el crecimiento de microorganismos. Al aplicar el hidrogel sin extracto que contiene solo un 5% de alcohol, se observó también un crecimiento, pero en menor proporción a la referencia o muestra sin gel como se observa en la Figura 4b, la cantidad de alcohol presente no es suficiente para inhibir el crecimiento en el medio.

Sin embargo, al aplicar el gel con extracto se encontró que este es capaz de inhibir el crecimiento de microorganismo, como se observa en la Figura 4c, es decir, la sustancia bioactiva incorporada inhibe el crecimiento de microorganismos evidenciando así un efecto antibacterial. El mismo efecto antibacterial se observó en la Figura 4d donde se emplea un gel comercial a base de alcohol. Tanto el gel con extracto como el comercial muestran un efecto bacteriostático sobre el crecimiento de microorganismos.

Se conoce que los extractos puros poseen propiedades antimicrobianas, según lo indicado por Noguera [14, 16], y López-Vargas [30]. En esta investigación la inclusión de sustancias bioactivas como polifenoles en redes poliméricas no interfiere con su acción antimicrobiana, o antioxidante. S. Shanmugam y T. Parimelazhagan [31], afirman que la inclusión de estos compuestos en las formulaciones desarrolladas en la industria farmacéutica o de alimentos le proporciona propiedades que incluyen capacidad antioxidante, antiinflamatoria, analgésica, antiespasmódica, y antimicrobianas [31].

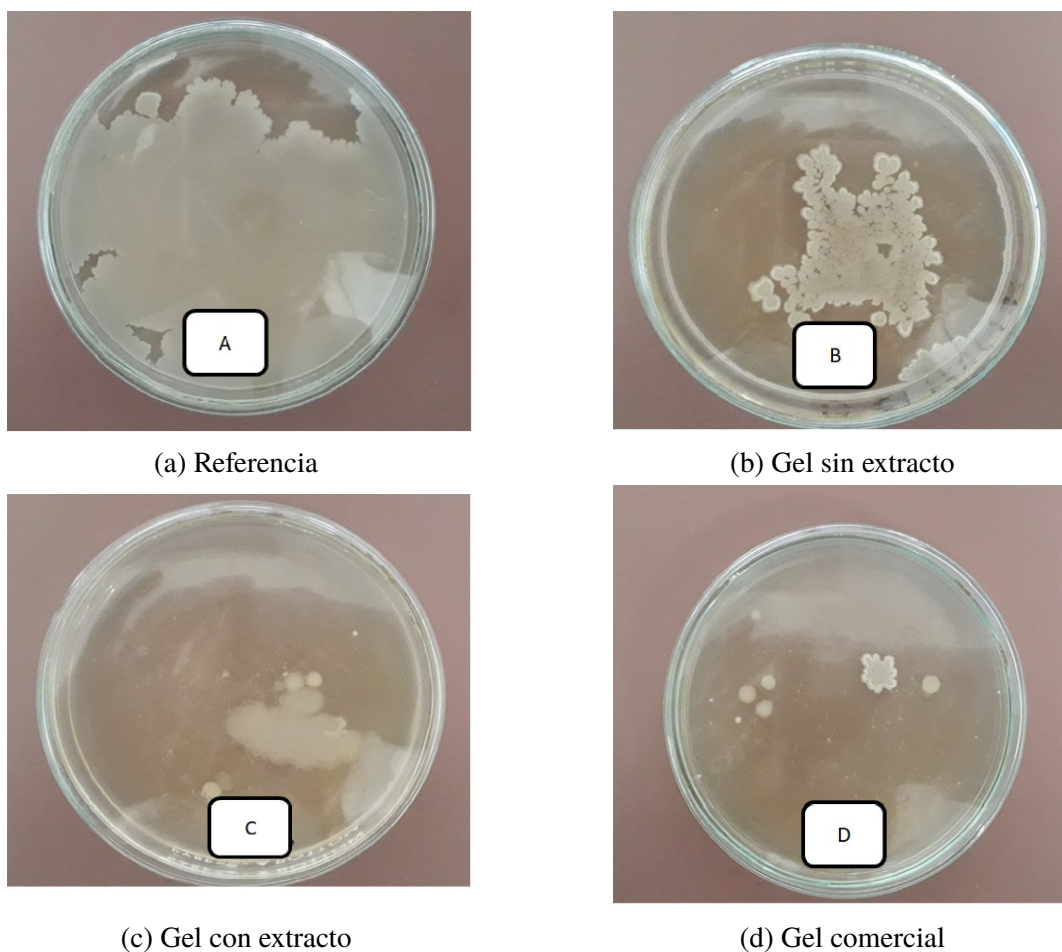


Figura 4: Crecimiento de microorganismos en placa antes y después de aplicar el gel

#### 4. Conclusión

La concentración del agente entrecruzante tiene un rol relevante en la estabilidad del hidrogel en el tiempo, al igual que en su capacidad de hinchamiento. El hidrogel presentó una apariencia viscosa, pero de fácil esparcimiento sobre una superficie, con un aroma a parchita. La incorporación del extracto además de proporcionar características físicas favorables, le confiere propiedades antibacteriales que provocan un efecto bacteriostático sobre el crecimiento de microorganismo. Además, los compuestos fitoquímicos como los polifenoles y flavonoides le aportan propiedades antioxidantes que son importantes en el cuidado de la piel. La inclusión de estos compuestos es una buena alternativa a los geles a base de alcohol.

Por otra parte, se encontró que las redes poliméricas como los hidrogeles son buenos vehículos

al momento de transportar moléculas bioactivas permitiendo que su actividad antimicrobiana o antioxidante no se vea afectada.


#### 5. Referencias

- [1] K. Dhawan, S. Dhawan, and A. Sharma, "Passiflora: a review update," *Journal Ethnopharmacol*, vol. 94, no. 1, pp. 1–23, 2004.
- [2] D. Oliveira, M. Angonese, C. Gomes, y S. Ferreira, "Valorization of pasión friut (*Passiflora edulis* sp.) by product: Sustainable recovery and biological activities," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 11, pp. 55–62, 2016.
- [3] J. Amaya, *El Cultivo del Maracuyá (*Passiflora edulis* form. *Flavicarpa*)*. La Libertad, Trujillo-Perú: Gerencia Regional Agraria, 2009.
- [4] J. Lousada, J. Correia, J. Miranda, and N. Rodríguez, "Caracterização físico-química de subprodutos obtidos doprocessamento de frutas tropicais visando seu aproveitamento naalimentação animal," *Revista Ciência Agronômica*, vol. 37, no. 1, pp. 70–76, 2006.

- [5] B. S. Ferreira, C. G. De Almeida, L. P. Faza, A. De Almeida, C. G. Diniz, V. L. Da Silva, R. Grazul, and M. Le Hyaric, "Comparative properties of amazonian oils obtained by different extraction methods," *Molecules*, vol. 16, pp. 5874–5885, 2011.
- [6] C. Malacrida and J. Neuza, "Yellow passion fruit seed oil (*Passiflora edulis f. flavicarpa*): physical and chemical characteristics," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 127–134, 2012.
- [7] M. G. Pereira, G. M. Maciel, C. W. I. Haminiuk, F. Bach, F. Hamerski, A. Scheer, and M. Corazza, "Effect of Extraction Process on Composition, Antioxidant and Antibacterial Activity of Oil from Yellow Passion Fruit (*Passiflora edulis Var. Flavicarpa*) Seeds," *Waste Biomass Valor*, vol. 10, pp. 2611–2625, 2019.
- [8] M. Troncoso, S. Gajardo, J. Benites, J. Lopez, y M. Arredondo, "*Mangifera indica* y *Psidium guayava*: determinación de la actividad antimicrobiana de las cáscaras liofilizadas en la formulación de una loción hidroalcohólica para el acné," *BIOFARBO*, vol. 18, no. 2, pp. 1–9, 2010.
- [9] L. Procopio, "Avaliação da biocompatibilidade e atividade antimicrobiana in vitro da matriz de hidrogel associada ao extrato glicólico de *Punica granatum L. (romã)*," Dissertação apresentada parte dos requisitos para obtenção do título de M.Sc. em Biopatologia Bucal, Área de Microbiologia e Imunologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2017.
- [10] F. Cáceres, "Formulación de una crema a base de extracto hidroalcohólico de las hojas de *Schinus molle L. (molle)*," Tesis para obtener el título profesional de Químico farmacéutico, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga-Perú, 2018.
- [11] D. Marinova, F. Ribarova, and M. Atanassova, "Total phenolics and total flavonoids in bulgarian fruits and vegetables," *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 40, no. 3, pp. 255–260, 2005.
- [12] I. Velásquez, R. Camacaro, y D. Dasniel, "Evaluación de la capacidad antimicrobiana de sales de amonio cuaternario en un hidrogel," *Ingeniería y Sociedad UC*, vol. 13, no. 2, pp. 152–161, 2018.
- [13] P. de Cuadro, T. Belt, K. S. Kontturi, M. Reza, E. Kontturi, T. Vuorinen, and M. Hughes, "Crosslinking of cellulose and poly(ethylene glycol) with citric acid," *Reactive & Functional Polymers*, vol. 90, pp. 21–24, 2015.
- [14] N. Noguera-Machado, L. Ojeda, M. Jiménez, M. Kremisisky, I. Velásquez, y F. Pacheco, "Evaluación del extracto hidroalcohólico de las semillas de *Passiflora Edulis* y su efecto sobre el crecimiento de *Escherichia coli* (ATCC 25922)," *Revista Saber UDO*, vol. 31, pp. 248–255, 2019.
- [15] G. Akalin and M. Pulat, "Preparation and Characterization of Nanoporous Sodium Carboxymethyl Cellulose Hydrogel Beads," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018.
- [16] N. Noguera, L. Ojeda, M. Jiménez, y M. Kremisisky, "Evaluación del potencial antibacteriano de extractos de semillas de cinco frutas tropicales," *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2017.
- [17] R. Cardoso, S. Davantel, and M. Gimenes, "The extraction of passion fruit oil with green solvents," *Journal Food Engineering*, vol. 117, no. 4, pp. 458–463, 2013.
- [18] S. Liu, F. Yang, J. Li, C. Zhang, H. Ji, and P. Hong, "Physical and chemical analysis of *Passiflora* seeds and seed oil from China," *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, vol. 59, no. 7, pp. 706–715, 2008.
- [19] J. López, J. Fernández, J. Pérez, and M. Viuda, "Chemical, physicochemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) co products," *Food Research International*, vol. 51, pp. 756–763, 2013.
- [20] S. Nugraha, A. Suryadi, and E. Sitompul, "Antibacterial activity of ethanol extract of purple passion fruit peel (*Passiflora edulis Sims*) on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*," *Indonesian Journal Pharmacy. Clinical. Research*, vol. 1, no. 2, pp. 29–34, 2018.
- [21] J. Alves, J. Márquez, D. P. Demarque, L. Costa, J. Amaral, N. Lopes, A. da Silva-Junior, L. Soares, E. Gavioli, L. Ferreira, and S. Zucolotto, "Involvement of Isoorientin in the Antidepressant Bioactivity of a Flavonoid-Rich Extract from *Passiflora edulis f. flavicarpa* Leaves," *Revista Brasileira de Farmacognosia*, vol. 30, pp. 240–250, 2020.
- [22] F. Xu, C. Wang, L. Yang, H. Luo, W. Fan, C. Zi, F. Dong, J. Hu, and J. Zhou, "C-dideoxyhexosyl flavones from the stems and leaves of *Passiflora edulis Sims*," *Food Chemistry*, vol. 136, no. 1, pp. 94–99, 2013.
- [23] J. Zhang, R. Koike, A. Yamamoto, M. Ukiya, M. Fukatsu, N. Banno, M. Miura, S. Motohashi, H. Tokuda, and T. Akihisa, "Glycosidic inhibitors of melanogenesis from leaves of *Passiflora edulis*," *Chemistry & Biodiversity*, vol. 10, no. 10, pp. 1851–1865, 2013.
- [24] I. Gadioli, M. Barreto, M. Oliveira, A. Costa, and L. Lacerda, "A systematic review on phenolic compounds in *Passiflora* plants: Exploring biodiversity for food, nutrition, and popular medicine," *Journal Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 58, no. 5, pp. 785–897, 2018.
- [25] A. Olszewskaa, A. Gędas, and M. Simões, "Antimicrobial polyphenol-rich extracts: Applications and limitations in the food industry," *Food Research International*, vol. 134, p. 109214, 2020.
- [26] M. Dzialo, J. Mierziak, U. Korzun, M. Preisner, J. Szopa, and A. Kulma, "The Potential of Plant Phenolics in Prevention and Therapy of

- Skin Disorders,” *International Journal of Molecular Science*, vol. 17, no. 2, p. 160, 2016.
- [27] D. Soto y H. Oliva, “Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 32, no. 2, pp. 154–175, 2012.
- [28] C. Barrera, “Síntesis y evaluación antimicrobiana de una formulación basada en hidrogel con propiedades “Slow Release”, de ampicilina frente a cepas de *Escherichia coli*,” Memoria para optar al grado de Licenciado en Tecnología Médica, Universidad de Talca, Chile, 2019.
- [29] N. González, A. El-Halah, J. M. Contreras, y B. Rojas, “Estudio de la capacidad de absorción en hidrogeles semiinterpenetrados de poliacrilamida/poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalirato),” *Revista Colombiana de Química*, vol. 47, no. 3, pp. 5–12, 2018.
- [30] J. López-Vargas, J. Fernández, A. Pérez, and M. Viuda, “Chemical, physico-chemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa*) co-products,” *Food Research International*, vol. 51, no. 2, pp. 756–763, 2013.
- [31] S. Shanmugam and T. Parimelazhagan, “Total phenolic content, Free radical scavenging and Antimicrobial activities of *Passiflora subpeltata* seeds,” *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, vol. 3, no. 4, pp. 67–72, 2013.

# Design of low power fast full adder using Domino Logic based on magnetic tunnel junction (MTJ) and memristor

Pooria Parvizi <sup>a</sup> , Reza Sabbaghi-Nadooshan <sup>\*,b</sup> , Mohammad Bagher Tavakoli <sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Electrical Engineering Department, Islamic Azad University of Arak, Arak, Iran.

<sup>b</sup>Electrical Engineering Department, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

**Abstract.-** Domino CMOS circuits are widely used in high-performance very large scale integrated (VLSI) systems. The topology of domino circuits for high-speed operation, lower power consumption and robustness is of great importance in designing digital systems. The present paper proposes a low-power high-speed full adder circuit, which uses a new CMOS domino logic family based on magnetic tunnel junction (MTJ) elements and memristor in gate diffusion input (GDI) technique. In comparison with a static CMOS logic circuit, a dynamic logic circuit is of importance since it provides higher speed and requires fewer transistors. In comparison with the recently proposed circuits for dynamic logic styles, very low dynamic power consumption and less delay are the features of the proposed circuit. The problem with dynamic circuits is the lack of a stable output at different times, while the proposed circuit preserves the output value using memory elements such as MTJ and memristor during the clock cycle. The proposed technique shows a maximum power consumption of  $0,317 \mu\text{W}$  in MTJ/memristor-based full adders. Moreover, the proposed technique shows a maximum delay of 0,35 ns. The proposed full adder is simulated, and its power dissipation and performance are analyzed using HSPICE in standard 7 nm CMOS technology.

**Keywords:** MTJ; Memristor; Domino Logic; Full Adder.

## Diseño de sumador completo rápido de baja potencia utilizando Domino Logic basado en Unión de Túnel Magnético (UTM) y Memristor

**Resumen.-** Los circuitos CMOS de Domino se utilizan ampliamente en sistemas integrados de gran escala (VLSI) de alto rendimiento. La topología de los circuitos dominó para operación de alta velocidad, menor consumo de energía y robustez es de gran importancia en el diseño de sistemas digitales. El presente artículo propone un circuito sumador completo de baja potencia y alta velocidad, que utiliza una nueva familia lógica de dominó CMOS basada en elementos de unión de túnel magnético (UTM) y memristor en la técnica de entrada de difusión de puerta (GDI). En comparación con un circuito lógico CMOS estático, un circuito lógico dinámico es importante ya que proporciona una mayor velocidad y requiere menos transistores. En comparación con los circuitos propuestos recientemente para estilos lógicos dinámicos, las características del circuito propuesto son un consumo de energía dinámica muy bajo y menos retardo. El problema con los circuitos dinámicos es la falta de una salida estable en diferentes momentos, mientras que el circuito propuesto conserva el valor de salida utilizando elementos de memoria como UTM y memristor durante el ciclo de reloj. La técnica propuesta muestra un consumo máximo de energía de  $0,317 \mu\text{W}$  en sumadores completos basados en MTJ/Memristor. Además, la técnica propuesta muestra un retraso máximo de 0,35 ns. Se simula el sumador completo propuesto, y su disipación de potencia y rendimiento se analizan utilizando HSPICE en tecnología CMOS estándar de 7 nm.

**Palabras clave:** MTJ; Memristor; Domino Logic; Sumador completo.

Received: August 25, 2020.

Accepted: September 21, 2020.

### 1. Introduction

In last few years, the use of internet of things (IoT) devices, cell phones, tablets and

sensors has been dramatically increased. Most of these devices are battery-powered, so power consumption (battery life) can be considered as a design challenge. Consequently, researchers have attempted to present new techniques to design low-power electronics [1]. Non-conventional CMOS and nano-technology pave the way for designing low-power electronics, which reduce the leakage

\* Correspondence author:

e-mail: r\_sabbaghi@iauctb.ac.i (R. Sabbaghi-Nadooshan)

power consumption, so low-power applications can rely on emerging technologies in this area [2]. For reducing dynamic power consumption, the energy stored in load capacitors can be recovered instead of being dissipated as heat. This technique is referred to as adiabatic (reversible) circuit design [3].

Magnetic tunnel junction (MTJ) is a non-volatile memory with short access time and small dimensions as well as compatibility with CMOS technology [4]. Thus, it is well suited for using in logic-in-memory (LiM) architectures. LiM structures use MTJs and are very suitable for low-power designs because of almost zero static power dissipation. A memristor is also used as a memory element in this paper to design 1-bit full adder based on domino logic, and the results are eventually compared with MTJ family. In the following of this section, we will introduce the works that have been done in these fields.

Low-power designs are of great importance as the demand for battery-operated portable devices is ever-increasing. In a large number of this type of devices, the battery life is more important than the operating speed. Nano-devices and adiabatic designs are used in LiM structures to reduce, respectively, the static and dynamic power consumption. As an emerging technology, MTJ has many advantages when used in LiM structures along with CMOS technology. Sharifi [5] introduces a new adiabatic hybrid MTJ/CMOS structure for designing AND/NAND, exclusive-OR (XOR)/XNOR and 1-bit full adder circuits. The power consumption of the proposed adiabatic MTJ/CMOS full adder is more than 7 times less than those of the previous MTJ/CMOS full adders. In [6], the presented domino logic is based on MTJ elements in gate diffusion input (GDI) technique. A dynamic logic circuit is more interesting than a static CMOS logic circuit since it has higher speed and requires fewer transistors. In comparison with the recently proposed circuits for dynamic logic styles, very low dynamic power consumption and less delay are the features of the proposed circuit. Additionally, the proposed circuit shows extreme fault tolerance. A Monte Carlo simulation proves the fault tolerance of the full adder proposed in this reference. Standard 0,18  $\mu\text{m}$  CMOS technology

is used to simulate the proposed full adder. Both memory cell and sensing amplifier in this type of circuit, however, are less reliable, and this greatly limits the practical application of this type of circuit in logic computation. To resolve this issue, a new magnetic full adder (MFA) is presented in [7] based on pre-charge sensing amplifier (PCSA) and thermally assisted switching (TAS)-MTJ cell. Using the 65 nm CMOS technology and a precise TAS-MTJ model, mixed simulations are performed to show the high reliability while keeping low power consumption and small die area.

A few years ago, practical memristors were introduced and very soon attracted the interest of researchers and scientists. A memristor is the fourth basic two-terminal passive circuit element apart from well-known resistor, capacitor and inductor. Recently, memristor-based architectures have gained much attention from many researchers.

In this paper, we design memristor-based AND, OR and XOR gates. Using these gates, a memristor-based full adder circuit is proposed. The simulation results of the proposed circuit with these gates are reported. The remarkable improvements in the proposed circuit, compared to the conventional circuits, are lower power consumption by 54,74 %, less delay by 14,84 and using fewer transistors [8].

## 2. Background

The noise margin in domino logic is lower than that of static CMOS logic, so a relatively higher sensitivity towards noise source can be expected in domino logic circuits. Downscaling of the technology enhances noise immunity of domino logic circuits, while the power consumption of the circuit also increases. For reducing the consumed power, the supply voltage is scaled down, so the circuit delay increases. To compensate this delay, both the supply and threshold voltage scaling are performed. Reduction in the threshold voltage leads to a higher speed domino logic, while the noise immunity of the circuit decreases due to an increase in subthreshold leakage current [9, 10]. The thickness of the gate oxide is reduced as a result of downscaled technology, and this leads

to an exponential increase in gate leakage and subthreshold currents. These leakage currents may discharge the precharge node of domino circuits. Therefore, at high frequencies, leakage currents, low threshold voltage and noise sources degrade the performance of domino logic circuits [11].

Power consumption of CMOS full adders can be reduced by some techniques:

- Output and input capacitances can be minimized to reduce the dynamic power.
- Simultaneous use of both V<sub>DD</sub> and GND in circuit components should be avoided to reduce the short and static power.
- For fewer transistors, we can use a pass transistor in a circuit; this reduces power consumption, while sometimes causes threshold losses.
- By varying the W/L ratio to minimize transistor conduction.

Various components of power consumption can be reduced by scaling down the device dimensions and supply voltage. The scaling down increases the leakage current due to the unfavorable short channel effects (SCEs) [12, 13, 14]. These effects decrease the effective channel length, which in turn, decreases the threshold voltage. Many research works have been conducted for reducing the power consumption in domino logic circuits [15, 16, 17].

### 2.1. Domino logic styles

To implement high-speed high-performance microprocessors, domino logic is more suitable than other dynamic logic styles since it requires less area and lower power [18]. Domino logic uses only one PMOS transistor in pull-up network (PUN) [13], so the area and the power consumption in domino logic is reduced compared to dynamic CMOS logic that uses *n* (number of inputs) PMOS transistors in the PUN.

The effects of leakage current and charge sharing on the dynamic node are prevented by the keeper transistor MK. The keeper ratio *K* is given by equation (1)

$$K = \frac{W_{Keeper}}{W_{PDN}}, \quad (1)$$

where  $W_{Keeper}$  is the keeper transistor width and  $W_{PDN}$  is the evaluation transistor width in the PDN. The upsizing of keeper transistor MK enhances the robustness of the circuit by trading off the speed performance [15].

The control of the keeper circuit uses the following items:

1. delayed enabling of the keeper circuit,
2. abrupt keeper control mechanism,
3. keeper control signal with voltage swing variation,
4. keeper mechanisms with process variation tolerance and
5. bias voltage variation of the keeper device.

Other topologies based on PDNs with an additional discharge path have also been proposed in the literature. This modification results in increased operating speed and reduction in leakage current [15, 19]. Figure 1 shows a conventional domino logic circuit.

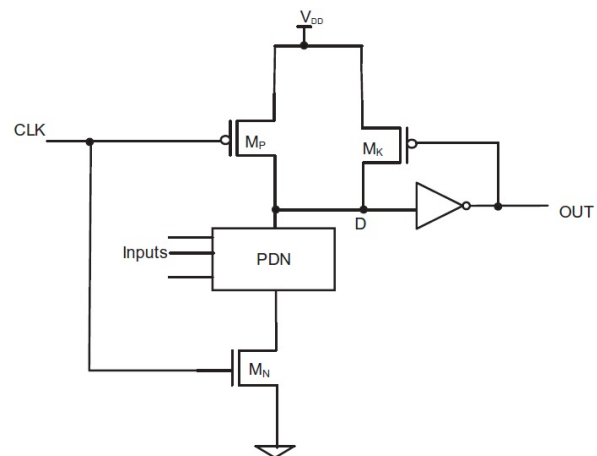


Figure 1: Conventional domino logic circuit

Figure 2a depicts a high-speed domino (HSD) logic [20]. In the leakage current replica (LCR) keeper technique shown in Figure 2b, an analog current mirror circuit controls the strength of the keeper device, which depends on the leakage current of PDN [21].

An additional keeper transistor and the existing conventional keeper transistor decrease the loop



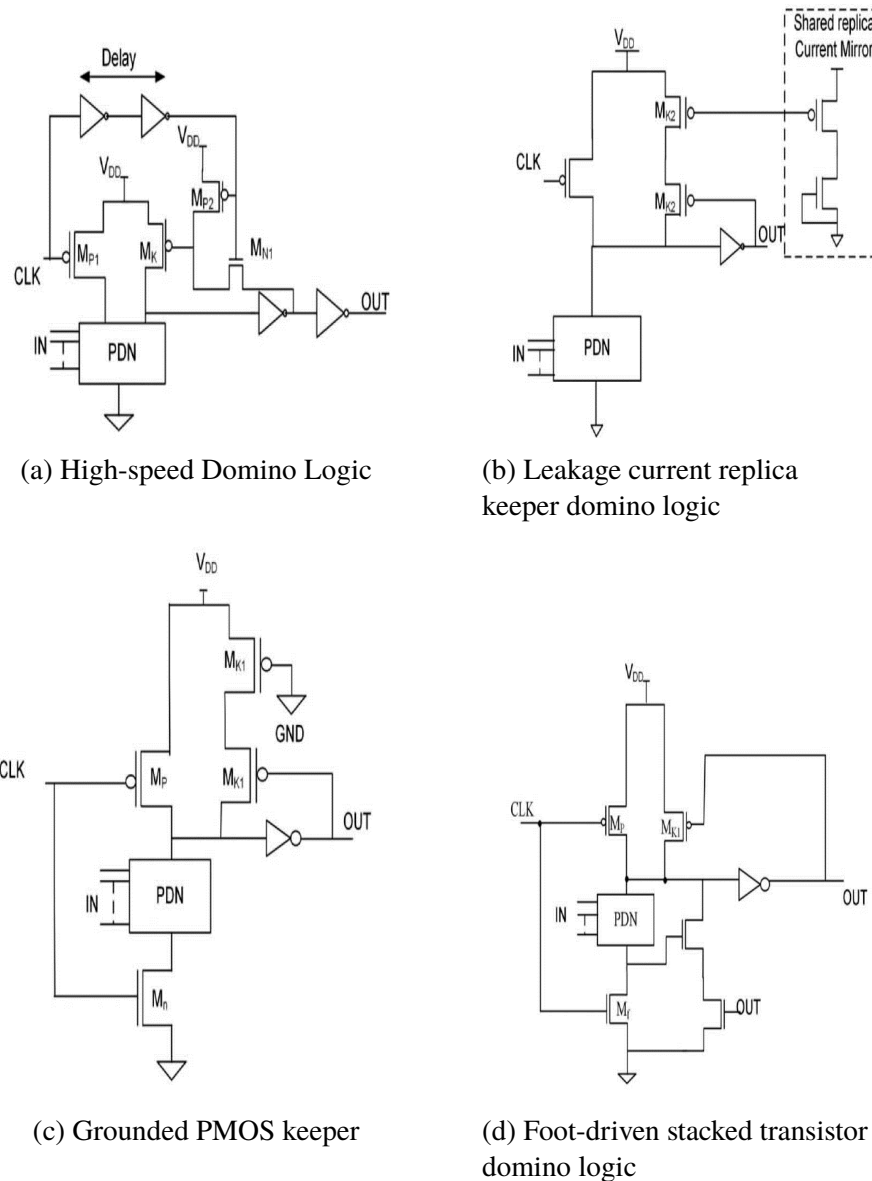


Figure 2: Existing domino logic circuit

gain and the delay variability in the grounded PMOS keeper structure depicted in Figure 2c [22]. The additional discharge path is controlled by the output and foot node voltages in foot-driven stacked transistor domino logic (FDSTD) as shown in Figure 2d.

A CDDK circuit uses the principle of delayed enabling of keeper circuit, which consists of two PMOS keeper transistors in series. The delayed enabling of keeper circuit decreases the contention current between the keeper transistor and PDN. Therefore, if the PDN evaluates a TRUE condition, it facilitates faster discharge of the dynamic

nodal charge through PDN, and this increases the operating speed of the circuit. In domino logic circuits, variations in the process parameters and feedback loop gain contribute considerably to the delay variability [23, 24]. These issues emphasize the need for identifying appropriate improvement techniques.

## 2.2. Magnetic Tunnel Junction (MTJ) Review

Magnetic tunnel junction comprises two ferromagnetic (FM) layers and an oxide barrier layer sandwiched between these two layers (Figure 3). Parallel and antiparallel configurations can be

realized according to the FM layers alignment. These two configurations are behind the low resistance (RP) or high resistance (RAP) behaviors of MTJ [25]. Therefore, these behaviors can be used in LiM designs.

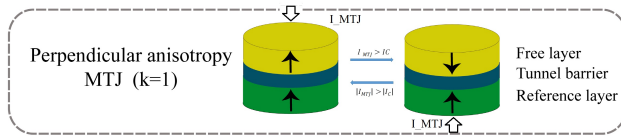


Figure 3: Vertical MTJ nanopillar structure. MTJ states change from P to AP and vice versa by applying a current ( $I_{MTJ}$ ) higher than the critical current ( $I_C$ )

The techniques proposed for switching MTJ configurations are as follows: field induced magnetization switching (FIMS), thermally assisted switching (TAS) and spin torque transfer (STT). Spin torque transfer is the most promising technique, which is considered as a replacement for the other two techniques. This technique needs only a bi-directional low switching current. The states of the MTJ are switched when the current of MTJ ( $I_{MTJ}$ ) becomes higher than a critical current [26]. FIMS is the conventional approach for switching MTJ states, RAP and RP, which depend on the applied magnetic field. The disadvantages of this method are high power consumption, poor selectivity and poor scalability, which result from high switching currents.

### 2.3. Memristor

Custom neuromorphic hardware platforms are of great interest for accelerating neural network algorithms since they can perform complex tasks that are analogous to the physical processes in biological nervous systems [27]. A fundamental feature of these systems is their capability to overcome the restrictions [28]. The modern CMOS technology is employed to mimic the behavior of neurons; however, the lack of a device for effectively performing synaptic operations has hindered the advancement in this area for several years.

We propose a domino logic architecture for memristor-based neuromorphic computing. The architecture uses a simple binary neuron activation function and the delay of memristor RC circuits to perform synaptic computations. Synchronization schemes are presented to communicate information between the layers of neural network, and a simple linear power model is developed to estimate the energy efficiency of the architecture for a particular network size.

#### 2.3.1. Memristor Modeling

Chua and Kang introduced physical memristive devices; however, the area of memristors and memristive devices has not drawn any interest for more than 35 years. In 2008, the theory of memristive devices was developed by Hewlett Packard researchers, and this theory was implemented in  $TiO_2$  resistive switches. Hewlett Packard researchers proposed a device, which was claimed to be similar to an ideal memristor when it came to the structure and behavior of the device.

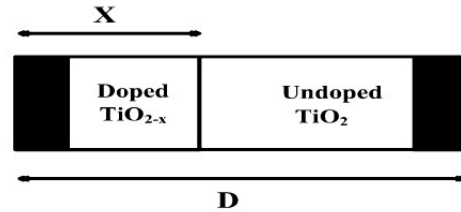


Figure 4: Hewlett Packard original device model



Figure 5: Equivalent circuit of memristor

The proposed structure is shown in Figure 4, and the equivalent electrical circuit of the memristor is shown in Figure 5. Time-dependent voltage and current can be expressed with equations (2), (3) and, (4) [29]:

$$v(t) = R(t) \cdot i(t) \tag{2}$$

$$R(t) = \frac{R_{on}w(t)}{D} + \frac{R_{off}(1 - w(t))}{D} \quad (3)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \frac{\mu v R_{on}}{D} \cdot i(t) \quad (4)$$

where  $R_{on}$  is the resistance for  $x(t) = D$ , and  $R_{off}$  is the resistance for  $x(t) = 0$ ;  $x(t)$  is the state variable over  $[0, D]$ .

Memristors are characterized by relatively short switching time, high endurance and low switching energy (typically 0,1–1 PJ), so memristive technologies are basically studied for memory applications [30, 31, 32, 33].

The symbol of memristor is shown in Figure 6. When current flows into (out of) the black strip, memristance decreases (increases) [34]. However, plotting the current flowing in the memristor versus the voltage across it results in a hysteresis loop (Figure 7), which is always pinched at the origin.

### 2.3.2. Physics Of Hysteresis Loop

Sinusoidal current  $i(t)$  can lead to hysteresis. In this case, maxima and minima are shifted with respect to the corresponding memristor voltage  $v(t)$ . When both  $i(t)$  and  $v(t)$  become simultaneously zero, pinching occurs. The memristor can reach a maximum value of  $R_{off}$  and a minimum value of  $R_{on}$ . The maximum resistance can be expressed by the amplitude of input parameters. Many research works [35, 36, 37, 38, 39] have used mathematical models of memristor but a nonlinear dopant drift memristor model has been used for simulation of the proposed circuits [29].

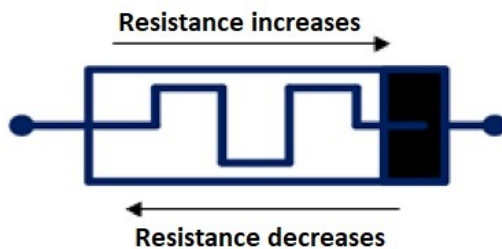


Figure 6: Symbol of memristor

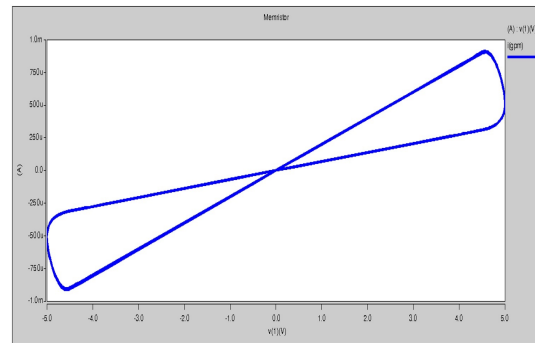


Figure 7: Hysteresis curve of memristor model (current–voltage pinched hysteresis loop)

### 2.4. Pseudo Domino Circuit

The pseudo domino logic outperforms domino logic because of precharge pulse propagation. A pseudo domino circuit [40] connects source node of the nMOS of the inverter to the drain terminal of the evaluation MOS at node A, instead of ground (Figure 8a). Thus, the value at node Z cannot propagate to the output node F in precharge phase, when the evaluation transistor N1 is off. This connection saves up to 32 % more power than conventional domino logic designs. This topology essentially improves the performance during the precharge phase. The pseudo domino logic circuit experience charge sharing and leakage issues because of short circuit paths. These issues can be resolved by using a keeper circuit.

The voltage drop at output node occurs because of charge sharing issue. In Figure 8b, when all inputs of pull-down network are equal to 1 in precharge phase, the threshold voltage drops at the output node Z. This voltage drop can be propagated to node F. The output voltage is redistributed on capacitances C1 and C2 as transistor N2 is ON. Therefore, the speed and power dissipation of the circuit are deteriorated, so a voltage drop occurs at output node F. If the value of output load capacitance C1 is equal to the node capacitance C2, then the voltage at output node reaches  $VDD/2$ .

Two methods can be used as solutions: 1) using a load capacitor with a capacitance much greater than any other charge sharing capacitance [40] and 2) using a keeper circuit [41]. Different keeper techniques are used in pseudo domino logic for power dissipation in this reference.

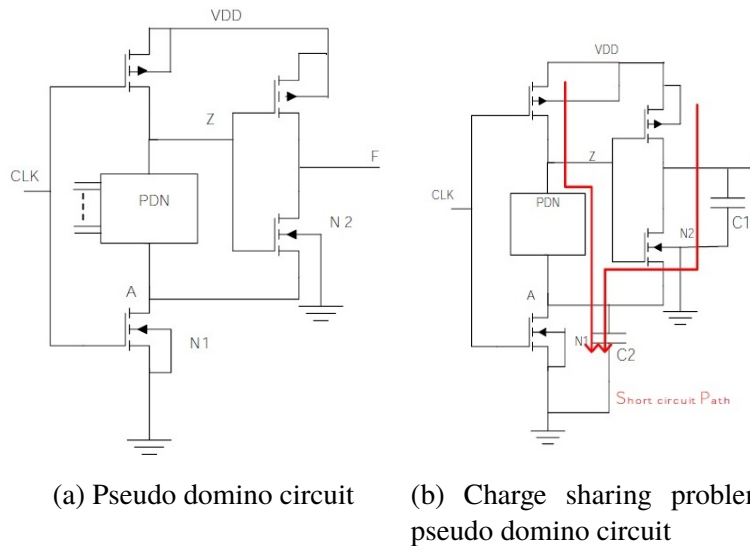


Figure 8: Pseudo domino

### 3. Proposed preamplifier topology

A new method is proposed in this section to design a domino logic. The proposed domino logic circuit shown in Figure 9, has a higher speed than conventional domino logic circuits.

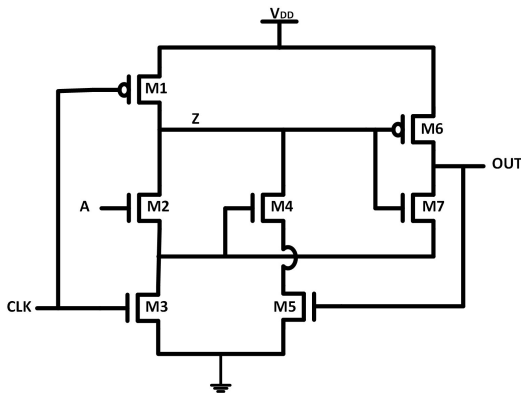


Figure 9: The proposed domino logic circuit

The circuit consists of two clock transistor elements. In this circuit, when the clock and A both are low, Z will be high and the output node will not change. The same is true when the clock is grounded and input A is high. When the clock and A both are high, both Z and the output will be high. When the clock is high and input A is low, Z will not change. In this condition, if Z is high (grounded), the output will be low (high).

Now, a full adder based on the novel domino logic circuit as well as MTJ and memristor

components as shown in Figure 10. In the proposed circuit, MTJ components are used in the output inverter to improve the circuit performance to stay at stable values. Additionally, to reduce the delay due to the use of memory elements in these circuits, we use discharge transistors to remove the electric charge from the z-storage node. This reduces the power consumption and delays the main nodes.

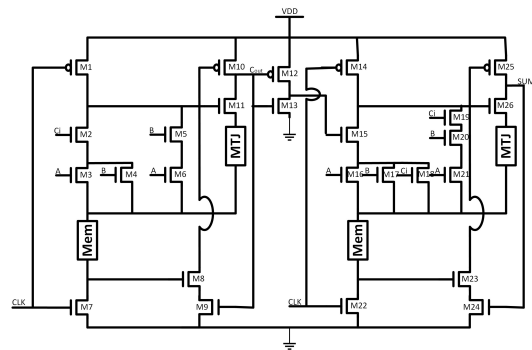


Figure 10: Schematic of the proposed final full adder based on MTJ and memristor

### 4. Simulation results

The simulation results of the proposed domino logic and full adder are presented in this section.

Figure 11 shows the simulation results of the proposed domino logic. The delay of this domino is plotted in Figure 12. As can be seen, the delay of this circuit is about 2 ns.

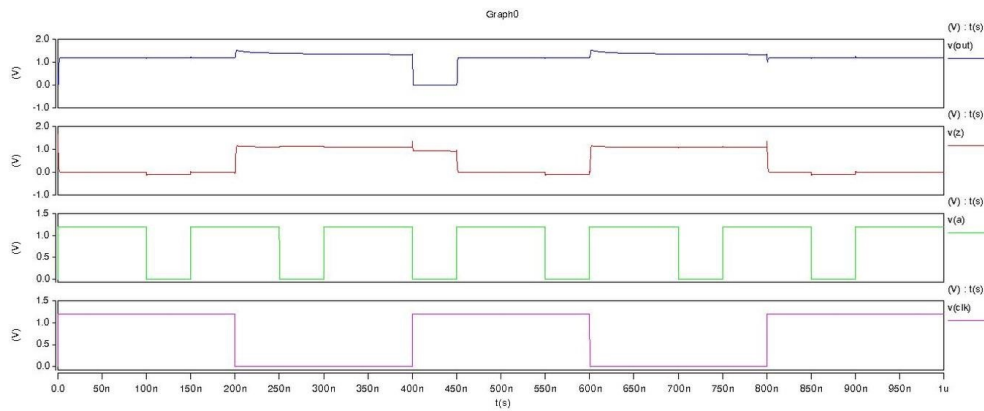


Figure 11: Simulation results of the proposed domino logic

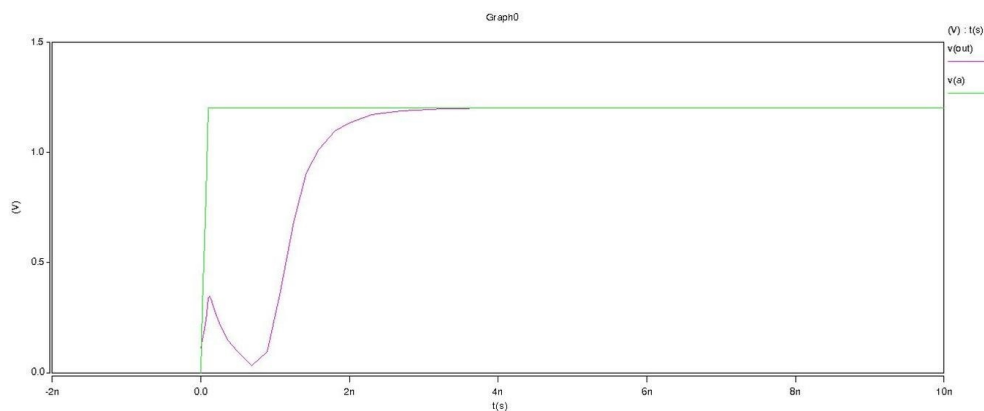


Figure 12: Delay of the proposed domino

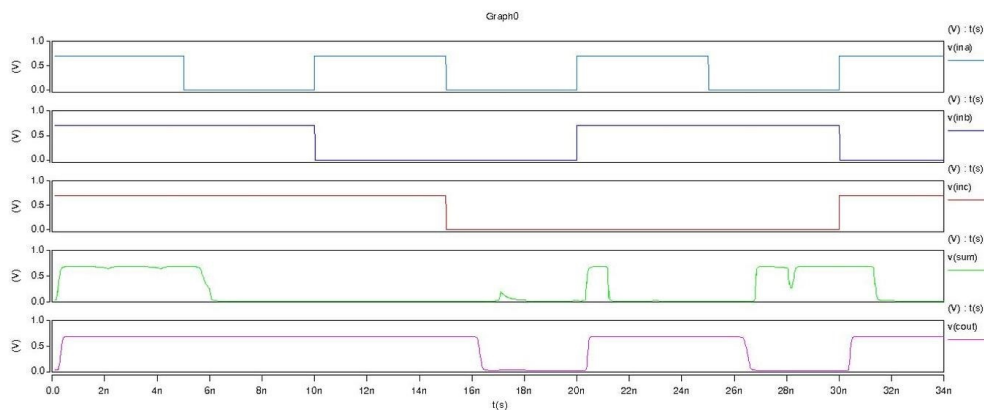


Figure 13: Simulation result of the proposed full adder based on memristor and MTJ

Figure 13 shows the simulation results of the proposed full adder based on memristor and MTJ. As can be seen, when all inputs are high, the sum of both outputs and  $C_{out}$  are high. When two inputs are high and the other input is low, one output is low and the other is high.

In Table 1, a comparison is made between the proposed full adder and those in other works.

To show the stability of the circuit against voltage fluctuations, the circuit output for different values of voltage is investigated. Figures 15, 16 and 17 show the circuit output for 0,5; 0,9 and 1,2V

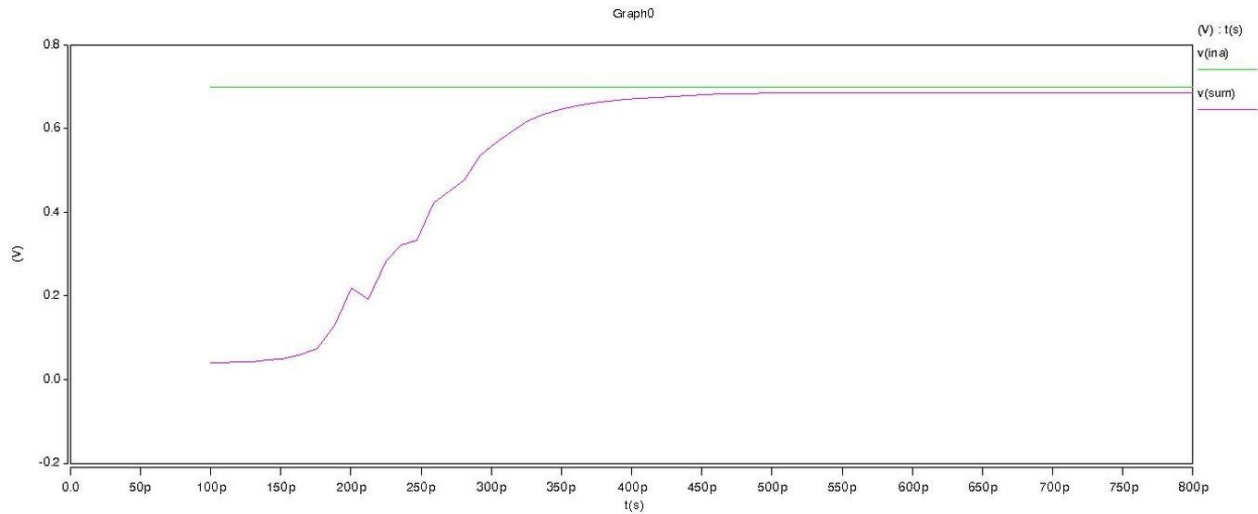


Figure 14: Delay of the proposed full adder

Table 1: Comparison of the proposed full adder and those in other references

Paper	Voltage supply (v)	Power consumption ( $\mu w$ )	Delay (ns)	Technology
5	0,9	0,12	1	32nm CMOS
6	2,5	0,447	0,35	180nm CMOS
43		1730	1,009	
44		5,736	0,179	
45		127	1,117	
This work (MTJ&MEM)	0,7	0,317	0,35	7nm CMOS

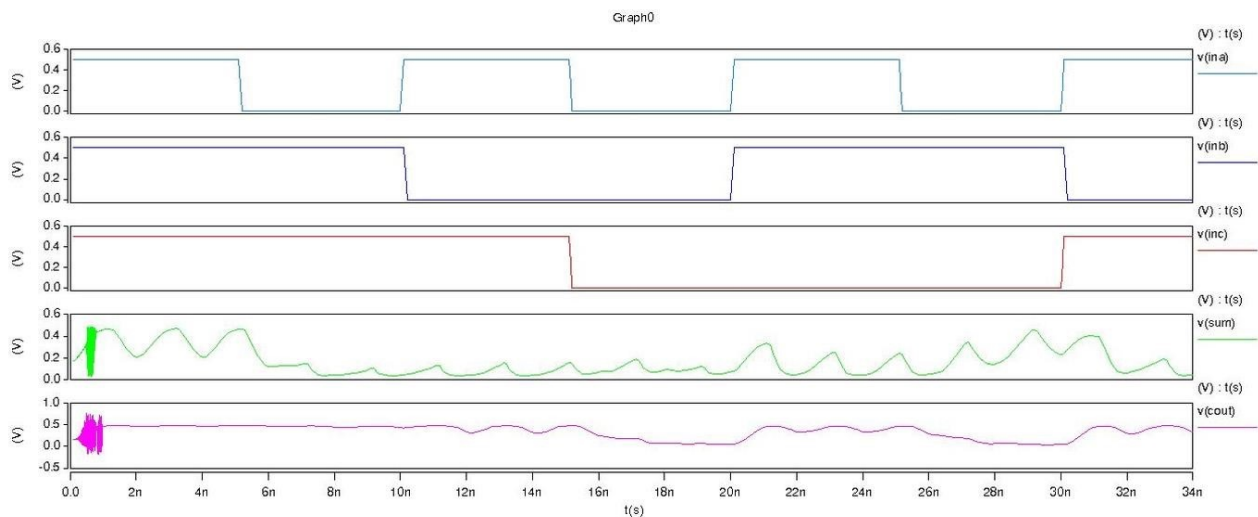


Figure 15: Simulation result of the proposed full adder for 0.5v

respectively.

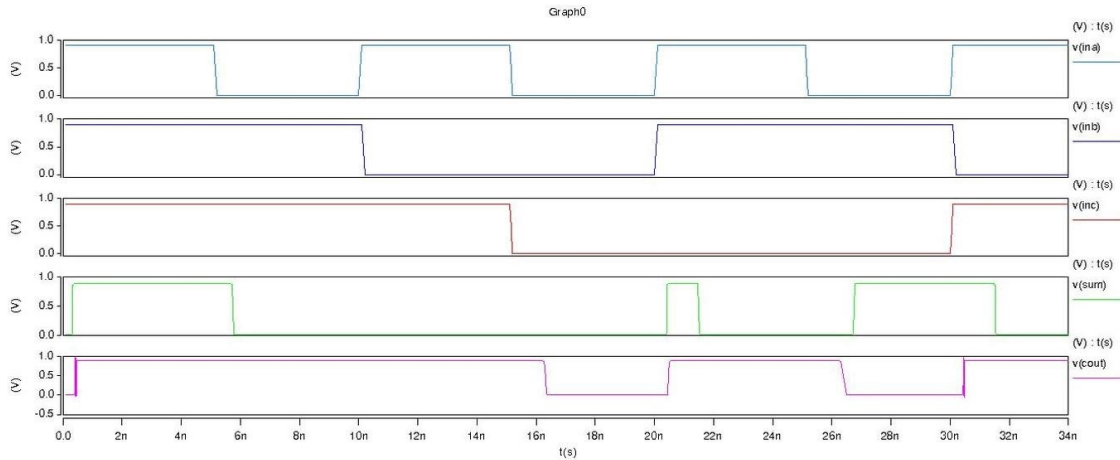


Figure 16: Simulation result of the proposed full adder for 0.9v

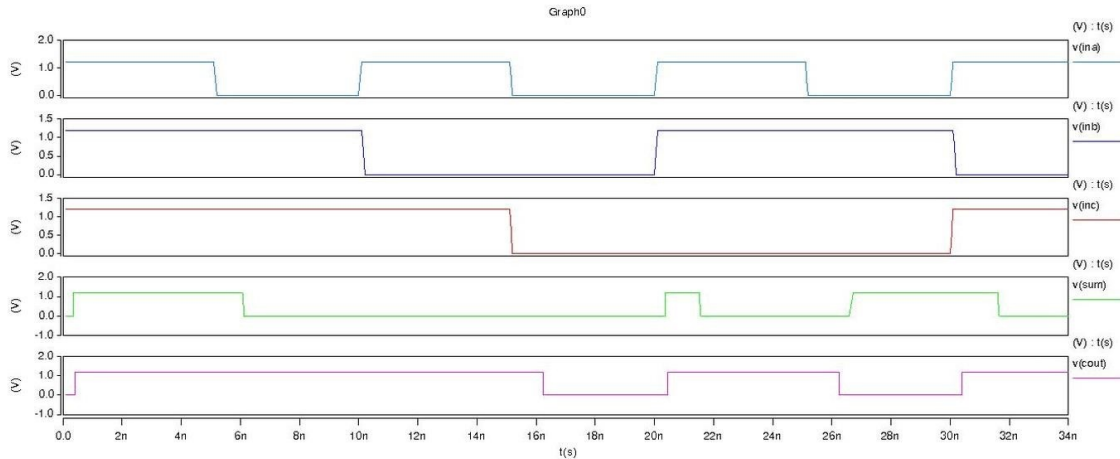


Figure 17: . Simulation result of the proposed full adder for 1.2v

## 5. Conclusion

A new low-power high-speed full adder circuit, which uses a new CMOS domino logic family, was presented in this paper. A new structure for adiabatic hybrid MTJ and MEM-CMOS circuits was also presented in this work. Moreover, the proposed full adder was compared with other previously presented basic logic gates and full adders. The advantages of the proposed circuits were their simpler architecture, lower power consumption, higher speed and using fewer transistors. The designs were simulated and compared with several state-of-the-art designs. We used Synopsys HSPICE simulator with 7 nm technology files to test the presented designs. The results showed the lower power consumption of the

proposed adiabatic MTJ-CMOS designs compared to state-of-the-art designs. In the final full adder circuit, sustainable outputs with optimal power consumption were achieved for hybrid structure of memristor and MTJ. Accordingly, the results of outputs indicated the feasibility of an optimal full adder design.

## 6. References

- [1] M. Pedram and J. M. Rabaey, *Power aware design methodologies*. Boston, MA, USA: Springer Science & Business Media, 2002.
- [2] Y. Zhang, W. Zhao, J. O. Klein, W. Kang, D. Querlioz, Y. Zhang, D. Ravelosona, and C. Chappert, "Spintronics for low-power computing," in *DATE '14: Proceedings of the conference on Design, Automation & Test in Europe*, Leuven, BEL, 2014.

- [3] W. C. Athas, L. J. Svensson, J. G. Koller, N. Tzartzanis, and E. Y. C. Chou, "Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 398–407, 1994.
- [4] E. Deng, Y. Zhang, J. O. Klein, D. Ravelsona, C. Chappert, and W. Zhao, "Low power magnetic full-adder based on spin transfer torque MRAM," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 49, pp. 4982–4987, 2013.
- [5] F. Sharifi, Z. Saifullah, and A. H. Badawy, "Design of adiabatic MTJ-CMOS hybrid circuits," in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2017, pp. 715–718.
- [6] S. j. Jassbi and m. mousavi, "A Novel Low Power Full Adder Using a Modified Domino Logic," *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 8–11, 2016.
- [7] Y. Gang, W. Zhao, J. Klein, C. Chappert, and P. Mazoyer, "A High-Reliability, Low-Power Magnetic Full Adder," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 11, pp. 4611–4616, 2011.
- [8] M. Anis, S. Areibi, and M. Elmasry, "Design and optimization of multithreshold CMOS (MTCMOS) circuits," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 22, no. 10, pp. 1324–1342, 2003.
- [9] M. J. Gitanjali, "Efficient adders for assistive devices," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 95–104, 2017.
- [10] K. Roy, S. Mukhopadhyay, and H. Mahmoodi-Meimand, "Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 2, pp. 305–327, 2003.
- [11] S. H. Choi, B. C. Paul, and K. Roy, "Dynamic noise analysis with capacitive and inductive coupling [high-speed circuits]," in *Proceedings of ASP-DAC/VLSI Design 2002. 7th Asia and South Pacific Design Automation Conference and 15th International Conference on VLSI Design*, 2002, pp. 65–70.
- [12] S. M. Sharroush, Y. S. Abdalla, A. A. Dessouki, and E. A. El-Badawy, "Impact of technology scaling on the performance of domino CMOS logic," in *2008 International Conference on Electronic Design*, 2008, pp. 1–7.
- [13] M. J. Garima and H. Lohani, "Design, implementation and performance comparison of multiplier topologies in power-delay space," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 271–278, 2016.
- [14] M. H. Moaiyeri, M. Nasiri, and N. Khastoo, "An Efficient ternary serial adder based on carbon nanotube FETs," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 355–363, 2016.
- [15] F. Moradi, T. V. Cao, E. I. Vatajelu, A. Peiravi, H. Mahmoodi, and D. T. Wisland, "Domino logic design for high performance and leakage-tolerant applications," *Integration*, vol. 46, no. 3, pp. 247–254, 2013.
- [16] F. Moradi, H. Mahmoodi, and A. Peiravi, "A High Speed and Leakage-Tolerant Domino Logic for High Fan-in Gates," in *Proceedings of the 15th ACM Great Lakes Symposium on VLSI*, ser. GLSVLSI '05. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005, pp. 478–481.
- [17] A. Dadoria, K. Khare, T. Gupta, and R. Singh, "A Novel High-Performance Leakage-Tolerant, Wide Fan-In Domino Logic Circuit in Deep-Submicron Technology," *Circuits and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 103–111, 2015.
- [18] P. Gronowski, *Design of High-Performance Microprocessor Circuits*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001, ch. Issues in dynamic logic design, Design of High-Performance Microprocessor Circuits, pp. 140–157.
- [19] S. Garg and T. K. Gupta, "Low power domino logic circuits in deep-submicron technology using CMOS," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 625–638, 2018.
- [20] M. H. Anis, M. W. Allam, and M. I. Elmasry, "Energy-efficient noise-tolerant dynamic styles for scaled-down CMOS and MTCMOS technologies," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 71–78, 2002.
- [21] Y. Lih, N. Tzartzanis, and W. W. Walker, "A Leakage Current Replica Keeper for Dynamic Circuits," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 42, no. 1, pp. 48–55, 2007.
- [22] G. Palumbo, M. Pennisi, and M. Alioto, "A Simple Circuit Approach to Reduce Delay Variations in Domino Logic Gates," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 10, pp. 2292–2300, 2012.
- [23] M. Alioto, G. Palumbo, and M. Pennisi, "Understanding the Effect of Process Variations on the Delay of Static and Domino Logic," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 18, no. 5, pp. 697–710, 2010.
- [24] H. F. Dadgour and K. Banerjee, "A Novel Variation-Tolerant Keeper Architecture for High-Performance Low-Power Wide Fan-In Dynamic or Gates," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 18, no. 11, pp. 1567–1577, 2010.
- [25] B. Behin-Aein, J.-P. Wang, and R. Wiesendanger, "Computing with spins and magnets," *MRS Bulletin*, vol. 39, no. 8, pp. 696–702, 2014.
- [26] W. Zhao, E. Belhaire, C. Chappert, and P. Mazoyer, "Spin Transfer Torque (STT)-MRAM-Based Runtime Reconfiguration FPGA Circuit," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 9, no. 2, Oct. 2009.
- [27] R. Douglas, M. Mahowald, and C. Mead, "Neuromor-



- phic Analogue VLSI,” *Annual Review of Neuroscience*, vol. 18, no. 1, pp. 255–281, 1995, PMID: 7605063.
- [28] S. R. Nandakumar, S. R. Kulkarni, A. V. Babu, and B. Rajendran, “Building Brain-Inspired Computing Systems: Examining the Role of Nanoscale Devices,” *IEEE Nanotechnology Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 19–35, 2018.
- [29] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkov, “SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift,” *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, pp. 210–214, 2009.
- [30] F. Argall, “Switching phenomena in titanium oxide thin films,” *Solid-State Electronics*, vol. 11, no. 5, pp. 535–541, 1968.
- [31] J. J. Yang, M. D. Pickett, X. Li, D. A. A. Ohlberg, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices,” *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 7, pp. 429–433, 2008.
- [32] M. D. Pickett, D. B. Strukov, J. L. Borghetti, J. J. Yang, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices,” *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 7, pp. 074 508–074 514, 2009.
- [33] R. S. Williams, G. Medeiros Ribeiro, D. Borisovich Strukov, and J. Yang, “Controlled switching memristor,” U.S. patentus US20 120 313 070A1, 2012.
- [34] M. Mahvash and A. C. Parker, “A memristor SPICE model for designing memristor circuits,” in *2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2010, pp. 989–992.
- [35] J. G. Simmons, “Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film,” *Journal of Applied Physics*, vol. 34, no. 6, pp. 1793–1803, 1963.
- [36] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “The missing memristor found,” *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, 2008.
- [37] T. A. Wey and S. Benderli, “Amplitude modulator circuit featuring TiO<sub>2</sub> memristor with linear dopant drift,” *Electronics Letters*, vol. 45, no. 22, pp. 1103–1104, 2009.
- [38] Y. N. Joglekar and S. J. Wolf, “The elusive memristor: properties of basic electrical circuits,” *European Journal of Physics*, vol. 30, no. 4, pp. 661–683, 2009.
- [39] S. Shin, K. Kim, and S.-M. Kang, “Compact Models for Memristors Based on Charge-Flux Constitutive Relationships,” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 590–598, 05 2010.
- [40] T. Fang, B. Amine, and G. Zhouye, “Low power dynamic logic circuit design using a pseudo dynamic buffer,” *Integration*, vol. 45, no. 4, pp. 395–404, 2012.
- [41] V. Kursun and E. G. Friedman, “Domino logic with variable threshold voltage keeper,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 1080–1093, 2003.

# High-Performance $4 \times 1$ Multiplexer based on Single-Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor with CMOS-like Pass-Transistor Logic

Hamed Fooladvand\* , Karim Abbasian , Hamed Baghban 

*Department of Electrical & Computer Engineering, The School of Engineering Emerging Technologies at The University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran*

**Abstract.-** In the current research, the best property of Carbon Nanotube Field Effect Transistors (CNTFETs) exploited to propose a high performance 4-input 1-output ( $4 \times 1$ ) Multiplexer, using a CMOS-like Pass Transistor Logic (PTL) design style. To enhance a significant reduction in circuit complexity and a corresponding improvement in the performance envelope (power, area and speed) with respect to conventional CMOS equivalent circuit. The operating principles and experimental results for the PTL circuits using both p-FET and n-FET of CNTFETs presented. This property can be used in a multiplexer circuit, which transfers one of several input data to the output according to the control signal values. Results demonstrated that using of CNTFET can be achieved by constructing high performance carbon nanotube-based integrated circuits like logic Multiplexer based on a pass-transistor logic configuration. Further, this circuits can assembly with other circuits based on other Field effect transistors technology like GNR-FETs and improve ALU (Arithmetic Logic Unit) section of many processor ICs in high level of Nano-Scale VLSIs. The simulation results presented, and the power consumption compared with the conventional CMOS designs. The comparison of results approved that the CNTFET based design is capable of efficient power savings and high-speed performance.

**Keywords:** Carbon Nanotube Field Effect Transistor; Multiplexer; CMOS-like Pass Transistor Logic; Time Delay; PDP.

## Multiplexor $4 \times 1$ de alto rendimiento basado en un transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono de pared simple con lógica de transistor de paso similar a CMOS

**Resumen.-** En los últimos años, según muchos estudios, el transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono (CNTFET) mostró un alto rendimiento en muchos circuitos lógicos debido a sus propiedades y en comparación con otros homólogos de silicio. Sin embargo, garantizar estos beneficios sigue siendo un desafío para la aplicación de circuitos integrados a nanoescala. Debido a sus excelentes características eléctricas y mecánicas, CNTFET es uno de los sustitutos más prometedores de la tecnología de transistores de efecto de campo semiconductores de óxido metálico (MOSFET). Aunque estas características son adecuadas para implementar en varios circuitos digitales prácticos, los circuitos basados en CNTFET resolverán enormes problemas de fabricación debido a su tamaño. En este artículo, mostramos que se podría obtener una simplificación importante mediante el diseño de circuitos integrados basados en CNTFET a través de una configuración lógica de transistor de paso tipo CMOS en el uso de transistores de efecto de campo, en lugar de la configuración tradicional de semiconductores de óxido de metal complementario (CMOS). La configuración PTL similar a CMOS crea una simplificación notable del diseño del circuito basado en CNTFET, una mayor velocidad del circuito y una gran reducción en el consumo de energía. Hay muchos problemas que se enfrentan al integrar un alto nivel de muchos transistores, como el efecto de canal corto, la disipación de potencia, el escalado de los transistores, etc. Para superar estos problemas, los Nanotubos de Carbono (CNT) tienen aplicaciones prometedoras en el campo de la electrónica. Los resultados de la simulación presentados y el consumo de energía en comparación con los diseños CMOS convencionales. La comparación de resultados probó que el diseño basado en CNTFET es capaz de ahorrar energía de manera eficiente y un rendimiento de alta velocidad.

**Palabras clave:** transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono; multiplexor; lógica de transistor de paso tipo CMOS; retardo de tiempo; PDP.

Received: October 26, 2020.

Accepted: November 25, 2020.

\* Correspondence author:

*e-mail:* h.fooladvand91@ms.tabrizu.ac.ir (H. Fooladvand)

## 1. Introduction

In the past several years, according to many studies Carbon Nanotube Field Effect Transistor (CNTFET) shown high performance in many logic circuits due to their properties and compared with other silicon counterparts. However, ensuring these benefits still are as a challenge for nanoscale integrated circuits application. Because of its superb electrical and mechanical features, CNTFET is one of the most promising substitutes of metal–oxide–semiconductor field-effect transistor (MOSFET) technology. Although these features are suitable for implementing in various practical digital circuits, CNTFET-based circuits will solve enormous fabrication problems due to their size. Here, we show that a major simplification could be obtained by CNTFET based integrated circuits designing based on a CMOS-like pass-transistor logic configuration in the use of field effect transistors, instead of traditional Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) configuration. The CMOS-like pass transistor logic configuration creates a notable simplification of the CNTFET based circuit design, a higher circuit speed and great reduction in energy consumption. There are many issues facing while high level integrating many numbers of transistors such as short channel effect, power dissipation, scaling of the transistors and etc. To overcome these problems considering Carbon Nanotube (CNT) have promising application in the field of electronics. Carbon Nanotube (CNT) is a pioneer of new materials technologies for electronic design because of its unique mechanical and electrical properties [1], [2]. CNTFET is the most promising technology to extend or complement traditional silicon technology due to three reasons: first, the operation principle and the device structure are similar to CMOS devices and it is possible to reuse the established CMOS design infrastructure. Second, it is also possible to reuse CMOS fabrication process. And the most important reason is that the CNTFET has the best experimentally demonstrated device current carrying ability to date. Semiconducting carbon nanotubes are considered to be promising channel

materials for the next generation of Nanoelectronic semiconductors, especially, for a high efficiency of Field Effect Transistors (FETs) [3], [4].

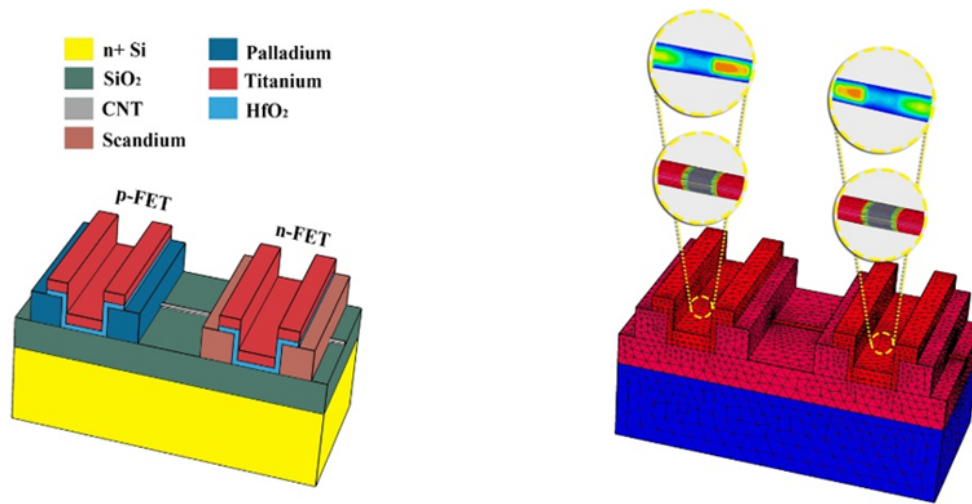
Also, Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene Nanoribbons have received significant attention from the academia as well the industry. Ideal electronic and structural properties of these materials make them suitable for electronic applications. These quests for knowledge are because of the fact that the improvement of the application and addition may lead to the improvement of other circuits parameters derived from them. Time Delay, power consumption and complexity are among instance of such parameters [5], [6]. Due to great extent of CNTFET in processors application, a Multiplexer based on SWCNT-FET is used in various applications wherein multiple data can be transmitted using a single line. In addition the Multiplexer could be vital of processors as evidenced by its wide use in Arithmetic Logic Unit (ALU) [7], [8].

## 2. Carbon Nanotube Field Effect Transistor (CNTFET) implementation plan

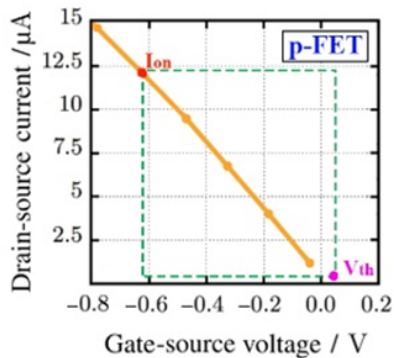
CNTFET model that developed by Stanford University used for many previous types of researches in this area. Stanford model implements a circuit-compatible model for Single Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor and is simulated in HSPICE [9], [10].

The p-FET and n-FET component used in this paper are shown in Figure 1. This model characterized in a process simulation framework by TCAD interactive tools and then by inspiration of Stanford CNTFET model with a little change, the circuit simulation of a  $4 \times 1$  logic Multiplexer designed. Thus, this model implements a circuit-compatible model for SWCNT-FET due to real data for our simulations and is implemented in HSPICE.

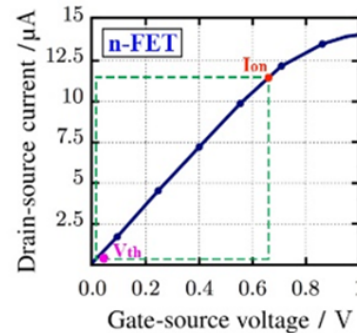
Each CNTFET employs one SWCNT below its gate. The carbon nanotube under the both gates is identical. The part of the SWCNT directly under the gates is intrinsic, on the other hand, threshold voltage and output conductance exceedingly depend on the channel doping rate, thus for the doped source and drain parts of



(a) Schematic diagram of a 3D view of SWCNT-based devices with a p-FET and n-FET pair (b) Physical mobility modeling to determine transport properties of the channel



(c) The transfer characteristics of the p-FET based on CNT (channel length  $\approx 1\mu\text{m}$ )



(d) The transfer characteristics of the n-FET based on CNT (channel length  $\approx 1\mu\text{m}$ )

Figure 1: Structure and characteristics of n-type and p-type CNTFETs

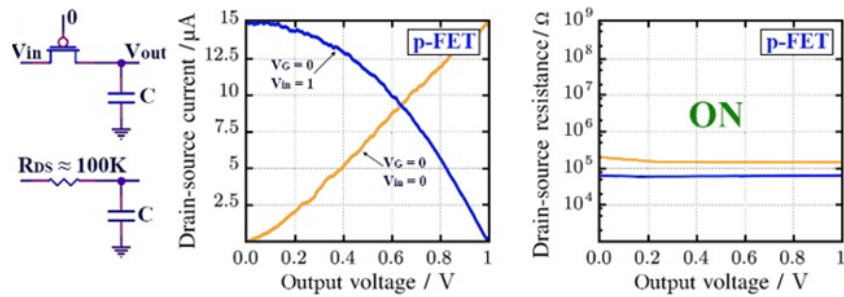
CNTFET, the doping level is taken as 0,85 % which is very higher than the first conduction band of the CNT. In this model, the screening effect of the charge in CNT under the gates can be ignored. Electron and hole mobility in CNT assumes equal. This design is simulated by 0,9 V operating voltage using HSPICE.

A schematic diagram showing a 3D view of SWCNT-based devices with a p-FET and n-FET pair is presented in Figure 1a. Physical mobility modeling with device simulation to determine transport properties of the channel shown in Figure 1b. The transfer characteristics of the p-FET and n-FET, based on the same CNT with a changeable diameter and a channel length of approximately 1  $\mu\text{m}$  are shown in Figure 1c and

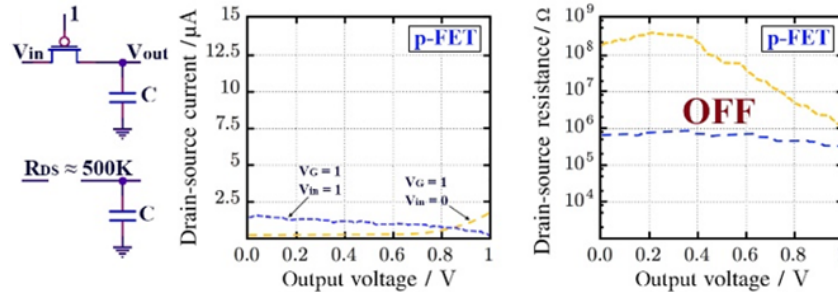
Figure 1d. For the p-FET, the source is biased at 1,0 V and drain is at 0 V, whereas for the n-FET, the source is biased at 0 V and the drain is at 1,0 V.

The green box defines the gate voltage window used to obtain  $I_{on}$ , where  $V_{th}$  is determined using the standard peak trans-conductance method. The extracted  $V_{th}$  (pink point) and  $I_{on}$  (red point) are (Figure 1c) 0,05 V and 11,6  $\mu\text{A}$  for the p-FET, and (Figure 1d) 0,03 V and 11,4  $\mu\text{A}$  for the n-FET. The output characteristic of the p-type (orange line) and n-type (blue line) CNTFETs with  $|V_{gs}|$  varying from 0 to 1 V in steps of 0,2 V.

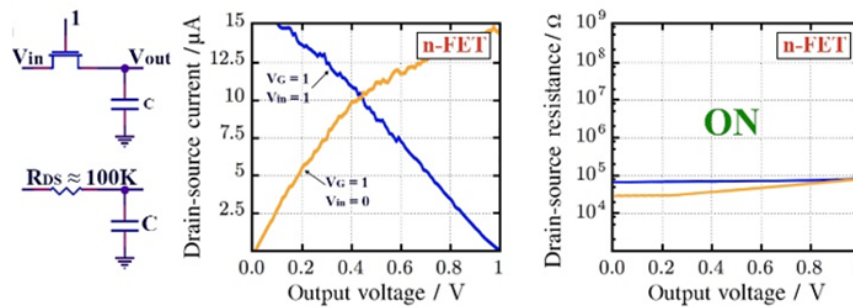
Figure 2 shows the operating principles for the Pass Transistor Logic (PTL) circuits using both p- and n-type of CNTFETs. As shown, when a low voltage (a logic 0, or 0 V) is applied to the gate for



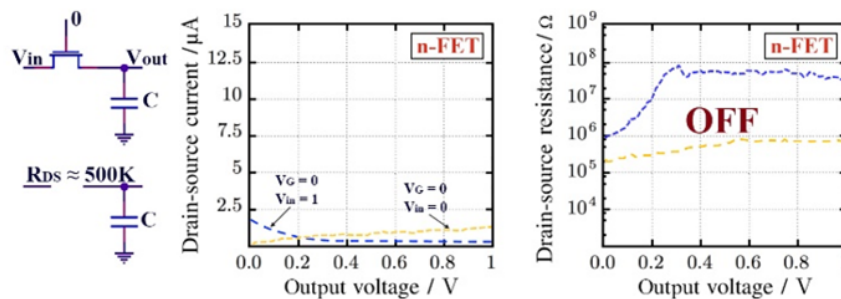
(a) The operating principles for p-type of CNTFET with PTL (a logic 0 is applied to the gate).



(b) The operating principles for p-type of CNTFET with PTL (a logic 1 is applied to the gate).



(c) The operating principles for n-type of CNTFET with PTL (a logic 1 is applied to the gate).



(d) The operating principles for n-type of CNTFET with PTL (a logic 0 is applied to the gate).

Figure 2: The operating principles of CNTFET-based PTL circuits

a p-FET pass transistor, Figure 2a, the resistance factor between the source (input) and drain (output) of the device,  $R_{ds}$ , is on the order of  $100\text{ k}\Omega$  or less. Thus, the device is in its low-resistance or ON state,

and may pass the input signal  $V_{in}$  from the source to the drain. When a high bias (a logic 1, which is 1,0 V) is applied to the gate Figure 2b,  $R_{ds}$  is greater than  $500\text{ k}\Omega$ . The p-type device is thus in its high-

resistance or OFF state and may not pass the input signal  $V_{in}$  to the output faithfully. The operation of an n-type pass transistor is similar to that of a p-type pass transistor, but in a complementary way. The n-type pass transistor can pass an input signal when a logic 1 is biased on the gate Figure 2c, and it is turned off when a logic 0 is biased on the gate Figure 2d. It should be noted that pass transistors are used here as switches to pass logic levels between the nodes of a circuit, rather than as switches connected directly to the power supply.

Pass transistor logic circuits based on CNTFET is a popular and widely used alternative to the conventional CMOS logic configuration, which can significantly reduce the number of transistors required to implement a logic circuit and has the additional advantage of lower capacitance [11], [12].

The main advantage of using PTL is that one Pass transistor (either a p-FET or an n-FET) is adequate to demonstrate a logical operation, which significantly reduces the number of transistors used than a circuit using a conventional CMOS configuration to achieve the same performance [13], [14]. One major drawback in the Silicon based PTL is that albeit an n-type pass transistor may produce a strong zero or ground, it produces only a weak logic one due to lowering the output below  $V_{DD} - V_{thn}$ , where  $V_{thn}$  is the threshold voltage of the n-FET. On the other hand, a p-FET pass transistor produces a strong logic one, but a weak logic zero by raising the output above  $|V_{thp}|$  when the input is zero, where  $V_{thp}$  is the threshold voltage of the p-FET. This weak results from different threshold voltages for n-FET and p-FET, and the change in the output characteristics is usually known to as threshold voltage drop [15], [16]. One possible solution way to this deficiency is to regulate the threshold voltages of both the n-FET and p-FET, so that  $V_{thn} \approx V_{thp} \approx 0$  at the processing operation via doping. However, this is usually not acceptable in conventional silicon CMOS technology, but, the threshold voltage is readily adjustable in doping-free CNT CMOS-like technology [17]. Supplementary Figure 1 demonstrates that it is possible to change the threshold voltage of both n-FET and p-FET to the

middle of them at approximately 0V by selecting a suitable gate metal, which greatly reduces the conventional threshold voltage in CNTFET-based PTL circuits. However, limited threshold voltage drops for both the n-type and p-type CNTFETs as pass transistors still prepared, as shown in Figure 2. For a p-FET Figure 2a, the output resistance for passing a logic 0 in its ON state (the solid orange line) is obviously larger than that for passing a logic 1 as the solid blue line. Thus, there still provides a small threshold voltage drop for the p-type CNTFET when a logic 0 is passed, and the voltage drop is significantly lower when passing a logic 1. In like manner, an n-type CNTFET passes a logic 0 well, while passing a logic 1 with a larger  $R_{ds}$ , threshold drop at low bias Figure 2c.

However, advantaging from the small threshold voltage near zero, the threshold voltage drops for both n-type and p-type CNT pass transistors are much smaller than their conventional silicon counterparts, which show threshold voltages that are typically ten times larger [18], [19]. Fundamentally, these high-performance CNT pass transistors, many types of high-performance logic Integrated Circuits can be designed with a Pass Transistor Logic configuration [20], [21].

### 3. Multiplexer circuit implementation plan

Multiplexers are a common building block for data-paths and data-switching structures, and are used extensively in a number of applications including processors, processor buses, and network switches. The optimization of Multiplexer is at the heart of digital architecture performance tuning in terms of power, area and speed [22]. In the previous studies, various approaches have been proposed to reduce power consumption and the area in multiplexer section, the algorithm level and at the circuit level by defining the appropriate logic styles to match the application type. The use of CNTFET technology proved can be a promising alternative direction for this issue since such approaches have previously resulted in highly efficient solutions in term of power consumption, area and delay when used for standard or reconfigurable cells.

Here, we exploit the best property of CNTFETs to propose a high performance 4-input 1-output (4 × 1) Multiplexer, using a CMOS-like Pass Transistor Logic (PTL) design style, demonstrating a significant reduction in circuit complexity and a corresponding improvement in the performance envelope (power, area and speed) with respect to conventional CMOS equivalent circuit.

The operating principles and experimental results for the PTL circuits using both p-FET and n-FET of CNTFETs discussed in Figure 2, this property can be used in a Multiplexer circuit, which transfers one of several input data to the output according to the control signal values. This is shown in Figure 3 for an example Multiplexer with four data inputs A, B, C, D and two select inputs, S<sub>1</sub> and S<sub>0</sub>, with the truth table.

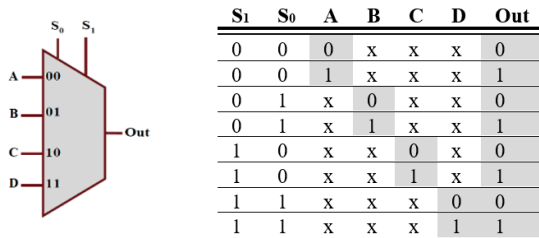


Figure 3: Truth table and graph for an ideal 4 × 1 Multiplexer

A sum of products implementation of the Multiplexer can be written like equation (1):

$$Out = A \cdot \bar{S}_0 \cdot \bar{S}_1 + B \cdot S_0 \cdot \bar{S}_1 + C \cdot \bar{S}_0 \cdot S_1 + D \cdot S_0 \cdot S_1 \quad (1)$$

As shown in Figure 4, at a transistor level, this expression can be implemented with just six SWCNT-FET devices by CMOS-like pass transistor logic.

#### 4. Performance evaluation

##### 4.1. Simulation results

The input-output waveforms for proposed Multiplexer are shown in Figure 5. For example, when S<sub>1</sub> and S<sub>0</sub> have 1 and 0 logic value respectively, Multiplexer should show C logic value on output. This state can be investigated for other logic values

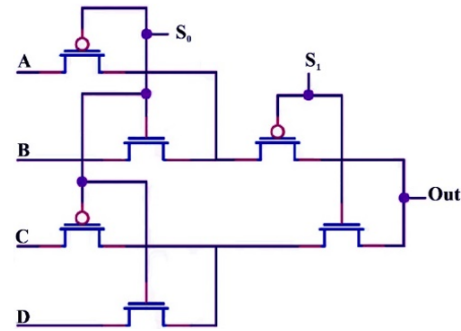


Figure 4: 4 × 1 Multiplexer based on CNTFET with CMOS-like PTL

due to Figure 5. Thus, our simulation results approved truth table near an ideal Multiplexer that shown in Figure 5. Meanwhile, Figure 6 shows a rising signal edge for output signal waveform of the multiplexer with more resolution in a very smaller time window that shows a high performance for CNTFET-based Multiplexer circuit design.

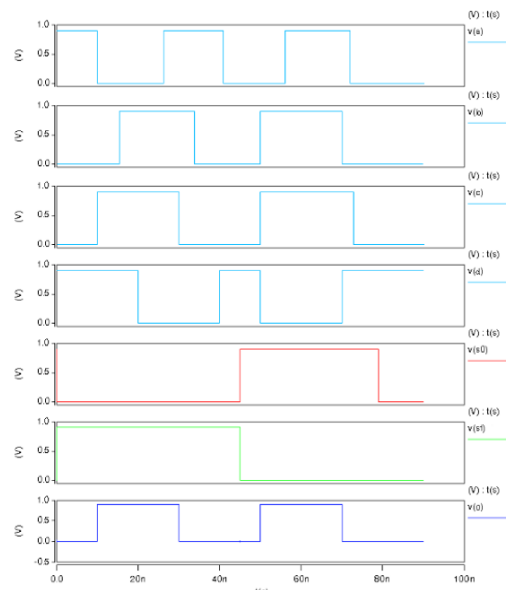


Figure 5: Input - output signal waveforms for 4 × 1 Multiplexer

Generally, according Figure 5 graph V(a) is selected as V(o) when V(s<sub>1</sub>)=0 and V(s<sub>0</sub>)=0, whereas V(b) is selected when V(s<sub>1</sub>)=1 and V(s<sub>0</sub>)=0, V(c) is selected when V(s<sub>1</sub>)=0 and V(s<sub>0</sub>)=1, also V(d) is selected when V(s<sub>1</sub>)=1 and V(s<sub>0</sub>)=1.

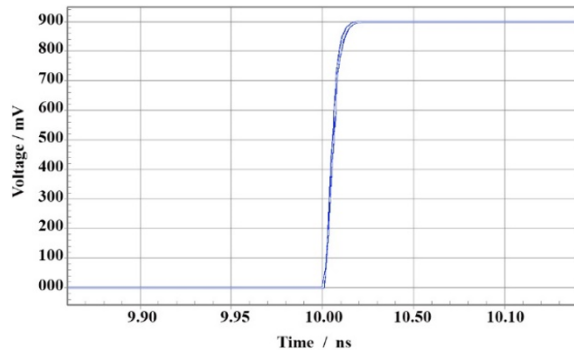


Figure 6: A rising signal edge of Multiplexer output waveform

#### 4.2. Time Delay, Power consumption and PDP

Simulation results about time delay behavior of the CNTFET-based Multiplexer are shown in Table 1. The Power consumption of the CNTFETs with Power Delay Product (PDP) and PDP discrepancies values together are shown in Table 2.

Where SD is standard deviation of CNT diameter, Td is time delay and ΔTd is propagation delay variation for presented circuit design.

Figure 7 shows simulation results of the Multiplexers according to diameter variation versus Time behavior. In this type of simulation, carbon nanotube diameter is swept from 0,60 nm to 2,20 nm and the various time delay criteria are estimated. Two important subjects can be obtained from Figure 8. The first subject is that dispersion in time delay, rise time and fall time all increase aggressively as CNT diameter is decreased to lower than 0,80 nm. Furthermore, when CNT diameter increases more than 0,80 nm point, the time delay is permanently decreased.

This means when carbon nanotube diameter increases, energy band gap is decreased as a result authorizing more charge carriers to participate in current transferring and increasing conduction, increasing the current through the CNT means that delay is permanently reduced till entering the balanced state at diameters larger than 1,5 nm while supply voltage fixed on 0,90 V. The second subject is about fall time and rise time that they are very similar and this issue approve that due the equal mobility of electrons and holes in CNT, utilizing

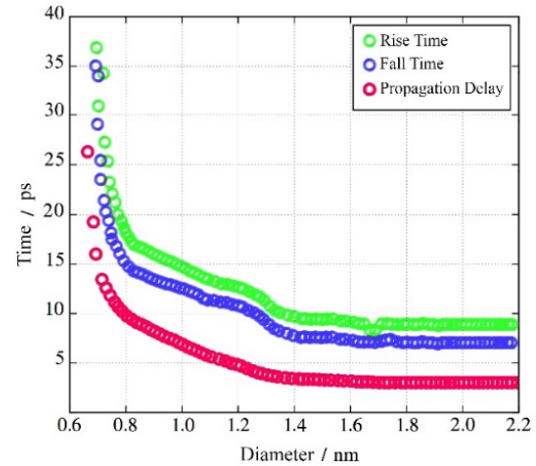


Figure 7: Multiplexer Timing Behavior according to CNT Diameter change

structure with CNTFETs for a Multiplexer with Pass Transistor Logic would yield to similar rise time and fall time and uniform waveform.

Where SD is Standard Deviation of CNT diameter, Mean P is Mean Power consumption, ΔP is propagation Power consumption differences, PDP is Power Delay Product and ΔPDP is PDP discrepancies for presented circuit.

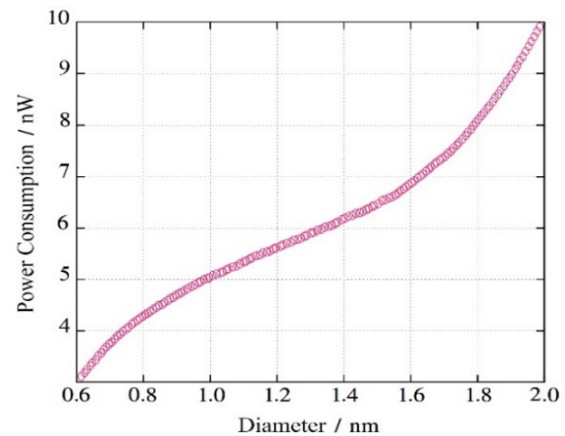


Figure 8: Power Consumption versus various diameter for 4 × 1 Multiplexer

The quantitative simulation results of 4 × 1 Multiplexers shown in Figure 8. CNT diameter is swept from a minimum value to a maximum value (0,60 nm to 2,00 nm). As shown where carbon nanotube diameter increases, power consumption is increased, that is because of the energy band gap decreasing in CNT. When CNT diameter



Table 1: Time Delays for 4×1 Multiplexer

Diameter (nm)	SD (nm)	Mean Td (ps)	Min, Td (ps)	Max, Td (ps)	ΔTd (ps)
0,80	0,04	11,86	13,80	27,01	13,21
	0,09	13,77	17,04	34,56	17,52
	0,18	17,06	12,09	111,03	98,94
1,10	0,04	7,38	14,05	77,94	63,89
	0,09	7,51	9,11	20,45	11,34
	0,18	8,62	10,07	67,14	57,07
1,30	0,04	8,22	7,04	134,82	127,78
	0,09	7,86	6,08	55,90	49,82
	0,18	7,42	6,45	89,24	82,79
1,50	0,04	5,45	6,35	12,45	6,10
	0,09	4,83	6,20	32,43	26,23
	0,18	4,62	6,15	13,07	6,92
1,70	0,04	3,55	6,32	9,96	3,64
	0,09	4,01	6,36	9,45	3,09
	0,18	4,22	6,31	33,60	27,29
1,90	0,04	4,07	5,80	7,89	2,09
	0,09	3,65	5,76	8,10	2,34
	0,18	3,91	5,99	8,61	2,62
2,01	0,04	3,87	5,78	8,76	2,98
	0,09	4,08	5,69	15,08	9,39
	0,18	3,59	5,83	16,78	10,95

Table 2: 4 × 1 Multiplexer Power Consumption and PDP discrepancies

Diameter (nm)	SD (nm)	Mean P (nW)	ΔP (nW)	MeanPDP (×10 <sup>-20</sup> J)	ΔPDP (×10 <sup>-20</sup> J)
0,80	0,04	4,19	1,02	99,51	23,96
	0,09	4,27	1,47	104,04	121,05
	0,18	4,33	1,29	121,05	178,23
1,10	0,04	4,50	2,12	78,36	14,56
	0,09	4,84	1,76	81,25	131,91
	0,18	4,85	1,59	87,43	225,59
1,30	0,04	5,25	3,03	68,61	176,90
	0,09	5,21	2,58	73,11	15,95
	0,18	5,32	1,94	77,84	5,69
1,50	0,04	5,55	0,86	58,76	73,67
	0,09	5,67	1,47	62,52	13,45
	0,18	5,71	4,01	66,02	65,97
1,70	0,04	5,99	2,39	53,01	87,41
	0,09	6,11	2,70	55,88	11,23
	0,18	6,22	1,83	56,87	47,91
1,90	0,04	6,44	0,99	49,45	34,94
	0,09	6,67	1,79	51,63	43,26
	0,18	6,88	3,44	53,69	23,33
2,01	0,04	7,01	3,48	44,01	26,67
	0,09	7,42	3,21	46,79	4,79
	0,18	7,53	2,86	48,11	11,45

increases, its band gap is reduced, thus charge carriers need lower energy to flow and producing a greater current. This operation increased current successively and causes power consumption to increase. The graph shows a snap rise for power

consumption where CNT diameter is increased above 1,5 nm.

Monte Carlo simulation results of 9500 Multiplexers shown in Figure 9. It illustrates the Multiplexers uncertain cases of Time delay

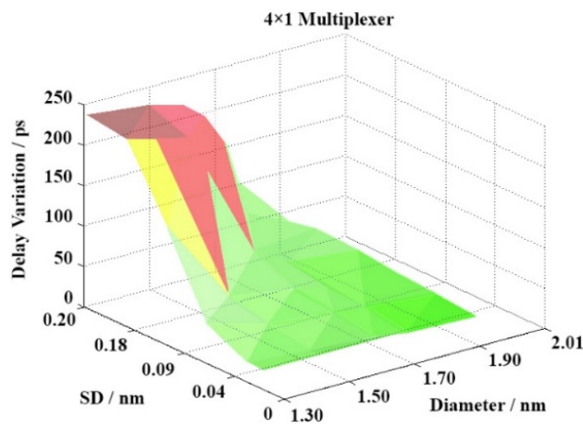


Figure 9: Multiplexer Delay time according to CNT diameter & SD variation

propagation, it is drawn up according to differences in maximum and minimum rise time and fall time, carbon nanotube average diameter and standard deviation. The instability in delay for Multiplexer is critical when the small mean CNT diameter is blended with larger SDs of CNT diameter.

## 5. Discussion

It is well known that a good circuit configuration at the architectural level should take full advantage of the component device properties at the physical level. Here, we summarized the advantages of a  $4 \times 1$  Multiplexer based on Single Wall Carbon Nanotube Field Effect Transistor with Pass Transistor Logic. Our design compared with other methods that presented in [23], [24] first, the number of transistors can be significantly reduced if a circuit with an optimal function is designed with a Pass Transistor Logic configuration when compared with that using the usual CMOS or other configurations as shown in Figure 10. Reducing the number of transistors in an IC not only leads to higher efficiency per transistor, but also to higher speed and lower static power dissipation overall. Second, the major drawback of conventional circuit threshold voltage drop is largely avoided in CNTFET-PTL circuit, because of the readily adjustable threshold voltage of the CNTFET.

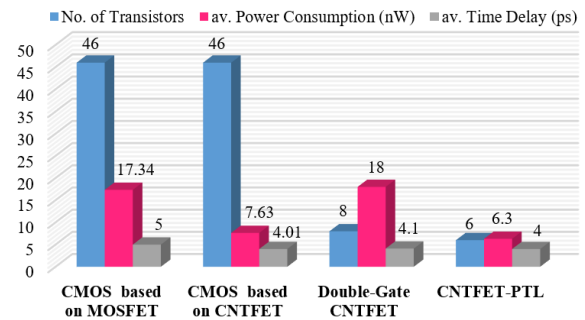


Figure 10: Comparison of average performance metrics for various  $4 \times 1$  MUX

## 6. Conclusion

Using CNTFET can be achieved by constructing high-performance carbon nanotube-based integrated circuits like logic Multiplexer based on a pass-transistor logic configuration, which this circuits can assembly with other circuits based on other Field effect transistors technology like GNR-FETs and improve ALU (Arithmetic Logic Unit) section of many processor ICs in high level of Nano-Scale VLSIs.




The comparison of results indicated that the CNTFET based design is capable of efficient power savings. The  $4 \times 1$  Multiplexer is designed using CNTFET with the different CNT diameters and the performance of the proposed designs are evaluated in various simulation conditions.

## 7. References

- [1] K. Young Bok, K. Yong-Bin, and K. Lombardi, "A novel design methodology to optimize the speed and power of the CNTFET circuits," in *2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2009, pp. 1130–1133.
- [2] K. Yong-Bin, "Integrated circuit design using carbon nanotube field effect transistor," *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, vol. 12, no. 5, pp. 175–188, 2011.
- [3] L. Sheng, K. Yong-Bin, and F. Lombardi, "A novel CNTFET-based ternary logic gate design," in *2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2009, pp. 435–438.
- [4] C. Geunho, K. Yong-Bin, F. Lombardi, and M. Choi, "Performance evaluation of CNFET-based logic gates," in *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2009, pp. 909–912.

- [5] B. Jingwei and Y. Huang, "Fabrication and electrical properties of graphene nanoribbons," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 70, no. 3–6, pp. 341–353, 2010.
- [6] M. Montazeri-Gh and M. Mahmoodi-K, "Optimized predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicle based on traffic condition." *Journal of cleaner production*, vol. 139, pp. 935–948, 2016.
- [7] S. L. Murotiya and A. Gupta, "Design of CNTFET-based 2-bit ternary ALU for nanoelectronics," *International Journal of Electronics*, vol. 101, no. 9, pp. 1244–1257, 2014.
- [8] A. Sharma and T. Ravi, "Low power 8-bit ALU design using full adder and multiplexer," in *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, pp. 2160–2164.
- [9] J. Deng and H. S. P. Wong, "A compact SPICE model for carbon-nanotube field-effect transistors including nonidealities and its application—Part I: Model of the intrinsic channel region," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 12, pp. 3186–3194, 2007.
- [10] L. Ding, Z. Zhiyong, P. Tian, L. Shibo, W. Sheng, Z. Weiwei, L. Jie, and P. Lian-Mao, "Carbon nanotube field-effect transistors for use as pass transistors in integrated logic gates and full subtractor circuits," *ACS Nano*, vol. 6, no. 5, pp. 4013–4019, 2012.
- [11] L. Ding, Z. Zhiyong, L. Shibo, P. Tian, W. Sheng, L. Yan, Z. Weiwei, L. Jie, and P. Lian-Mao, "CMOS-based carbon nanotube pass-transistor logic integrated circuits," *Nature Communications*, vol. 3, p. 677, 2012.
- [12] T. Pei, P. Zhang, Z. Zhang, C. Qiu, S. Liang, Y. Yang, S. Wang, and L. M. Peng, "Modularized construction of general integrated circuits on individual carbon nanotubes," *Nano Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 3102–3109, 2014.
- [13] R. Zimmermann and W. Fichtner, "Low-power logic styles: CMOS versus pass-transistor logic," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 7, pp. 1079–1090, 1997.
- [14] J. M. Rabaey, A. P. Chandrakasan, and B. Nikolić, *Digital integrated circuits: a design perspective*. Pearson Education, 2003, vol. 7.
- [15] N. H. E. Weste and D. M. Harris, *CMOS VLSI Design: A Circuits and System Perspective*, 4th ed., M. Hirsch, Ed. Addyson-Wesley, 2005.
- [16] Z. Zhang, S. Wang, L. Ding, X. Liang, T. Pei, J. Shen, H. Xu, Q. Chen, R. Cui, Y. Li, and L. M. Peng, "Self-aligned ballistic n-type single-walled carbon nanotube field-effect transistors with adjustable threshold voltage." *Nano Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 3696–3701, 2008.
- [17] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 3rd ed. John Wiley & sons, 2006.
- [18] A. Chen, J. Hutchby, V. Zhirnov, and G. Bourianoff, *Emerging nanoelectronic devices*. John Wiley & Sons, 2014.
- [19] Y. S. Mehrabani, F. M. Reza, and E. Mohammad, "A novel low-energy CNFET-based full adder cell using pass-transistor logic," *International Journal of High Performance Systems Architecture*, vol. 5, no. 4, pp. 193–201, 2015.
- [20] M. Grailoo, M. Hashemi, K. Haghshenas, S. Rezaee, S. Rapolu, and T. Nikoubin, "CNTFET full-adders for energy-efficient arithmetic applications," in *2015 6th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2015, pp. 1–6.
- [21] P. Metzgen, "A high performance 32-bit ALU for programmable logic," in *FPGA '04: Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays*, 2004, pp. 61–70.
- [22] K. Jabeur, I. O'Connor, N. Yakymets, and S. Le Beux, "High performance 4:1 multiplexer with ambipolar double-gate FETs," in *2011 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 2011, pp. 677–680.
- [23] P. Sadeghpour and H. Mirzaei, "A 180 nm CMOS Low Noise Amplifier with Increased linearity using Current-Reuse Technique for Broadband Applications," *Journal of Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 21–27, 2019.
- [24] G. L. Madhumati, M. Madhavalatha, and K. Ramakoteswara Rao, "Power and delay analysis of a 2-to-1 multiplexer implemented in multiple logic styles for multiplexer-based decoder in Flash ADC," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 29–31, 2009.

# Determination of the characteristics of the wheat straw bale, as an agro-industrial waste for use as a construction material

Paulina Viera <sup>\*,a</sup> , Darío Aguirre <sup>a</sup> , José María Monzó <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>*Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.*

<sup>b</sup>*Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de València, Valencia, España.*

**Abstract.-** The objective of this research is to determine the physical-mechanical characteristics of the straw bales produced in Ecuador, in order to define their possible use in the construction of earthquake-resistant housing. For this purpose, experimental methods proposed by Vardy (2006) were used on the bales varying their position for flat and edge load tests. Thus obtaining the modulus of elasticity of the bundle bare and plastered on their faces, with a mortar based on lime cement and natural fibers previously designed. It was determined that the maximum modulus of elasticity of the plastered bundle varies between 12,98 and 18,67 MPa. These values were used to perform the structural modeling of a typical house through the use of a software to propose a housing solution that promotes the use of the straw bale produced in Ecuador for the construction of earthquake-resistant housing. From the analysis of this model, it is concluded that the maximum inelastic drifts of the proposed structure, with supporting masonry made with the straw bales, are less than 2%, with a rendering of thickness between 2 and 4 cm, concluding that the structural responses obtained comply with what is established for seismic-resistant housing in the Ecuadorian Construction Standard.

**Keywords:** modulus of elasticity; straw bale; housing; sustainability.

## Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción

**Resumen.-** El objetivo de esta investigación es determinar las características físico-mecánicas de los fardos de paja producidos en Ecuador, para definir su posible uso en la construcción de viviendas sismorresistentes. Para lo cual, se utilizaron métodos experimentales propuestos por Vardy (2006) en los fardos, variando su posición para pruebas de carga en plano y canto. Obteniendo así el módulo de elasticidad del fardo desnudo y revocado en sus caras, con un mortero en base de cal, cemento y fibras naturales previamente diseñado. Se determinó que el máximo módulo de elasticidad del fardo revocado varía entre 12,98 y 18,67 MPa. Estos valores fueron utilizados para realizar el modelamiento estructural de una vivienda tipo, mediante el uso de un software, para proponer una solución habitacional que fomente el uso del fardo de paja producido en Ecuador para la construcción de viviendas sismorresistentes. Del análisis de este modelo se concluye que las derivas inelásticas máximas de la estructura propuesta, con mampostería portante realizada con los fardos de paja, son menores al 2%, con un revoco de espesor de entre 3 y 4 cm, concluyendo que las respuestas estructurales obtenidas cumplen con lo establecido para viviendas sismorresistentes en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

**Palabras clave:** módulo de elasticidad; fardo de paja; vivienda; sustentabilidad.

Recibido: 26 de septiembre, 2020.

Aceptado: 28 de noviembre, 2020.

### 1. Introducción

En Ecuador, según datos oficiales INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) [1] y RIMISP (Rimisp-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural) [2], la tasa de pobreza extrema multidimensional a nivel rural creció de 39,9% a 42% en el año 2019. La falta de

\* Autor para correspondencia:  
Correo-e: lviera@uce.edu.ec (P. Viera)

recursos económicos, se refleja también en el déficit cualitativo de vivienda para esta misma zona a nivel nacional de 95,3 % según datos del último censo INEC [3].

Una de las principales fuentes de sustento económico de la población rural es la actividad agrícola. La cosecha y siembra de diversos productos representa una de la amplia gama de actividades relacionadas con la explotación de recursos naturales, la cosecha y siembra de trigo es una de ellas, sobre todo en la región rural de la Sierra. De acuerdo al MAGAP (Ministerio de Agricultura y Ganadería) [4], las provincias de producción triguera son Pichincha, Imbabura, Chimborazo, Bolívar, Carchi. Siendo Pichincha la que más producción aporta con un 27 %, le sigue Imbabura con 26 %, para un total de superficie sembrada y cosechada de trigo de aproximadamente 9.140 y 8.980 hectáreas respectivamente. Cabezas [5] cita un rendimiento de producción de trigo en el país de 2,5 toneladas por año. Sin embargo, en la zona rural de estas provincias se registra un déficit cualitativo de vivienda de 6,6 %; 2,4 %; 3,2 %; 1,7 % y 1,3 % respectivamente [6].

Dentro de la producción de trigo, la paja es un desecho que se empaca en forma de fardos prismáticos y constituye aproximadamente la mitad de la vegetación que se puede cosechar de un cultivo además de ser reutilizable, término referido al hecho que normalmente este desecho es empleado para el alimento del ganado. También se usa para cubrir suelos en contra de heladas, para oxigenar los suelos de cultivos, abono o simplemente como piso para establos. De acuerdo con varios autores, Martínez [7] y [8], en el mundo se registran más de 600 millones de hectáreas de cereal, por cada tonelada que se cosecha para el consumo, se generan 1,5 toneladas de paja como un residuo o desecho agrícola y de aquello el 90 % se quema. Ponce [9] afirma que en Chile se queman más de 4 toneladas de paja, material que de ser utilizado se aprovecharía para construir 100 viviendas. Por consiguiente el porcentaje que se desperdicia de este material es significativo y puede aprovecharse haciéndose un enfoque en la bioconstrucción con paja mediante

una caracterización del material.

La paja es un desecho agroindustrial que está constituida por el tallo seco de los cereales y plantas fibrosas, específicamente entre la raíz y la espiga, conociendo que existen pajas de trigo, escanda, centeno y arroz [7]. Minke [10] afirma que la paja es un material sostenible debido a los beneficios que ofrece no solo en el ámbito de la agricultura (necesidad de reducción de CO<sub>2</sub>) sino también en que es un material que no emite CO<sub>2</sub> u otros gases que pudieran afectar y generar un impacto ambiental negativo. Según Bernal [11], 10 kilogramos de paja de trigo absorben 14 kilogramos de dióxido de carbono, los cuales retienen durante el plazo de su vida.

Es necesario acotar que el impulso de utilizar este material sobre todo en las zonas rurales del país recae también en el hecho de que al ser un material amigable con el ambiente y que a su vez se complementa con materiales propios de la zona, el emplazamiento de viviendas unifamiliares aprovechando el porcentaje de fardos de paja que se quema, representa una opción viable de vivienda digna, accesible económicamente y de fácil construcción para la sociedad que vive en dichas zonas. Pachala [12] realiza una comparación de presupuesto referencial para tres tipos de viviendas ubicadas en la provincia de Bolívar-Guaranda: Casa unifamiliar con muros de paja portantes, con estructura metálica y mampostería de bloque, y con estructura de hormigón y mampostería de bloques, obteniendo \$10.066,18 \$17.856,25 y \$20.456,38 respectivamente, en donde se evidencia la diferencia económica notable del uso del fardo de paja con respecto a los materiales de construcción generalmente utilizados.

Con el aprovechamiento de este desecho; la actividad agrícola puede ser redireccionada a una gestión sostenible en el ámbito de la construcción [13]. El fardo de paja en conjunto con otros materiales comúnmente empleados en la edificación de viviendas, tales como madera, barro, arcilla cal y cemento, garantizan la posibilidad de levantar estructuras sostenibles con el medio ambiente, por tal motivo, el compuesto empleado que conforma la cara del fardo, es un revestimiento con menor coste energético y

suficientes propiedades resistentes para ser usado en la construcción, la investigación incorpora cal hidráulica para disminuir la cantidad de cemento en la fase matriz, y en la fase dispersa, usa fibras naturales extraídas de la planta de yute (*corchorus capsularis*) [14]. Su diseño además tiene como beneficio la reducción del impacto ambiental negativo, fomentando el uso de materiales alternativos, ecológicos y sustentables cuya fabricación reduzca la energía que se ocupa durante su elaboración, y que, en conjunto con los fardos de paja garantizan una obra ecológica.

Con los fardos de paja, se asegura la inclusión de una alternativa con bioconstrucción sostenible, de hecho, las construcciones más antiguas registradas y que actualmente siguen en pie datan entre 1900 y 1914 [15], en Europa tenemos “La Maison Feuillite” construida en 1921 y que actualmente se usa como sede del Centro Nacional para la Construcción con Paja de Francia [10], poco después de 1993 en Holanda se presentó el auditorio para la feria internacional de horticultura y jardinería “Floriade 2002”, considerado el edificio público más grande de Europa construido con fardos de paja. Martínez [7], plantea que gracias a estas obras, las construcciones con paja se han extendido por todo el mundo; EE.UU., Francia, Canadá, Inglaterra, Austria, Dinamarca, Australia; de manera que en la actualidad la construcción con este material esta presente en casi todos los continentes: África, Sudamérica, Norteamérica, Europa, Asia, entre otros.

La importancia de este estudio radica en que aporta datos, que antes de esta investigación no existían, acerca de las características físicas y mecánicas de los fardos producidos en el Ecuador para posibilitar a los profesionales de la construcción, el modelamiento estructural de edificaciones a ser construidas con este material. Esta caracterización se realizó mediante ensayos de laboratorio en base a normativa nacional e internacional (INEN-ASTM), estudiando al material con y sin revoco de acuerdo a la metodología aplicada por varios autores, Garas [16], Maraldi [17], Romans [18]; [19] y Rodríguez [20], especialmente Vardy [21]. El uso de mortero como recubrimiento de la mampostería portante

realizada con fardos, permite que el conjunto fardo-revoco funcione como una estructura del tipo sándwich donde la piel es el elemento mortero, y el núcleo es el fardo de paja, cuyo principio se basa en que los revestimientos absorben parte de los esfuerzos y cargas además proporcionan rigidez al conjunto.

Esta investigación, por tanto, representa además una alternativa al desarrollo rural del Ecuador en la construcción de vivienda. Por tal razón, y acompañado de las crecientes soluciones sostenibles a nivel mundial, se espera que los resultados obtenidos sirvan como punto de partida para otros estudios que permitan el desarrollo e implementación de una normativa constructiva técnica nacional respecto del uso de fardos de paja en la construcción. Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad, esfuerzos a compresión, densidades y contenidos de humedad son un aporte para la tecnificación de la construcción con fardos de paja producidos en el Ecuador y posibilita el modelamiento estructural. Como ejemplo se presenta una vivienda tipo de 120,35 m<sup>2</sup>, en donde se comprueba que las respuestas estructurales (derivadas de piso) cumplen con los requisitos estipulados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción [22], por lo tanto, el fardo de paja, es apto para su uso en la construcción.

## 2. Metodología

### 2.1. Recolección, procesamiento y análisis de datos

Esta investigación es experimental y se basa en procedimientos establecidos en la normativa nacional ecuatoriana INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y normativas internacionales ASTM (American Society of Testing Materials) esencialmente para la elaboración y diseño de las mezclas, elaboración de especímenes de prueba, aproximación de metodología basada en investigaciones internacionales como el de Vardy [21] para la obtención del módulo de elasticidad de los fardos de paja.

### 2.2. Materiales

Los materiales que conforman el mortero se pueden visualizar en la Tabla 1.

Tabla 1: Materiales del mortero

Material	Especificación
Cemento Hidráulico tipo GU-HOLCIM	NTE INEN 2380 [23](ASTM C 1157) [24]
Cal hidráulica T-30 (NHL)	NTE INEN 247 (ASTM C207) [25, 26]
Arena gradada	Cantera Fucusucu III-San Antonio-Quito.
Fibras naturales-yute ( <i>corchorus capsularis</i> )	Longitudes nominales de 2,5 a 5 cm
Agua	Red-Distrito Metropolitano de Quito



Figura 1: Enfardadora

### 2.3. Mortero

En la presente investigación se utilizó un revoco con características estructurales [21] que incorpora fibras en su dosificación, cuyo mortero de resistencia de 14,10 MPa cumple con la resistencia mínima de 6,89 MPa establecida por RB473 [27] para morteros cal-cemento aplicados en la construcción con fardos, valores que se puede observar en la Tabla 2, en concordancia además con Avon [28] y Solé [29], en donde se construyen muros con fardos de paja y se establece una resistencia mínima de 8 MPa para que el mortero sea suficientemente resistente. El diseño de este mortero se estableció en función de la Norma ASTM 305-14 y ASTM C192-16, así como la realización de ensayos de pruebas de carga para esfuerzo a compresión, módulo estático de elasticidad y coeficiente de Poisson, las condiciones de ensayo para Elasticidad y Poisson fueron lecturas cada 2,5 kN, gradiente de aplicación de carga 0,03 MPa/s, finalización de carga a 15 % de la rotura y una velocidad mínima de 0,10 s<sup>-1</sup>.

### 2.4. Fardos de paja

#### 2.4.1. Provisión de fardos

Los fardos de paja para el estudio fueron obtenidos directamente desde la parroquia rural Calacali (Figura 1), donados por el Ing. Jorge Dávila.

El trigo es un producto propio de dicha zona, en el cantón de Pichincha, específicamente Calacali existe área de producción de trigo de paja de 605 hectáreas [39]. Los fardos fueron trasladados hacia la Universidad Central del Ecuador para

su almacenamiento adecuado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos ubicándolos y apilándolos cuidadosamente sobre tabiques de madera evitando el contacto directo con el suelo y protegiéndolos de la humedad.

#### 2.4.2. Almacenamiento

Los fardos son almacenados encima de pallets de madera (Figura 2) evitando el acercamiento directo con el suelo para evitar el contacto con residuos y principalmente la humedad, los mismos deben ser cubiertos en su totalidad y así evitar el deterioro debido al contacto de agua, lo que genera por consiguiente su pudrición e inhabilita su uso.



Figura 2: Fardos almacenados en laboratorio

Maraldi y colaboradores en [40] y [41] coinciden en que, para revocar al fardo, ya sea con un mortero hecho con cal o con yeso, es necesario pulirlo, de tal forma que los restos de la paja que sobresalen de cada una de las caras puedan definirse en una longitud aproximada, de esta manera se garantizó un recubrimiento adecuado con un espesor definido en toda el área de la cara del fardo.

Tabla 2: Esfuerzo a compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

Id.	Dosificación	Esfuerzo a compresión axial (MPa)			Módulo estático de elasticidad (MPa)	Coef. de Poisson
		7 días	14 días	28 días		
M4	0.75C 0.25 cal 3A 1 %FY 20 %H <sub>2</sub> O	7,45	8,43	14,1	28 24859,08	28 0,21
Normativa	ASTM C 305, NTE 3124 [30](ASTM C 192 [31]) y NTE INEN 2518 [32] (ASTM C 270 [33])	NTE INEN 1573:2010 [34] (ASTM C 31 [35]), ASTM C 496-17 [36], NTE INEN 3124 (ASTM C 192M-18 [31] y ASTM C 511 [37])			ASTM C 469 [38]	

### 2.4.3. Densidad y Contenido de humedad

Para la caracterización del fardo desnudo (no revocado), es necesario determinar su contenido de humedad y densidad aparente, de manera que cumplan con los requisitos previo a su uso, por tal motivo se realizó la medición de las dimensiones de los fardos de paja, su respectivo pesaje según se muestra en la Figura 3 y la determinación de su contenido de humedad.

Para la obtención del contenido de humedad se utilizó el equipo F-2000, este aparato mostrado en la Figura 4 se utiliza mundialmente para asegurar y a su vez mejorar el control de calidad en cuanto a contenido de humedad se refiere, ya que dispone dentro de sus características un rango de humedad de entre 6–40 % y es empleado para verificar dicha característica del heno en la hilera o en los fardos.



Figura 3: Obtención del peso de fardo

Acotándose que para caracterizar el fardo de paja en cuanto a densidades, es necesario realizar la corrección por humedad del peso de cada uno de los especímenes, todo ello conforme la normativa estadounidense RB476-13 [27].



Figura 4: Ensayo de contenido de humedad

### 2.5. Revocado de los fardos de paja

Con la dosificación especificada, se procede al cálculo de la cantidad de materiales. Para el encofrado de los fardos se empleó tabla típica rústica de 5 cm de espesor, material que se presenta en la Figura 5, se programaron dos días para el trabajo donde los encofrados presentados se emplean para revocar el primer lado de los fardos, para posteriormente al día siguiente desencofrar y realizar la colocación del mortero en la otra cara de la mampostería. Cada encofrado tiene señalado en su interior el nivel de referencia para cumplir un espesor adecuado de variación entre 3–4 cm, en la Figura 6 se pueden observar los primeros fardos revocados, con el mismo procedimiento se revocaron los siguientes fardos.

Se programó el ensayo de Módulo de Elasticidad-Resistencia a la compresión a los 28 días.

### 2.6. Módulo estático de elasticidad en fardos de paja desnudos (no revocados)

Para la determinación de la propiedad se toma como base la investigación de Maraldi [41]





Figura 5: Encofrado tipo para revoco



Figura 6: Revoco de fardos de paja

denominada “Analysis of the parameters affecting the mechanical behavior of straw bales under compression”. En esta investigación se caracterizan fardos de diferente tipo, el estudio clasifica al fardo hecho con trigo, avena y “otros materiales” prediciendo el módulo de elasticidad mediante el modelo  $E \propto p^2$  ecuación cuyo concepto establece que el módulo de elasticidad se puede predecir mediante la densidad del material al cuadrado, por consiguiente es una relación directamente proporcional. La investigación citada se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Relación entre el módulo de elasticidad del fardo de paja y la densidad para diferentes subgrupos

Relación	Denominación	Posición	Relación $E \propto p^2$
1	Otros	Plano	$26,25p^2$
2	Otros	Canto	$25,53p^2$
3	Trigo	Plano	$12,05p^2$
4	Trigo	Canto	$11,51p^2$
5	Avena	Plano	$16,65p^2$
6	Avena	Canto	$13,90p^2$

Donde el valor del módulo de elasticidad se encuentra en Pa y la densidad en  $\text{kg/m}^3$ .

### 2.7. Módulo estático de elasticidad en fardos de paja revocados

Para la determinación del módulo estático de elasticidad se empleó 2 deformímetros ubicados en la parte izquierda y derecha del fardo de paja revocado los cuales se observan en la Figura 7 y 8; y se ocupó la norma ASTM C469 [38] para dicho ensayo con el método de la tangente cuerda, para la obtención del módulo se utilizó la ecuación (1).

$$E = \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \right), \quad (1)$$

donde  $E$ : módulo de elasticidad cuerda en  $MPa$ ,  $\sigma_2$ : esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga de rotura,  $\sigma_1$ : esfuerzo correspondiente a una deformación longitudinal  $\varepsilon_1$  de 5 millonésimos  $MPa$ ,  $\varepsilon_2$ : deformación longitudinal producida por el esfuerzo  $\sigma_2$ .

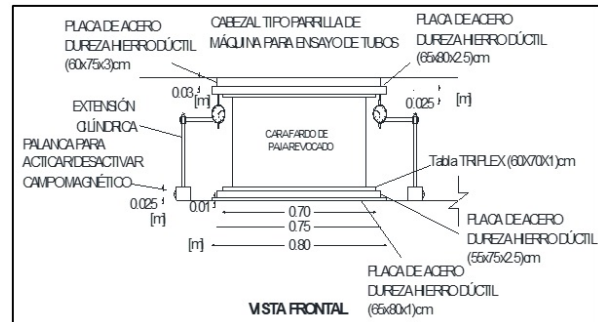


Figura 7: Ubicación de los deformímetros longitudinales para ensayo de módulo de elasticidad

En la Figura 9 se presenta un esquema general de un ensayo típico, se visualizan los datos a considerar en el método tangente-cuerda para la obtención del módulo, según la ecuación (1). Se ha seleccionado el método de la tangente cuerda ya que dicho procedimiento toma en consideración el mayor número de datos para el cálculo del módulo de elasticidad, además de la deformación longitudinal de 5 millonésimos  $MPa$  la cual se considera el valor más real para obtener esta propiedad.

Cabe recalcar que, inicialmente se obtuvieron 2 módulos de elasticidad para cada fardo revocado



Figura 8: Dispositivo de acoplamiento para deformímetro longitudinal

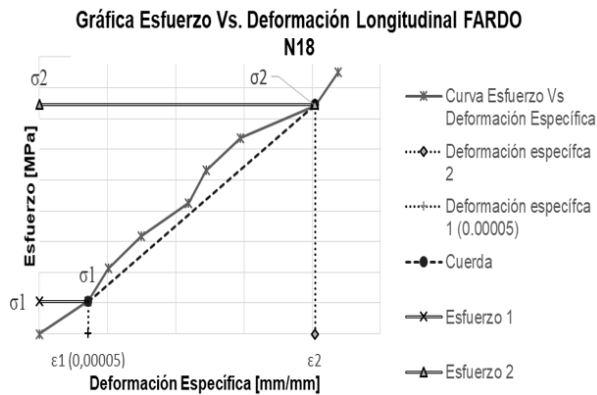


Figura 9: Método de la tangente-cuerda, gráfico esfuerzo vs deformación

debido al empleo de 2 deformímetros por ensayo, posteriormente a aquello, se consideró necesario realizar un promedio de las deformaciones obtenidas por cada nivel de carga, realizando las correspondientes curvas  $\sigma$  vs  $\varepsilon$  y diferenciándose de acuerdo a las condiciones de los ensayos (orientación en plano o canto y de acuerdo a espesor del recubrimiento); determinando de esta manera el módulo de elasticidad promedio experimental

para fardos de paja en posición plano, canto y con espesor de 3 a 4 cm.

Para el caso de  $\sigma_1$  se tomó el rango de datos de esfuerzo y deformación determinándose la pendiente de esta sección al momento del asiento del cabezal en el revoco del fardo para multiplicarse por la deformación de 5 millonésimos, obteniéndose  $\sigma_1$  y  $\varepsilon_1$  (0,00005). Para  $\sigma_2$  se consideró la toma de datos hasta el 40 % de la carga de rotura y por ende esfuerzo proyectado, se tomó el rango de esfuerzo y deformación para el cálculo de su pendiente, calculándose de esta manera  $\sigma_2$  y  $\varepsilon_2$  y por ende el cálculo del módulo  $E$ . Vardy [21] realiza el cálculo del módulo de elasticidad con la metodología del módulo cuerda, la diferencia en el cálculo de la propiedad con la presente investigación recae en la consideración del  $\sigma_2$  más allá del 40 % de la carga de rotura, esto no fue posible para el estudio dado que fue necesario el retiro de los equipos antes de la rotura para asegurar la integridad de los mismos.

### 2.8. Modelación de vivienda unifamiliar en ETABS

Para comprobar el posible uso del desecho agroindustrial estudiado en la construcción, se realizó la modelación estructural de una vivienda (120,35 m<sup>2</sup>) con muros portantes de fardos de paja en donde se utilizó como dato necesario el módulo de elasticidad obtenido en esta investigación.

La estructura modelada posee 2 pisos, misma que se observa en la Figura 12, con una altura de entrepiso de 2,75 m; con cubierta y el sistema estructural conformado por muros portantes de fardos de paja revocados con las propiedades obtenidas. El entrepiso es un entablado de madera con espesor de 3,5 cm; cubierta con altura de onda (espesor modelado) de 3,7 cm. Vigas perimetrales de entrepiso de 20 × 25 cm, para soporte de cercha más cubierta de 6,5 × 14 cm, longitudinales e interiores 6,5 × 14 cm y para conformación de cerchas de 4,5 × 9 cm. Todo el material a excepción de los muros, corresponde a madera tipo B, madera denominada “Colorado” [42], misma que no presenta ningún ataque microbiológico o de insectos, no tiene deficiencias de secado, alabeos, fendas, deformaciones ni desgarros y que cumple

con todas las especificaciones tanto mecánicas, técnicas y tecnológicas. Un detalle de aquellas especificaciones se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Especificaciones técnicas para madera tipo B [15]

Esfuerzo a la flexión	150 kg/cm <sup>2</sup>
Tracción paralela a las fibras	105 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión paralela a las fibras	110 kg/cm <sup>2</sup>

Se presenta la configuración arquitectónica en planta para el piso 1 y 2 en las Figuras 10 y 11, en la mismas se pueden observar la distribución de espacios.



Figura 10: Vista en planta, primer piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja

A continuación, se puede observar la vivienda modelada en 3D y en la Figura 13 se presenta una sección de la configuración del material tipo sánduche (revoco-fardo-revoco), sistema a modelar en ETABS más adelante.

Se presenta una sección del material tipo sánduche caracterizado, y su ubicación en la vivienda.



Figura 11: Vista en planta, segundo piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja

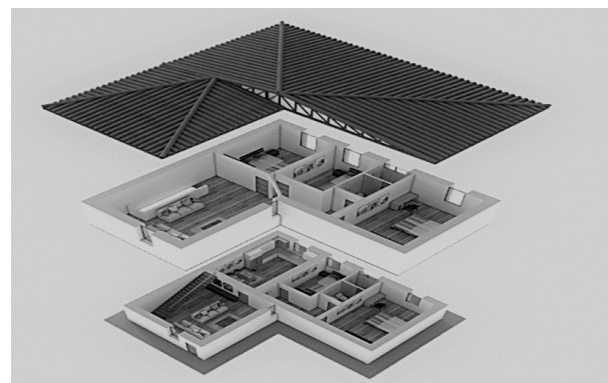


Figura 12: Vista en 3D de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja revocados

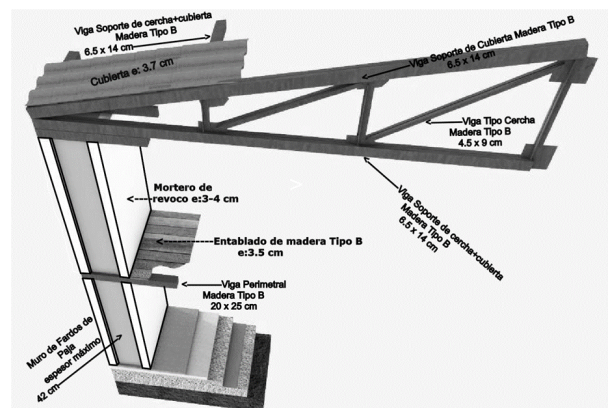


Figura 13: Muro de fardo de paja, sección vista tipo sánduche

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos realizada la caracterización del fardo de paja antes y después del revoco aplicado.

##### 3.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad promedio de los 20 fardos que conforman la muestra es 10,3%. Para una mejor observación e interpretación de estos resultados con el límite máximo de contenido de humedad, se presenta la Figura 14, la misma que detalla el contenido de humedad obtenido en cada fardo de paja.

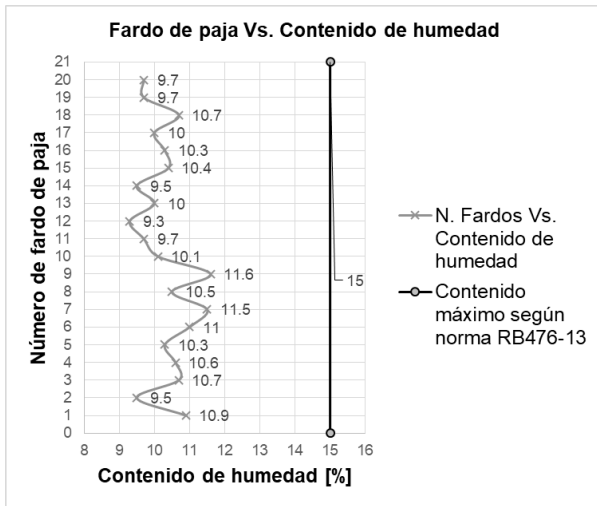


Figura 14: Fardo de paja vs. Contenido de humedad

Por consiguiente, los fardos de paja cumplen con dicha disposición ya que los resultados obtenidos no sobrepasan el límite máximo permisible.

##### 3.1.2. Densidad aparente

La normativa estadounidense RB473 [27] en su apéndice denominado “Construcción con fardos de paja”, estipula la necesaria corrección por humedad que se debe realizar en el peso de los fardos de paja previo cálculo de la densidad aparente. Dicha corrección consiste en determinar el valor representativo del contenido de humedad en el fardo de paja, posteriormente restarlo del peso del material y proceder al cálculo de la densidad mediante la relación masa sobre volumen de acuerdo con la ecuación (2).

$$D.A = \frac{Peso_{fardo} - (Peso \cdot Cont_{Humedad})}{Volumen} \quad (2)$$

En la Figura 15 se presenta el esquema representativo de los valores de densidades aparentes corregidas cuyo promedio fue 88,83 kg/m<sup>3</sup>, de tal forma que se puede observar que ningún valor es inferior al valor mínimo permisible ni superior al valor máximo permisible, por consiguiente, todos los fardos de paja cumplen los requisitos de caracterización para su uso.

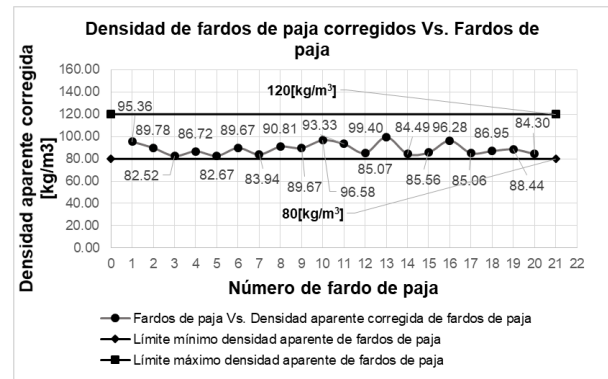


Figura 15: Densidad de fardos de paja corregidos vs. Fardo de paja

##### 3.1.3. Módulo de elasticidad en fardo de paja desnudo

La investigación se enfocó únicamente en el fardo hecho a base de trigo, por tal motivo, se seleccionó la relación 3 y 4 de la Tabla 3, no obstante, es necesario aclarar que los resultados de los investigadores en las ecuaciones seleccionadas se determinaron con una densidad promedio del fardo de paja de 146,1 kg/m<sup>3</sup>. Se realizó una relación entre dicha densidad y la obtenida de manera experimental de los fardos recogidos en Calacalí, que es en promedio 88,83 kg/m<sup>3</sup>, determinándose en la Tabla 5 las siguientes ecuaciones para el presente estudio.

Con esta relación se procede al cálculo del módulo de elasticidad del fardo de paja desnudo (no revocado), se diferencian por posición y espesor de revoco con la finalidad de discutir el módulo con y sin revestimiento, estos resultados se observan en la Figura 16.

Tabla 5: Relación  $e^\infty p^2$  obtenida

N	Identificación	Posición	Relación Maraldi et al	Relación obtenida
3	Trigo	Plano	$12,05p^2$	$7,33p^2$
4	Trigo	Canto	$11,51p^2$	$6,99p^2$

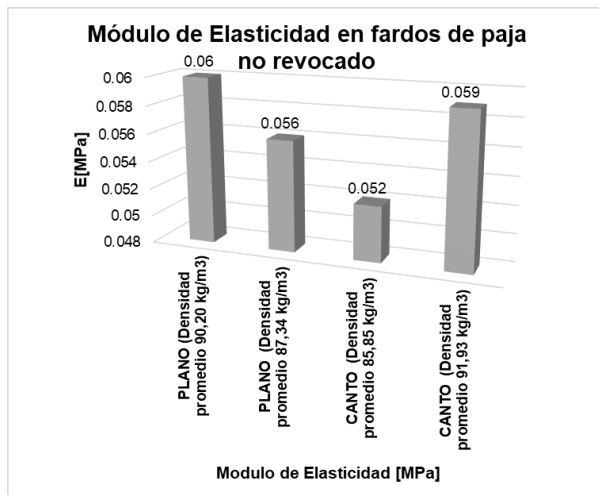


Figura 16: Cálculo del módulo de elasticidad del fardo de paja sin recubrimiento

### 3.1.4. Módulo de Elasticidad Promedio Experimental de fardo de paja revocado

Una vez realizada la gráfica esfuerzo vs deformación experimental para obtener el módulo de elasticidad de la mampostería, será necesario ponderar los esfuerzos a compresión obtenidos, para el caso de posición plana e: 3 cm, posición plana e: 4 cm, posición canto e: 3 cm y en posición canto e: 4 cm. Además, así como se obtuvo un módulo de elasticidad promedio, es ideal asumir una sola constitución (dimensiones de los fardos para cada caso) diferenciando la posición y el espesor. Con estos datos y habiéndose obtenido las deformaciones generalizadas (promedio) para cada caso se presentan en la Figura 17 los valores generalizados promedios previo al cálculo del módulo de elasticidad en fardos de paja revocados.

Determinándose los siguientes módulos de elasticidad en la Tabla 6, aplicado la metodología de Vardy [21].

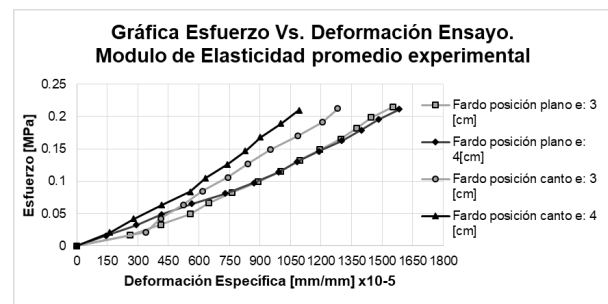


Figura 17: Datos de deformaciones y esfuerzos para módulo de elasticidad promedio experimental

Tabla 6: Esfuerzo y módulo de elasticidad en fardos de paja revocados

Posición	e (cm)	Prom $\delta_{m\acute{a}x}$ (MPa)	A (cm)	L (cm)	H (cm)	E (MPa)
Plano	3	0,43	48	63	33,9	13
	4	0,48	49,6	62	34,2	13,1
Canto	3	0,37	38	62	47,3	15,7
	4	0,42	38	61,4	46,7	18,7

### 3.1.5. Módulo de elasticidad y densidad de fardos de paja revocados

En lo referido a la Figura 18, se puede observar la relación directamente proporcional que existe entre la densidad de los fardos de paja revocados y el módulo de elasticidad ( $E \propto D$ ), a medida que más alto sea la densidad de los fardos de paja revocados, mayor será el módulo de elasticidad para los mismos. Se obtienen mejores resultados en cuanto a módulo de elasticidad se refiere cuando el fardo se encuentra dispuesto en posición canto, derivado de una densidad mayor con respecto a los fardos en posición plano, esto se debe a la posición propia del fardo, al ser revocado en posición canto el peso del mortero empleado es superior comparado con la posición plano.

### 3.1.6. Derivas de piso

Con la caracterización realizada al mortero y fardo de paja, se procedió a realizar la modelación, empleando un sistema de muros portantes cuya base de la vivienda es el propio material estudiado (revoco-fardo-revoco), visto en la Figura 13. De la modelación planteada posterior a la caracterización para la evaluación del fardo de paja como material

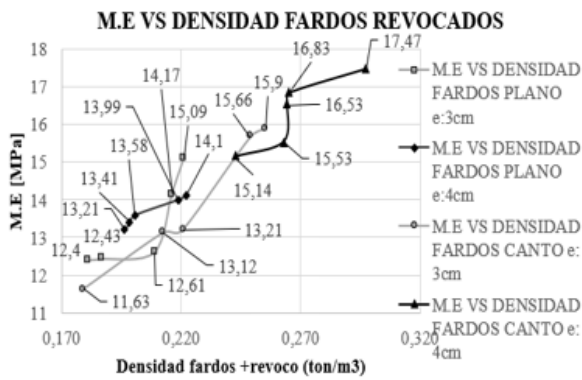


Figura 18: Relación módulo de elasticidad vs. Densidad de fardos de paja revocados

de construcción, se obtuvieron las derivas de piso para los casos de muros con fardos de paja en posición plano y canto, variando el espesor del revoco de 3 a 4 cm, se presenta las derivas máximas obtenida para el caso posición plano e: 3 cm en la Figura 19.

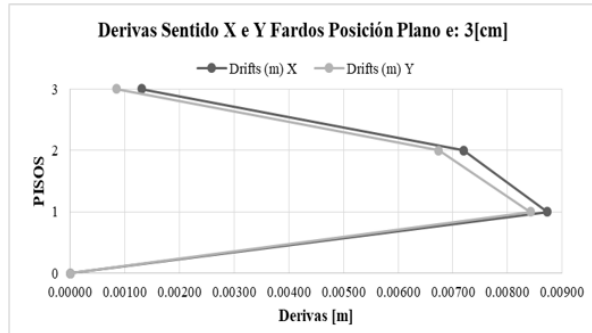


Figura 19: Deriva de piso sentido x e y para modelo fardos posición plano e: 3 cm

De los resultados obtenidos para derivas inelásticas máximas, se puede analizar que las mismas se reducen para posición de plano en sentido *x* en 4,08 % y en sentido *y* en 4,23 %, posición de canto en sentido *x* en 14,77 % y en sentido *y* en 14,43 % cuando se emplean fardos con un espesor de recubrimiento de 4 cm, por consiguiente, se obtienen mejores resultados cuando el revoco es mucho mayor como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Derivas inelásticas máximas

Espesor (cm)	Posición			
	Plano		Canto	
	x	y	x	y
3	1,96 %	1,89 %	2,03 %	1,94 %
4	1,88 %	1,81 %	1,73 %	1,66 %
mínimo	1,88 %	1,81 %	1,73 %	1,66 %

### 3.2. Discusiones

#### 3.2.1. Densidad aparente corregida

Réseau Francais RFCP [43], RB473 [27] y [40], coinciden en que para el empleo del fardo de paja como material para la construcción, se debe cumplir con una densidad de entre 80–120 kg/m<sup>3</sup>. Si se empleara el fardo tomando en consideración los valores, previa corrección por humedad, se obtiene que el promedio general de densidades con respecto al límite máximo permisible cumple con este requisito en un 82,52 %, es decir un porcentaje aceptable e idóneo. No obstante, es necesario realizar la corrección por humedad debido a las consecuencias que conlleva el uso de fardos húmedos, por tal motivo al realizar la corrección por humedad el cumplimiento de este requisito y que se visualiza en la Figura 15 se disminuye en un 74,03 %. Cabe recalcar que este último porcentaje representa la densidad promedio aparente de 88,83 kg/m<sup>3</sup>. Investigaciones como las de varios autores, [16], [44], caracterizan al fardo previo a su uso con un contenido de humedad general de 11,02–19 %, es decir, superior al valor representativo usado en la presente investigación y para densidad promedio 84,75 kg/m<sup>3</sup>.

#### 3.2.2. Contenido de humedad

Según varios autores [45], [27] y Resa [46], para el uso de fardos en la construcción estos deben cumplir con un contenido de humedad menor al 15 %, se puede observar en la Figura 14 que las muestras cumplen con dicho requisito. Por ende la caracterización del fardo de paja sigue un cumplimiento totalmente aceptable.

### 3.2.3. *Módulo de elasticidad de fardo de paja sin revoco*

En la Figura 16 se presenta los resultados correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad de los fardos de paja sin la aplicación de un revoco, de acuerdo al modelo propuesto Maraldi [40] de predicción de módulo de elasticidad en función de la densidad del material, los resultados obtenidos identifican a un material con un módulo pequeño de entre 0,052–0,06 MPa característico de un espécimen totalmente flexible que incursiona en el rango no lineal de manera brusca debido a las solicitaciones de carga. En el caso de Maraldi [41] obtienen resultados entre 0,08–0,11 MPa, valores más altos debido a la densidad superior de 146,1 kg/m<sup>3</sup> por encima con respecto a la del presente trabajo que fue de 88,83 kg/m<sup>3</sup>, corroborándose la relación que afirma que el módulo aumenta a medida que la densidad de este material es mayor, lo que se relaciona típicamente con una mejora en el comportamiento del material.

### 3.2.4. *Módulo de elasticidad de fardo de paja revocado*

Debido a este comportamiento impredecible por la constitución propia del fardo, varios investigadores citados anteriormente recomiendan la caracterización del fardo de paja con un mortero de recubrimiento, evidentemente el módulo de elasticidad para este caso aumenta, debido al cambio a material compuesto. Tal como se evidencia en la Tabla 6 el valor máximo del módulo de elasticidad en fardo desnudo (no revocado) fue de 0,10 MPa, este valor aumenta considerablemente cuando el fardo es analizado individualmente con un revoco donde el módulo máximo obtenido es de 18,67 MPa.

### 3.2.5. *Esfuerzo a compresión de fardos de paja*

Para el caso de esfuerzo a compresión se obtiene que para fardos en posición plano con espesor de 3 cm se reduce 9,86 % la resistencia con respecto a fardos con espesor de 4 cm; para el caso de fardos en posición canto con espesor de 4 cm se reduce en 12,29 % la resistencia con respecto a fardos con espesor de 4 cm.

### 3.2.6. *Relación Densidad Vs Módulo de Elasticidad*

Referido a la Figura 18 se puede afirmar que la relación presentada por Maraldi [40] denominada “*Assessment and modelisation of the mechanical performance of straw bales for use in construction*” donde establecen una relación directamente proporcional entre el modulo de elasticidad del fardo en función de la densidad del mismo; se cumple para el presente estudio.

## 4. Conclusiones

Los fardos en posición canto presentan un mejor comportamiento del material, debido a su aumento en el módulo de elasticidad, por otro lado para fardos en posición plano su módulo es más pequeño pero resisten mejor las solicitaciones a compresión; esto significa que se puede disponer los fardos en posición plano debido a que estos resisten mucho más, pero también se puede considerar el empleo en posición canto por ahorro de espacio en el área de emplazamiento de una vivienda, tomando en cuenta la configuración arquitectónica.

Respecto al comportamiento mecánico general de los fardos de paja se puede concluir que la configuración de los fardos puede generar la suficiente rigidez para que esta sea capaz de soportar cargas producidas por un muro portante, de tal forma que su resistencia esta en función de su posicionamiento (plano-canto), sus dimensiones, densidad, el pretensionamiento de las cuerdas de los fardos y fundamentalmente por el espesor de recubrimiento que se le aplique.

El control de la forma y dimensiones estándar de los fardos de paja representan un aspecto importante para el aseguramiento de mejores resultados estructurales, la forma de los fardos y particularmente su esbeltez influye directamente en la rigidez de un muro hecho a base de este material.

La falta de un control estricto sobre las dimensiones de los fardos y por consiguiente su densidad, afecta en ultima instancia a las propiedades mecánicas de los mismos, razón por la cual los resultados fueron bastante variables y apenas controlables en un fardo con respecto a otro. Este problema debe solucionarse en la producción,

de esta manera se asegura la repetibilidad de los resultados post-ensayo destructivo referido al comportamiento mecánico del fardo de paja. Es decir la caracterización del material y el comportamiento mecánico están directamente relacionados.

La caracterización física realizada en los fardos locales cumplen con los requisitos previos a su uso en la construcción, este comportamiento favorable en conjunto con las propiedades mecánicas se comprueba con los resultados obtenidos en la modelación, puesto que de la simulación realizada mediante software ETABS se concluye que las derivas inelásticas máximas de la vivienda tipo son menores al 2 % para los casos de sentido plano y canto en sentido  $x$  e  $y$  con espesor de 3–4 cm, por lo que cumple con los requisitos constructivos establecidos por NEC “Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente” y por consiguiente el material es apto para su uso en la construcción.

Se obtuvieron mejores resultados a compresión a medida que el espesor del revoco aumenta, registrando un incremento de resistencia del 36,29 % en posición plano cuando el revoco pasa de 3 a 4 cm, así como un crecimiento del 53,93 % en posición canto cuando el revoco aumenta.

Los resultados servirán para aumentar el conocimiento general de la construcción con fardos de paja y su comportamiento estructural, a su vez ayudará a aumentar la credibilidad de uso aplicando este material como una técnica de construcción convencional y proporcionará una base para las futuras investigaciones sobre el rendimiento estructural de paredes de fardos revocados en el país.

## 5. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU), diciembre 2019, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2019.
- [2] RIMISP, “Pobreza y Desigualdad. Informe Latinoamericano,” Centro Latinoamericano para el desarrollo rural, Reporte Técnico, 2019.
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Las Condiciones de vida de los Ecuatorianos. Resultados de la Encuesta de Condiciones de Vida-Quinta Ronda, Ecuador.” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2010.
- [4] Ministerio de Agricultura y Ganadería MAGAP, “Sistema de información pública agropecuaria. Boletín Situacional. Trigo, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2017.
- [5] E. Cabezas and A. Sotelo, “Relación del sector agrícola del trigo en la producción de harina en la provincia de Pichincha-Ecuador,” Trabajo Especial de Grado para optar al título de Economista, Universidad Central del Ecuador, 2017.
- [6] M. Villegas and G. Rodríguez, “Cambios en la estructura de créditos hipotecarios ecuatorianos luego de la aplicación de políticas públicas habitacionales. Período 2005–2015,” Trabajo Especial de grado para optar al título de Magister en Finanzas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, 2017.
- [7] C. Martínez, “Estudio y Aplicaciones de las Construcciones con fardos de paja,” Trabajo de grado para optar al grado en Fundamentos de Arquitectura, Universidad de Valladolid, 2019.
- [8] B. Jones, *Building with Straw Bales: A Practical Manual for Self-Builders and Architects*. United Kingdom: Green Books, 2015.
- [9] V. Ponce, “Análisis de eficiencia energética de muro con fardos de paja y revoques de tierra cruda,” Trabajo para optar al grado de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2017.
- [10] G. Minke and F. Manlke, *Manual de Construcción con fardos de paja*. Uruguay, Montevideo: Editorial Fin de Siglo, 2006.
- [11] M. Bernal y E. Montañez, “Uso de la paja en la construcción de panales aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura,” Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, 2018.
- [12] J. Pachala and H. Rosero, “Sistema Constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes,” Tesis de Maestría, Universidad Central de Ecuador, 2016.
- [13] F. Pauta, “La sostenibilidad en la construcción desde las perspectivas de la ordenación territorial y urbanística en Ecuador,” *Estoa. Revista De La Facultad De Arquitectura Y Urbanismo De La Universidad De Cuenca*, vol. 3, no. 4, pp. 55–69, 2014.
- [14] V. Arroba, L. Morales, y J. Monzo, “Diseño y caracterización de un compuesto a base de cal, cemento y fibras naturales para edificaciones,” in *VII Congreso REDU Universidad Yachay Tech, Urcuquí, Ecuador*, ser. Diseño, Arte, Geo-Ciencias, Arqueología, Paleontología, Arquitectura, Patrimonio, Ciudad y Territorio, Geo-Parques, S. Agathos, M. Cevallos, F. Alexis, G. Salum, J. Chacon, A. Sommer, E. Piispa, M. Larrea, M. Alonso, J. Ventura, I. Pineda, O. Chang, y C. Serrano, Ed., vol. 1, 2019, pp. 903–910.



- [15] R. Nitzkin and M. Termens, *Casas de Paja, una Guía para autoconstrucción*. Ediciones EcoHabitar, 2010.
- [16] G. Garas, M. Allam, H. El Kady, and A. El Alfy, “Compressibility of single un-rendered rice straw bales: Characteristics of bales used for building,” *ARPVN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 5, no. 5, pp. 84–99, 2009.
- [17] M. Maraldi, L. Molari, and G. Molari, “Construction for Sustainability, Green Composites, Materials and Technologies,” in *16th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (16th NOCMAT 2015) Winnipeg, Canada*, ser. The Alternative Villages, K. Dick, D. Ruth, D. Mann, F. Delijani, M. Friesen, C. Cowan, A. Skrabek, J. Premak, N. Balakrishnan, M. Riesmeyer, M. Wurkat, Ed., vol. 1. University of Manitoba, 2015, pp. 1–7.
- [18] I. Romans, M. Iborra, y A. López, “Estudio y Análisis de la construcción con balas de paja. Comparación del sistema estructural CUT con la construcción convencional de H.A,” Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2014.
- [19] M. Cebada-Sánchez, “Construir con balas de paja,” *CERCHA Revista de Arquitectura Técnica*, vol. 1, no. 132, pp. 74–77, 2017.
- [20] C. Rodríguez y G. Lira, “Construcción con fardos. Una alternativa para la Región de la Araucanía,” Tesis de Maestría, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile, 2007.
- [21] S. Vardy and C. MacDougall, “Compressive Testing and Analysis of plastered Straw Bales,” *Journal of Green Building*, vol. 1, no. 1, pp. 63–79, 2006.
- [22] NEC-SE-DS., *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*, Ecuador, Ministerio del Desarrollo Urbano y Vivienda, Gobierno de la República de Ecuador, 2015.
- [23] NTE INEN 2380, *Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011.
- [24] ASTM C1157M-17, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [25] ASTM C207-18, *Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [26] NTE INEN 247, *Cal hidratada para uso en mampostería. Requisitos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2015.
- [27] International Code Council, Inc, *2015 International Residential Code*. International Code Council, Inc, 2016, ch. Appendix S Strawbale Construction.
- [28] B. Avon and B. Swartzchick, “Straw bale seismic design capacities 2,” SENIOR DESIGN PROJECT REPORT, Santa Clara University, 2014.
- [29] A. Solé, “Muros estructurales de fardos de paja: Relación entre los esfuerzos axial y cortante en muros de carga de fardos precomprimidos y revestidos con mortero de cemento,” Tesis de Maestría, Universidad Politècnica de Catalunya., 2014.
- [30] NTE INEN 3124, *Obtenido de Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017.
- [31] ASTM C192M-18, *Standard Practice for Preparation and Curing of Concrete Specimens for Laboratory Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [32] NTE INEN 2518, *Morteros para unidades de mampostería. Requisitos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010.
- [33] ASTM C270-19ae1, *Standard Specification for Mortar Unit Masonry*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [34] NTE INEN 1573, *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010.
- [35] ASTM C31/C31M-19a, *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [36] ASTM C496/C496M-17, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [37] ASTM C511-19, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [38] ASTM 469/C469M-14, *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Ecuador., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [39] Sistema Nacional de Información, “Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial. Obtenido de Parroquia Calacali, Ecuador.” Gobierno de la República de Ecuador, Reporte Técnico, 2015.
- [40] M. Maraldi, L. Molari, G. Molari, and N. Regazzi, “Construction for Sustainability, Green Composites, Materials and Technologies,” in *17th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (17th NOCMAT 2017) Mérida, Yucatán, México, November 26th-29th, 2017*, ser. Construction materials and technologies to deliver affordable housing, P. Herrera, G. Canché, P. González, A. Valadez, F. Avilés, C. Rios, J. Uribe, J. Carrillo, and E. Flores, Eds. CICY CONACYT, 2017, pp. 242–254.
- [41] M. Maraldi, L. Molari, and G. Molari, “Analysis of the parameters affecting the mechanical behaviour of straw bales under compression,” *Biosystems Engineering*, vol. 160, no. 1, pp. 179–193, 2017.

- [42] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, *Guía de diseño. Guía práctica para el diseño de estructuras de madera, de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Ecuador, 1era ed., Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI, 2016.
- [43] Réseau Français de la construction en paille, *Règles professionnelles de construction en paille. Remplissage isolant et support d'enduit*, 2nd ed. Francia: Moniteur, 2014.
- [44] H. Abba and M. Abbagana, “Compressive Strength Testing of plastered straw bale,” *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 554–568, 2015.
- [45] L. Viera, O. Coox, and J. Rivera, “Determinación de la inercia, conductividad y transmitancia térmica de mampuestos producidos en el cantón Mejía, provincia de Pichincha,” Trabajo Especial de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador, 2019.
- [46] F. Resa, “Propuesta de técnicas de autoconstrucción sostenible en la comunidad Tupí Guaraní Río Banda Sur Iguopeigenda (Argentina),” Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

# Efficiency of water collection for three types of mesh trappers in rural highlands of the northern highlands of Peru

Luis Vásquez-Ramírez <sup>\*,a</sup> , Luis Cieza-León <sup>b</sup> , Dante Cieza-León <sup>c</sup> 

<sup>a</sup>Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú

<sup>b</sup>Ingeniero Hidráulico de la Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú

<sup>c</sup>Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de Chota. Cajamarca, Perú

**Abstract.-** The present investigation was carried out with the purpose of estimating the efficiency of water collection contained in the fog and mist in an area of the heights of the northern highlands of Peru, for this purpose, two-dimensional design of 24 m<sup>2</sup> of three-meter trappers were used. of meshes: raschel mesh, mosquito net and metal mesh, which were located linearly transverse to the most predominant wind direction, a semi-automatic meteorological station was used for on-site data collection, which after processing allowed Confirm adequate conditions for the collection of water from fog and mist. La Palma, a high Andean town in the northern highlands of Peru located in the Cajamarca region with an altitude above 2800 m.a.s.l. It was the scenario for the application of the research for 92 days in the months of November, December of the year 2018 and January of the year 2019, finding that in all the days of analysis the conditions for water collection were given, concluding that the efficiencies of collection with the three meshes used are very similar, with said average efficiencies being 1,89 L/m<sup>2</sup>/d, 1,84 L/m<sup>2</sup>/d and 1,77 L/m<sup>2</sup>/d, for the metallic, mosquito net and raschel meshes respectively, the results found support the implementation of this type of unconventional water collection in high Andean rural areas with water deficit for population use.

**Keywords:** trappermists; fog; mists; raschel mesh; mosquito mesh; metal mesh.

## Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú

**Resumen.-** La presente investigación se realizó con la finalidad de estimar la eficiencia de captación de agua contenida en la niebla y neblina en una zona de las alturas de la sierra norte del Perú, para ello se utilizaron atrapanieblas con diseño bidimensional de 24 m<sup>2</sup> construidas con tres tipos de mallas: malla raschel, malla mosquitero y malla metálica, las cuales fueron ubicadas linealmente en forma transversal a la dirección del viento más predominante, se utilizó una estación meteorológica semi automática para la toma de datos in situ, los cuales luego de su procesamiento permitieron confirmar condiciones adecuadas para la captación de agua de la niebla y neblina. La Palma, una localidad altoandina de la sierra norte del Perú ubicada en la región Cajamarca con una altitud sobre los 2800 ms.n.m. fue el escenario para la aplicación de la investigación durante 92 días en los meses de noviembre, diciembre del año 2018 y enero del año 2019, encontrándose que en la totalidad de días de análisis se dieron las condiciones para captación de agua, concluyéndose que las eficiencias de captación con las tres mallas utilizadas son muy similares, siendo dichas eficiencias promedio 1,89 L/m<sup>2</sup>/d, 1,84 L/m<sup>2</sup>/d y 1,77 L/m<sup>2</sup>/d, para las mallas metálica, mosquitero y raschel respectivamente, los resultados encontrados fundamentan la implementación de este tipo de captación de agua no convencional en la zonas rurales altoandinas con déficit de agua para uso múltiple.

**Palabras clave:** atrapanieblas; nieblas; neblinas; malla raschel; malla mosquitero; malla metálica.

Recibido: 28 de octubre, 2020.

Aceptado: 27 de noviembre, 2020.

### 1. Introducción

La necesidad de obtener nuevas fuentes de agua va en aumento, por ello se busca nuevas alternativas para solventar las necesidades de abastecimiento de agua, los que requieren de especial atención por ser un bien de primera necesidad para los seres vivos, [1]. Por otro lado Sánchez [2], indica que los efectos

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: lvasquez@unc.edu.pe (L. Vásquez-Ramírez)

del cambio climáticos y calentamiento global están haciéndose notar cada vez más, consecuencia de esto es la sequía, que actualmente está afectando al mundo y en específico al continente sudamericano, donde este cambio se demuestra en zonas que antes no estaban clasificadas como desérticas y ahora sí están, conjuntamente la accesibilidad al recurso en muchas zonas rurales afecta directamente. Pues Fessehaye [3], indica que recientemente se han estudiado diferentes alternativas tales como captación de fuentes superficiales y subterráneas y el agua de niebla para la solución de la problemática de escasez y calidad de agua a nivel global con la finalidad de ofrecer agua de fuentes seguras.

Es por ello ante la necesidad de agua para cubrir el desabastecimiento actual y futuro, esta investigación se centra en la niebla y neblina como fuente alternativa de abastecimiento de agua, pues Cereceda [4] indica que la niebla es una nube a ras de suelo se compone de gotas de agua que por ser tan pequeñas no tienen peso suficiente para caer y, por lo tanto, quedan suspendidas en el aire y son desplazadas por el viento. Por supuesto dependiendo del tipo de uso es transversalmente importante investigar la calidad de este tipo de agua, por ello investigadores como Ali [5] en su trabajo encontró que las aguas captadas de niebla y neblinas fueros alcalinas, teniendo en consideración que dichas aguas son fácilmente contaminable por la polución en Delhi, Norte de India, mientras que Baquero, Delvasto, & Mejía [6] en su investigación “Evaluación de la calidad de agua de niebla recolectada en Choachí, Colombia” demuestran que la calidad de agua de niebla colectada por medio de un atrapaniebla piloto cumple con la normatividad de Calidad de Agua Colombiana.

Para investigadores como [7] la importancia de los sistemas de captación de agua con base a la neblina puede llegar a constituirse como una alternativa viable que suple en parte la demanda de agua, en zonas donde las fuentes hídricas no son suficientes. Además, es importante tener en cuenta las condiciones meteorológicas donde se ubiquen los atrapanieblas como bien lo resalta Salem [8].

La mayoría de centros poblados rurales de la sierra del Perú ubicados en las alturas de los

andes tienen mucha necesidad de agua, debido a que no existen fuentes superficiales o las que existen se encuentran en puntos muy bajos que hace inaccesible económicamente su explotación El Centro Poblado La Palma, está ubicado en el distrito de Conchán, de la provincia de Chota, departamento de Cajamarca; esta zona cuenta con un déficit de abastecimiento de agua a razón de que está ubicada en la parte alta de la montaña (2842 ms.n.m); los pobladores realizan esfuerzos físicos o usando acémilas diariamente para llevar agua a sus viviendas desde montaña abajo. Pero, la zona en estudio, presenta una posible ventaja hídrica, que son sus nieblas y neblinas que pueden ser aprovechadas mediante malla atrapanieblas que es una tecnología apta para este tipo de condiciones. Es por ello que se genera la siguiente pregunta como una idea para solventar la problemática del lugar: ¿Cuánto volumen de agua se puede aprovechar usando malla atrapanieblas en el Centro Poblado La Palma-Chota? “Los atrapanieblas son un sistema para atrapar las gotas de agua microscópicas que contiene la neblina y nieblas, mediante una malla a manera de letrero que se opone al curso normal de las nieblas y neblinas que son llevadas por el viento”, [1].

En los últimos años en el mundo se han tenido resultados alentadores sobre la captación de agua a partir de atrapanieblas a diferentes altitudes, pero muy pocas sobre los 2000 ms.n.m., es así que Cereceda [4], luego de un monitoreo durante tres años consecutivos de la colección de agua de niebla en la cima del acantilado de Punta Patache a 52 ms.n.m., mediante 91 neblinómetros de 48 m<sup>2</sup>; donde obtuvo un caudal promedio de 8,0 L/m<sup>2</sup>/d. Por otro lado, el investigador Antón [9], en la población de El Tofo (780 ms.n.m.) en Arica-Chile utilizó atrapanieblas de grandes dimensiones hechos de una capa doble de malla de nilón de fabricación local, teniendo como resultado un promedio de cinco litros diarios por metro cuadrado, para 14 días de prueba.

Hidalgo [10], realizó un estudio de uso de atrapanieblas en comunidades campesinas de la provincia de Chimborazo-Ecuador a una altitud de 3200 ms.n.m. para una demanda de agua para sembradíos de maíz logrando obtener con sus

prototipos un volumen de 5,45 L/m<sup>2</sup>/d. En el Perú el proyecto Acceso al agua por sistemas de atrapanieblas de la Asociación “Peruanos sin Agua” con aguas no convencionales, lluvias y neblina, realizado por Cruz Gutiérrez [11], estimó que, en el distrito de Villa María del Triunfo en el asentamiento humano Villa Lourdes Ecológico II, un sistema de atrapanieblas de 24 m<sup>2</sup> lograron captar de 8,33 L/m<sup>2</sup>/d hasta 14,58 L/m<sup>2</sup>/d., agua que es utilizada por las familias para distintos usos: lavar utensilios/ropa, bañarse, agricultura orgánica, reforestar. Madariaga [12], realizó un estudio del potencial de neblina durante el evento El Niño a través de tres neblinómetros a una altitud de 500 ms.n.m. en las lomas de Ancón muestreando un volumen anómalo de agua de niebla para una temporada seca en verano, lo demuestra con el promedio de 0,94 L/m<sup>2</sup>/d obtenido del volumen de agua capturado por los neblinómetros. Además Cuellar [13] en su proyecto de investigación realizado en Villa María del Triunfo encontró que la captación del agua de niebla en los meses de mayo hasta diciembre, un atrapanieblas de malla raschel de 12 m<sup>2</sup> capta en promedio 0,98 L/m<sup>2</sup>/d.

La importancia de la presente investigación es cuantificar la oferta hídrica de la niebla y neblina en las alturas de la sierra peruana donde la escasez de agua es un problema latente que influyen en el desarrollo personal de los pobladores que se plasma en bajas condiciones de vida, la que se observa claramente en el Centro Poblado La Palma–Chota.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Localización

El estudio se realizó en la región Cajamarca - Perú, de acuerdo con la Figura 1 con coordenadas UTM 9281714,00 m sur y 762884,00 m este y a una cota de 2842 ms.n.m.

### 2.2. Materiales

Se utilizaron tres tipos de mallas de fácil adquisición en los mercados locales de la ciudad de Chota para el diseño de los atrapanieblas, las cuales tuvieron las siguientes características:

1. Malla Raschel cuyo material es polietileno con abertura de 2,0 × 2,0 mm. con una resistencia

a la ruptura de 8,8 kg/cm<sup>2</sup>, conductividad al calor de  $\lambda = 0,45 - 0,52$  W/m·K.

2. Malla mosquitero de Fibra de vidrio con una abertura de 1,5 × 1,5 mm, con una conductividad de calor de  $\lambda = 0,03 - 0,07$  W/m·K.
3. Malla metálica de metal galvanizado con abertura de 1,0 × 2,2 mm, con una conductividad de calor de  $\lambda = 12 - 45$  W/m·K.

Dichas mallas fueron fijadas en parantes de tubos de acero de 2” y estabilizadas mediante cuerdas atadas a estacas ancladas al terreno natural.

Se necesitó una canaleta metálica con desembogue en la parte inferior para la recepción del agua captada y luego su traslado mediante una manguera de 1” hacia el tanque de almacenamiento de 600 L.

### 2.3. Metodología

En la investigación se utilizó el método empírico a través de la medición directa, cuantitativa de campo. Además, se aplicaron medidas de tendencia central para la tipificación de los datos obtenidos y posterior cálculo de las eficiencias de cada una de las mallas, utilizadas en el estudio.

La eficiencia considerada en la investigación, relaciona la tasa de acumulación de agua, por el colector en volumen, por área de atrapanieblas, por tiempo (generalmente en litros por metro cuadrado por día) según la ecuación (1) y depende de las condiciones ambientales, el diseño de los atrapanieblas y la orientación en relación al viento.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Volumen de agua captada}}{\text{Área de malla} \cdot \text{tiempo}} \quad (1)$$

La investigación requirió la toma de datos de campo y su posterior procesamiento, de acuerdo a la secuencia siguiente:

*Identificación de la zona de estudio.* La localidad de La Palma, es conocido por sus nieblas y neblinas constantes en gran parte del año; para ello fue necesario identificar zonas con presencia de vientos constantes y más predominantes en presencia de nieblas y neblinas. Para el presente estudio la dirección del viento oscilaba entre vientos noroeste

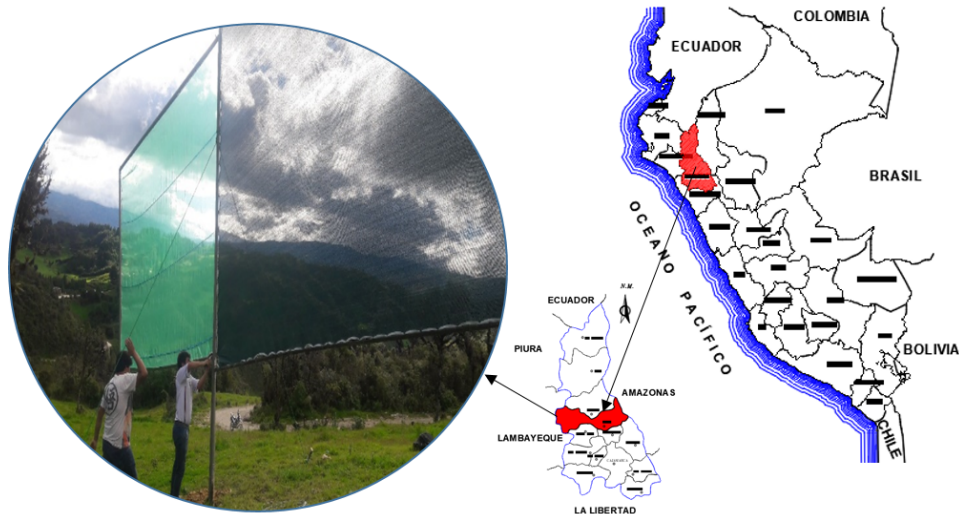


Figura 1: Zona de estudio, ubicación de atrapanieblas

y noreste o viceversa; tomando al norte como la ubicación promedio para colocar las mallas en contra del viento.

*Instalación de una estación meteorológica.* Una vez identificada la zona de estudio, fue necesario contar con un área despejada para la instalación de la estación meteorológica semiautomática Davis PRO2 según la Figura 2 para la toma de datos climatológicos en campo.

La zona debía estar cerca al área donde se instalaron los atrapanieblas. La estación meteorológica debe estar alejada de cualquier ente que pueda alterar los datos registrados y en un área despejada para que no haya fluctuación de datos.

En cuanto a las veletas de viento y anemómetros se ubicaron entre 1,00 m y 5,50 m (alturas en las que oscila el funcionamiento del atrapanieblas) para identificar la dirección del viento y velocidad del viento a la cual estarán expuestas los atrapanieblas.

*Diseño e instalación de los atrapanieblas.* Para el caso de la malla raschel se tuvo que cortar acorde a la medida deseada ya que viene en presentaciones de 4 metros de ancho y longitud libre. El borde de la malla se tuvo que bordear con tela lona o similar para evitar su desgarre. Para el caso de la malla mosquitero y metálica se tuvieron que unir las mallas de manera longitudinal, ya que vienen en presentaciones de 0,90 metros de ancho y longitud libre. El borde de la malla se tuvo que bordear con tela lona o similar para evitar desgarre de la malla.



Figura 2: Estación meteorológica semiautomática Davis PRO2. Instalada en la zona de estudio

Las mallas raschel, mosquitero y metálica se fijaron en los marcos metálicos mediante alambre galvanizado n°18 en todo el contorno (incluyendo la canaleta de recolección).

Se excavaron en el terreno dos agujeros con profundidad de 50 cm a una distancia de 6,15 m, para estacionar los atrapanieblas en contra de la dirección del viento predominante (viento norte).

Se fijaron los atrapanieblas desde los codos de unión mediante cuerdas a estacas ancladas al terreno para que no haya caída del sistema debido al viento. La canaleta de recolección debía tener una pendiente mínima de 3 % en dirección al borde de conexión de la manguera que va dirigida al tanque de recolección de agua captada.

#### 2.4. De la toma de datos

*En el atrapanieblas.* Teniendo en cuenta el diámetro del tanque colector (600 L), se tomó nota de las alturas de agua acumuladas día a día en un horario establecido (para el caso del proyecto fue a las 6:00 horas) durante tres meses. En caso que el tanque se esté por llenar se debía vaciar el agua del tanque e iniciar nuevamente con los registros de altura.

*En la estación meteorológica.* Los datos que brindaba la estación meteorológica eran temperatura máxima y mínima, temperatura de bulbo seco y húmedo, velocidad y dirección del viento y humedad relativa. Dichos datos eran necesarios para caracterizar al clima del C.P La Palma.

### 3. Resultados y discusiones

En primera instancia para fundamentar el proceso de condensación y por ende la captación de agua de las nieblas y neblinas en la zona de estudio se estimaron los rangos de las temperaturas de formación del punto de rocío para compararlos con los valores máximo y mínimo de la temperatura ambiente para los 92 días de estudio.

En la Figura 4 se muestra la temperatura máxima ( $T_{mx}$  °C) y mínima ( $T_{min}$  °C) en relación a la temperatura de punto de rocío ( $T_{pr}$  °C - 6:00) y ( $T_{pr}$  °C - 18:00) para las 6:00 horas y 18:00 horas respectivamente. Se puede observar que los puntos de temperaturas de rocío de los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019, se encuentran dentro de los rangos de temperatura mínima y máxima, lo que llevó a afirmar que hubo saturación en el ambiente, por ende, la precipitación de la humedad ambiental en superficies como es el caso de las mallas raschel, mosquitero y metálica.

Los volúmenes de agua captados por los atrapanieblas con mallas metálica, mosquitero y raschel en algunos días fueron afectados por la presencia de precipitaciones. En la Figura 5, se muestra que el volumen captado más alto se dio el día 9 de noviembre con valores de 512, 514 y 516 L, con una precipitación de 32 mm. mientras que el volumen captado más bajo se dio el día 29 de noviembre con ausencia de precipitación se captaron volúmenes de 35, 36 y 33 L en las mallas metálica, mosquitero y raschel respectivamente.

Como se puede observar en la Tabla 1, el rango de la captación más desfavorable de agua con atrapanieblas de 24 m<sup>2</sup> de área, construidas con malla tipo raschel, mosquitero y metálica para los meses de noviembre y diciembre del año 2018 y enero de 2019 oscilan entre los rangos de 35,81 a 46,35 L/m<sup>2</sup>/d; 38,04 a 47,66 L/m<sup>2</sup>/d y 38,37 a 49,42 L/m<sup>2</sup>/d respectivamente.

También se nota que en los 92 días que duró la investigación los valores promedio de la eficiencia en los meses de noviembre 2018, diciembre 2018 y enero de 2019 tienen valores superiores en la malla metálica seguida de la malla mosquitero y al final la malla raschel.

Se identificó que, la presencia de vientos en la zona de estudio del Centro Poblado La Palma llegó hasta 8 m/s, que, según la escala de Beaufort, corresponde al rango de fresquito (brisa fuerte), dichos vientos, según registros realizados, ocasionaron que se genere un mayor volumen de agua, siendo los rangos de viento entre noroeste a noreste y en menor incidencia los vientos suroeste a sureste. Por lo que la posición adoptada para la ubicación de los atrapanieblas fue de manera transversal al promedio de la dirección de los vientos, en este caso viento norte o en caso de viceversa viento sur.

Se registró también que, el promedio de humedades absolutas en los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019 fueron 226,89 g/m<sup>3</sup>, 236,09 g/m<sup>3</sup> y 244,94 g/m<sup>3</sup> respectivamente, no han ido acorde a los volúmenes de agua obtenidos en cada mes, esto nos puede ayudar a corroborar que la presencia de vientos ha sido factor determinante para obtener el mayor volumen de agua aprovechable de nieblas y neblinas en el



(a) preparación de malla



(b) proceso de izado

Figura 3: Instalación de atrapanieblas con tres tipos de malla en zona de estudio

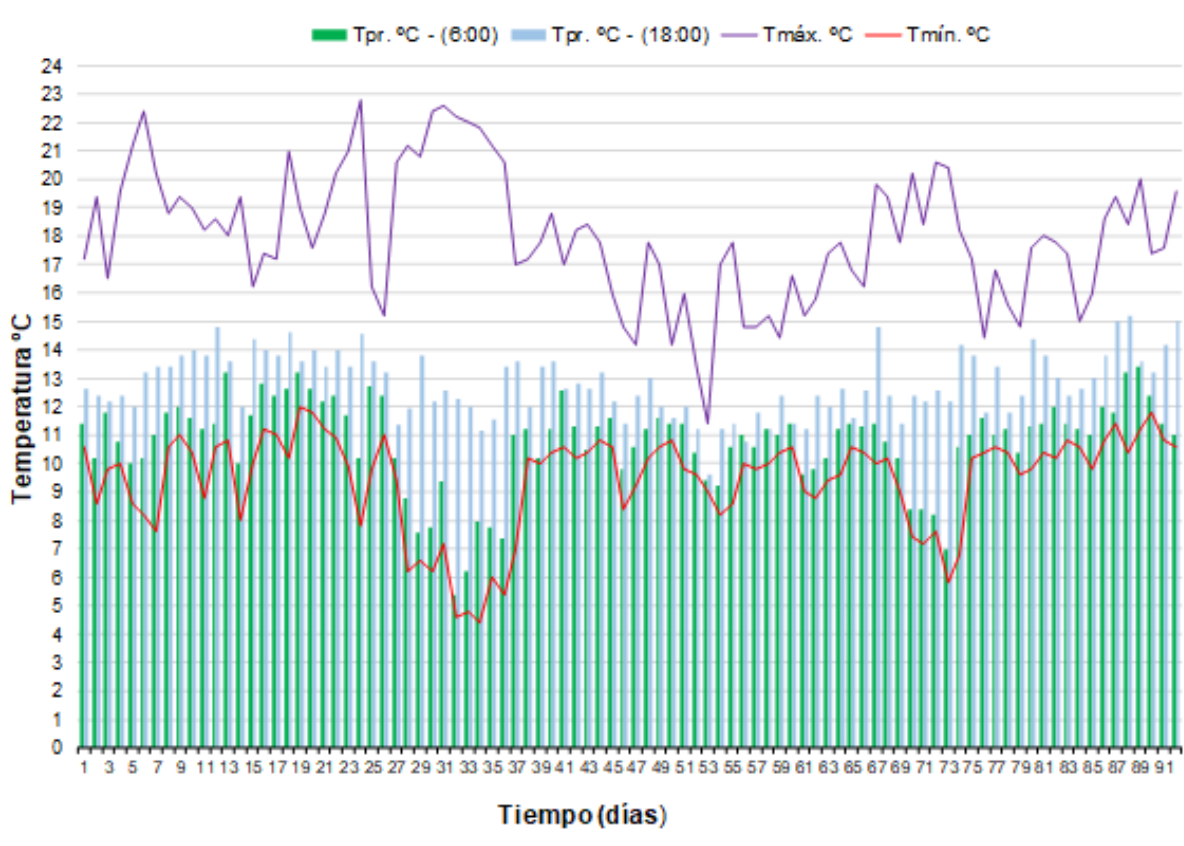


Figura 4: Relación de las temperaturas máximas y mínimas con las temperaturas de punto de rocío en los meses de estudio

Centro Poblado La Palma.

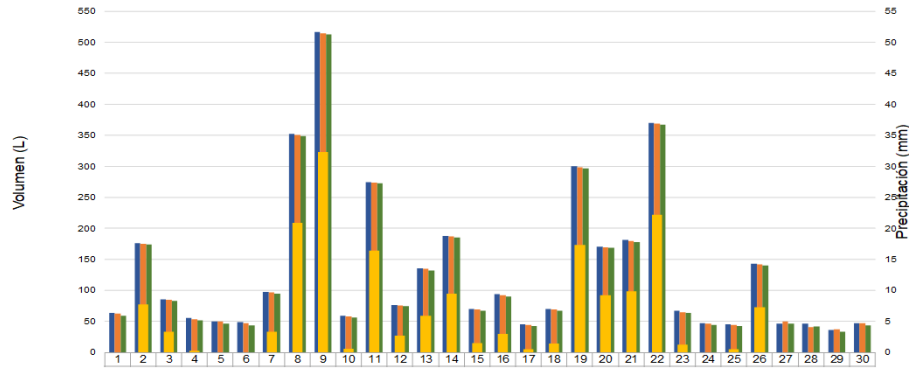
Se observó que, la malla metálica es más eficiente en la precipitación de gotas de las nieblas y neblinas al entrar en contacto con el material, esto se debería a la mayor conductividad térmica que presenta la malla metálica ( $\lambda = 12 - 45 \text{ W/m}$

$\cdot \text{K}$ ) a comparación de la malla mosquitera que es de fibra de vidrio ( $\lambda = 0,03 - 0,07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) y malla raschel que es de polietileno de alta densidad ( $\lambda = 0,45 - 0,52 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ).

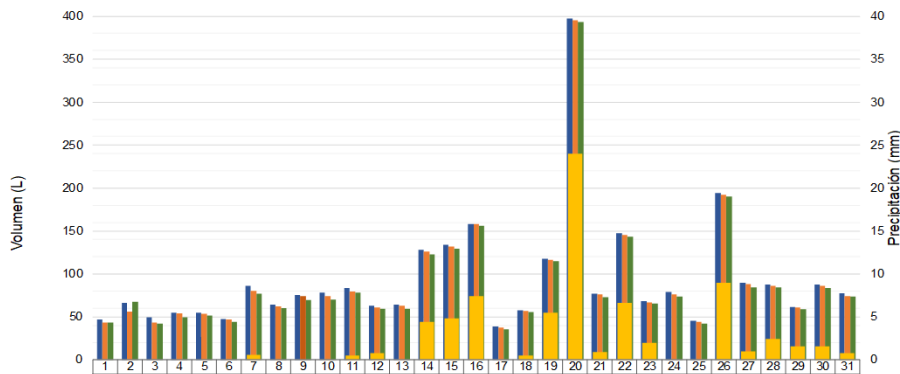
De acuerdo a los resultados obtenidos, se observó que, con la malla metálica es la más



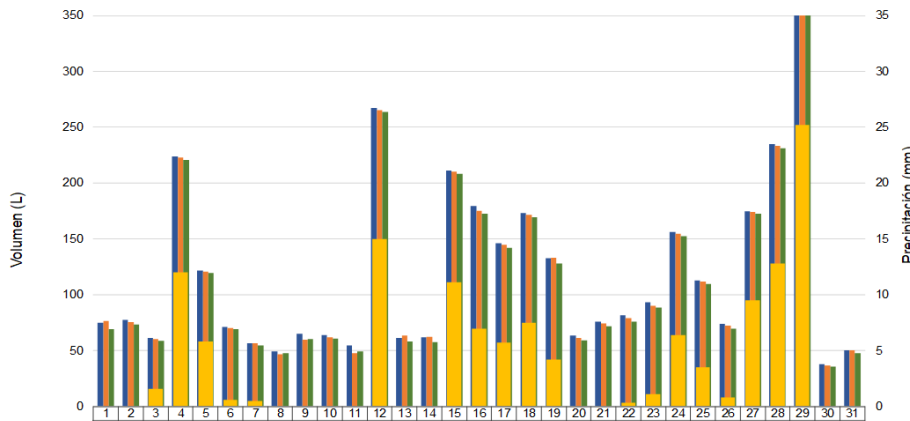
■ V. M. metálica (L); ■ V. M. mosquitera (L); ■ V. M. Raschell (L); ■ Precipitación (mm)



(a) noviembre 2018



(b) diciembre 2018



(c) enero 2019

Figura 5: Volumen de agua captado en litros (*L*) para tres tipos de malla y precipitación en milímetros (*mm*)

eficiente en la captación de agua aprovechable proveniente de nieblas y neblinas, como se muestra en la Tabla 2.

Los valores de las eficiencias en promedio de los atrapanieblas con los tres tipos de malla para los meses de noviembre de 2018, diciembre de 2018 y

enero de 2019 fueron encontrados con la ecuación 1 y están entre los valores de 1,49 a 2,06 L/m<sup>2</sup>/d, valores bajos con respecto a los obtenidos en zonas de costa con altitudes inferiores a los 800 ms.n.m. según reporte de Cereceda [4], quién encontró a una altitud de 52 ms.n.m. una eficiencia de

Tabla 1: Eficiencia de atrapanieblas para los meses de estudio

Mes	Malla	Media ( $\bar{x}$ )	Desviación estándar (S)	Volumen más desfavorable (L)	Eficiencia de malla ( $L/m^2/d$ )
nov-2018	Raschel	42,45 L	6,64 L	35,81	1,49
	Mosquitero	44,81 L	6,77 L	38,04	1,59
	Metálica	45,44 L	7,07 L	38,37	1,60
dic-2018	Raschel	60,52 L	14,17 L	46,35	1,93
	Mosquitero	62,31 L	14,65 L	47,66	1,99
	Metálica	64,37 L	14,95 L	49,42	2,06
ene-2019	Raschel	56,52 L	10,82 L	45,70	1,90
	Mosquitero	58,60 L	11,90 L	46,70	1,95
	Metálica	60,07 L	11,60 L	48,47	2,02

Área de malla ( $m^2$ ): 24,00

Tabla 2: Eficiencia promedio de captación de agua aprovechable de nieblas y neblinas

mes	Eficiencia promedio por malla ( $L/m^2/d$ )		
	Metálica	Mosquitero	Raschel
nov-18	1,60	1,59	1,49
dic-18	2,06	1,99	1,93
ene-19	2,02	1,95	1,90
Promedio	1,89	1,84	1,77

8,0  $L/m^2/d$ , Antón [9] a 780 ms.n.m. encontró un valor de 5,0  $L/m^2/d$  y Cruz Gutiérrez [11] en Villa María del Triunfo encontró valores de 8,33  $L/m^2/d$  hasta 14,58  $L/m^2/d$ , a excepción de Madariaga [12] que a una altitud de 500 ms.n.m. en las Lomas de Ancón encontró un valor de 0,94  $L/m^2/d$ , y Cuellar [13] los meses de mayo hasta diciembre en año con la influencia del fenómeno del Niño, encontró en Villa María del Triunfo un valor de 0,98  $L/m^2/d$ . Es necesario resaltar que si bien es cierto Hidalgo [10] investiga a una altitud de 3200 ms.n.m. obteniendo un valor de 5,45  $L/m^2/d$  en el Ecuador, hay que entender que el comportamiento climático es distinto a nuestra zona de estudio por las diferentes latitudes.

#### 4. Conclusiones

El Centro Poblado La Palma, presenta características favorables para el uso de mallas atrapanieblas en los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019, ya que, en el total de los

días analizados, se observó que existió punto de rocío o se podría indicar que la humedad relativa llegó al 100%, lo que ocasionó un aporte en la precipitación de agua proveniente de nieblas y neblinas en la superficie de las mallas.

A través del uso de mallas atrapanieblas con dimensiones de 4,00 × 6,00 m del tipo raschel, mosquitera y metálica, se puede obtener un volumen promedio aprovechable de agua proveniente de nieblas y neblinas de 42,45 L/d, 44,81 L/d y 45,44 L/d en el primer mes, 60,52 L/d, 62,31 L/d y 64,37 L/d en el segundo mes y 56,52 L/d, 58,60 L/d y 60,07 L/d en el tercer mes respectivamente.


Al relacionar la eficiencia de cada malla con la demanda per cápita para una población rural con consumos entre 40 y 50  $L/m^2/d$ , para las condiciones climatológicas de la zona será necesario por poblador una malla atrapanieblas de 24  $m^2$  de área.

#### 5. Referencias

- [1] P. Cereceda, P. Hernández, J. Leiva, and J. d. D. Rivera, Eds., *Agua de Niebla*. Coquimbo, Chile: Dirección General de Aguas, 2014.
- [2] J. Sanchez, "Atrapanieblas tecnología para el atrapamiento de agua, una experiencia exitosa para las políticas públicas en el distrito de Villa María del Triunfo, Lima 2018," Tesis para optar al grado académico de Maestro en Gestión Pública, Universidad César Vallejo. Escuela de Posgrado, 2018.
- [3] M. Fessehay, S. A. Abdul-Wahab, M. J. Savage, T. Kohler, T. Gherezghiher, and H. Hurni, "Assessment of fog-water collection on the eastern escarpment of

- Eritrea,” *Water International*, vol. 42, no. 8, pp. 1022–1036, 2017.
- [4] P. Cereceda, “Los atrapanieblas, tecnología alternativa para el desarrollo rural sustentable,” *Ambiente y Desarrollo*, vol. 16, no. 4, pp. 51–56, 2005.
- [5] K. Ali, G. A. Momin, S. Tiwari, P. D. Safai, D. M. Chate, and P. S. P. Rao, “Fog and precipitation chemistry at Delhi, North India,” *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 25, pp. 4215–4222, 2004.
- [6] S. Baquero, A. Delvasto, and S. Mejía, “Evaluación de la calidad de agua de niebla recolectada en Choachí, Colombia,” *Inventum*, vol. 13, no. 25, pp. 53–60, 2018.
- [7] P. Osses, R. S. Schemenauer, P. Cereceda, H. Larrain, and C. Correa, “Los atrapanieblas del Santuario Padre Hurtado y sus proyecciones en el combate a la desertificación 1,” *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 27, pp. 61–67, 2000.
- [8] T. A. Salem, M. E. D. M. Omar, and H. A. A. El Gammal, “Evaluation of fog and rain water collected at Delta Barrage, Egypt as a new resource for irrigated agriculture,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 135, pp. 34–40, 2017.
- [9] D. Antón, “Cosechando las nubes,” *CIID Informa*, vol. 17, no. 4, pp. 16–17, 1988.
- [10] D. L. Hidalgo Quinga, “Captación de agua por medio de la técnica de atrapanieblas en las comunidades campesinas de Galte, Cantón Guamote, Provincia de Chimborazo, Ecuador,” Tesis para optar al título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador, 2016.
- [11] A. Cruz Gutiérrez, “Agua y emprendimiento social = Atrapanieblas y huertos urbanos,” in *Universidad de Málaga. Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech. Agua de lluvia*, 2016.
- [12] I. P. Madariaga Olivares, “Evaluación del potencial de neblina mediante el sistema de atrapanieblas en las Lomas de Ancón durante el evento del niño, en el distrito de Ancón, provincia de Lima periodo 2015-2016,” Tesis presentada para optar a título profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, 2017.
- [13] J. G. Cuéllar Mayta, “Impacto económico de la implementación de mecanismos capturadores de agua atmosférica para uso agrícola. Villa María del Triunfo, Lima - Perú,” Tesis para optar al título de Economista, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2018.

# Estimation model of the Manning roughness coefficient as a function of granulometry in the Santa River, Recuay–Carhuaz sector, Áncash, Perú

Abelardo Díaz-Salas \* , Edilberto Guevara-Pérez , Juan Rosales-Cueva ,

*Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú*

**Abstract.-** Given that the Manning equation is one of the most used application methods to determine the flow in ungauged rivers, an investigation was carried out to establish a model to determine the Roughness coefficient ( $n$ ), in a mountainous sector of the river Santa in the department of Ancash, Peru. The novelty of the model is its simplicity since it only uses the effective diameter ( $d_i$ ), of the river material obtained from the granulometric analysis as an input variable. Three estimation procedures were used, speed measurement, Manning's equation and Cowan's model, and for the analysis, linear and non-linear correlation and regression models; goodness of fit was performed by the Student test,  $t$ . The results were validated with field measurements of the hydraulic characteristics of the section at eight sampling points and granulometric analysis of the bed material samples. The best fit model for estimating the Manning roughness coefficient is the potential model, being its mathematical expression  $n = 0,0429(d_{10})^{0,1371}$  with a determination coefficient of  $R^2 = 0,956$ .

**Keywords:** roughness coefficient; effective diameter; granulometry; Manning's equation; fluvial hydraulics.

## Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay – Carhuaz, Áncash, Perú

**Resumen.-** Dado a que la ecuación de Manning es uno de los métodos de aplicación más utilizados para determinar el caudal en ríos no aforados, se llevó a cabo una investigación para establecer un modelo para determinar el coeficiente de rugosidad ( $n$ ), en un sector montañoso del río Santa en el departamento de Ancash, Perú. Lo novedoso del modelo está en su simplicidad ya que solo usa como variable de entrada el diámetro efectivo ( $d_i$ ), del material de río obtenido del análisis de granulometría. Se utilizaron tres procedimientos de estimación, medición de velocidades, ecuación de Manning y modelo de Cowan y para el análisis, modelos de correlación y regresión lineal y no lineal; la bondad de ajuste se efectuó con la prueba  $t$  de Student. Los resultados se validaron con mediciones de campo de las características hidráulicas del tramo en ocho puntos de muestreo y análisis granulométrico de las muestras de material de fondo. El modelo de mejor ajuste para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning es el potencial, siendo su expresión matemática  $n = 0,0429(d_{10})^{0,1371}$  con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,956$ .

**Palabras clave:** coeficiente de rugosidad; diámetro efectivo; granulometría; Ecuación de Manning; hidráulica fluvial.

Recibido: 26 de agosto, 2020.

Aceptado: 27 de octubre, 2020.

### 1. Introducción

En los países en vías de desarrollo, como es el caso del Perú, las estaciones de monitoreo de las variables hidrometeorológicas están en un estado incipiente de desarrollo por lo que no siempre se

disponen de registros de caudales; sin embargo, esa información es necesaria para el estudio del régimen hidrométrico y el diseño de las estructuras hidráulicas para el aprovechamiento del agua.

Bajo las condiciones expuestas se suelen usar procedimientos indirectos desarrollados para zonas carentes de información. La ecuación de Manning permite determinar el caudal en ríos no aforados en base a los parámetros hidráulicos radio hidráulico, pendiente hidráulica y área hidráulica; siendo la dificultad la determinación del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning, el mismo que expresa la

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: abelardo\_mad@hotmail.com (A. Díaz-Salas)

resistencia del cauce al escurrimiento del flujo.

En el Perú no existen investigaciones para la estimación directa de  $n$  en los ríos; para los estudios hidráulicos se suele adoptar valores establecidos en condiciones similares en otros países con la desventaja que las similitudes son relativas, arrojando resultados generales de rangos muy imprecisos, especialmente para ríos de características muy particulares, como es el caso de los ríos andinos del país, típicos ríos de montaña con presencia de sedimentos gruesos y pendientes elevadas.

Por lo expuesto, se ha llevado a cabo la presente investigación con el objeto de establecer un modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en sitios no aforados del río Santa en el sector montañoso Recuay–Carhuaz. Lo novedoso del modelo está en su sencillez ya que facilita la determinación de dicho coeficiente solo en función de la granulometría del cauce.

## 2. Revisión de la literatura

Existen muchos estudios realizados para obtener el coeficiente de rugosidad que aplican una serie de métodos y/o fórmulas empíricas.

Investigaciones como la de: Osío [1] indica que se estimó el coeficiente de rugosidad de Manning utilizando las funciones de distribución de velocidades mediante aforo y que el valor de  $n$  puede determinarse en función del diámetro medio de las partículas del material de cauce, Fernández [2] menciona que se calcula el  $n$  de Manning por diferentes métodos plasmados en la literatura y se realiza un análisis de los mismos, Burgos [3] indica que se logró obtener el  $n$  de Manning mediante una ecuación potencial que está en función del diámetro representativo del lecho de río y Pastora [4] desarrolla la evaluación de la ecuación de Manning en un flujo de corriente natural mediante registro de aforos y determina un coeficiente promedio para época seca y lluviosa. Existen otros métodos de estimación, Colmenárez [5], usa modelos digitales de rugosidad topográfica, obtenidos a partir de modelos LIDAR y GPS, y Guzmán [6] utiliza valores de caudales que

se comparan de manera espacial y temporal. En todos ellos los valores obtenidos se adaptan a las condiciones en las que se llevó a cabo la investigación, y al criterio del investigador.

Para el estudio de la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning cuyos resultados se presentan aquí, se usaron cuatro procedimientos hidráulicos generales: medición de la velocidad; medición de la rugosidad; procedimiento de la fórmula de Manning; y Cowan; con el objeto de entender mejor el proceso seguido, a continuación, se describe la base teórica utilizada en la investigación.

### 2.1. Distribución de velocidades en flujo turbulento

Para la aplicación de los métodos de medición de velocidad y medición de rugosidad, Osío [1] indica que para Prandtl, la capa límite turbulenta en el sentido de que la longitud de mezcla ( $l$ ), es proporcional a la profundidad del flujo ( $y$ ), la fuerza cortante ( $\tau$ ), es constante e igual al esfuerzo cortante unitario ( $\tau_0$ ), según se muestran en las ecuaciones (1) y (2).

$$V_f = \sqrt{gRS} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1)$$

$$V = 2,5V_f \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (2)$$

Donde:

$V_f$ : velocidad de fricción, [ m/s ]

$g$ : gravedad, [ m/s<sup>2</sup> ]

$R$ : radio hidráulico, [ m ]

$S$ : pendiente hidráulica, [ m/m ]

$\tau_0$ : fricción unitaria en la capa límite, [ kg·m/s ]

$y_0$ : altura de rugosidad igual a  $k/30$  para superficies rugosas, [ m ]

$k$ : altura de rugosidad, [ m ]

$\rho$ : densidad del fluido, [ kg/m<sup>3</sup> ]

$V$ : velocidad del agua, [ m/s ]

$\nu$ : viscosidad cinemática, [ m<sup>2</sup>/s ]

$y$ : profundidad de sección [ m ]

De acuerdo con Chow [7], la ecuación (2) se conoce como la Ley Universal de Distribución de

Velocidades de Prandtl – Von Karman, que viene a ser una función logarítmica.

Para superficies lisas, la constante  $y_0$  queda expresada por la ecuación (3).

$$y_0 = \frac{v}{9V_f} \quad (3)$$

De donde se obtiene la ecuación (4).

$$V = 5,75 \cdot V_f \log \left( \frac{y_0 9V_f}{v} \right) \quad (4)$$

En superficies rugosas, se encuentra que la constante  $y_0$  depende de la altura de la rugosidad, ésta se indica en la ecuación (5).

$$y_0 = mk \quad (5)$$

donde, la constante  $m$  es igual aproximadamente a 1/30. Sustituyendo y simplificando para superficies rugosas, se obtiene la ecuación (6).

$$V = 5,75 \cdot V_f \log \left( \frac{30y}{k} \right) \quad (6)$$

dada como la distribución de velocidades en flujos turbulentos sobre superficies rugosas. La altura de rugosidad,  $k$ , corresponde al diámetro medio de los granos de arena utilizado por Nikuradse, Chow [7].

Mediante el desarrollo de ecuaciones teóricas para flujo uniforme French [8], al comparar la ecuación de Chezy con la ecuación de Manning se obtiene la ecuación (7).

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (7)$$

Además, Rocha [9], indica que para conductos rugosos se tiene la ecuación (8).

$$C = 18 \log \frac{12,2R}{k} \quad (8)$$

donde,  $C$  es el coeficiente de Chezy  $m^{1/2}/s$ .

Siguiendo el análisis de Chow [7] para la interpretación teórica del coeficiente de rugosidad, la relación entre el  $n$  de Manning y el valor teórico de la rugosidad del canal para superficies rugosas, al eliminar el valor de  $C$  de Chezy de las

ecuaciones (7) y (8), se obtiene el  $n$  de Manning descrita por la ecuación (9).

$$n = \phi \left( \frac{R}{k} \right) k^{1/6}, \quad (9)$$

donde:

$$\phi \left( \frac{R}{k} \right) = \frac{(R/k)^{1/6}}{18 \log \left( \frac{12,2 \cdot R}{k} \right)} \quad (10)$$

De las ecuaciones (9) y (10), se deduce que el valor de  $k$  está dado por la ecuación (11).

$$k = \frac{12,2 \cdot R}{10 \left( \frac{R^{(1/6)}}{18n} \right)} \quad (11)$$

donde,  $k$  es conocido como la altura efectiva de las irregularidades formados por los elementos de rugosidad.

Las investigaciones realizadas sobre el tema indican que para un amplio rango de  $R/k$ , la variación en  $\phi(R/k)$  es pequeña, y ésta, puede suponerse constante e igual a un valor promedio. Es así que, la ecuación (9) queda determinado en función de la potencia de la altura de rugosidad ( $k$ ), [7].

Según la distribución teórica de velocidades en canales rugosos, se ha desarrollado los métodos de medición de velocidades y medición de rugosidad, [7]. Asimismo, se pueden usar dos métodos adicionales que se describen a continuación para obtener  $n$  de Manning.

## 2.2. Método de medición de la velocidad

De la ecuación (6), el coeficiente  $n$  de Manning puede determinarse por medio de mediciones de velocidades a 2/10 de  $y$ , desde el espejo de agua ( $V_{0,2}$ ), dado por la ecuación (12).

$$V_{0,2} = 5,75 \cdot V_f \cdot \log \left( \frac{24y}{k} \right) \quad (12)$$

Asimismo, a 8/10 de  $y$ , ( $V_{0,8}$ ), expresado por la ecuación (13).

$$V_{0,8} = 5,75 \cdot V_f \cdot \log \left( \frac{6y}{k} \right) \quad (13)$$

Eliminando  $V_f$  en las ecuaciones (12) y (13), sustituyendo  $x = \frac{V_{0,2}}{V_{0,8}}$ , simplificando y resolviendo se obtiene la ecuación (14).

$$n = \frac{(x - 1)y^{1/6}}{5,57(x + 0,95)} \quad (14)$$

Donde,  $y$  representa la profundidad en la sección considerada en metros.

### 2.3. Método de la medición de la rugosidad

En este método se supone que la ecuación (10) para la función  $\phi(R/k)$  es aceptable. Luego, el valor de  $n$  puede determinarse mediante la ecuación (9) conocido la altura de rugosidad,  $k$ .

### 2.4. Método de la fórmula de Manning

Conocidos los parámetros involucrados en dicha fórmula, en el punto de interés, se despeja la fórmula de Manning para obtener el valor de  $n$ , que viene a estar dado por la ecuación (15).

$$n = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{Q} \quad (15)$$

Donde,  $A$ , es el área hidráulica,  $R$ , radio hidráulico,  $S$ , pendiente media y  $Q$ , es el caudal en la sección transversal de interés.

### 2.5. Método de Cowan

El modelo de Cowan está definido por la ecuación (16).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (16)$$

Los valores se obtienen de la Tabla 1 los cuales están en función del perímetro, irregularidades, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y meandros.

### 2.6. Granulometría de material de río

La toma de muestras (García [10]), y la distribución granulométrica del lecho de río son de gran utilidad, los resultados obtenidos de la granulometría son utilizados en diversos procesos fluviales como la estimación de parámetros de rugosidad, Crozzoli [11].

La granulometría permite calcular mediante el análisis granulométrico por tamizado los porcentajes de granos en función de sus tamaños. Se designa por  $d_n$  que es el tamaño, tal que el  $n\%$  del peso del material es menor que dicho parámetro.

### 2.7. Correlación y regresión

#### 2.7.1. Coeficiente de correlación ( $r$ )

Villón [12], indica que el coeficiente de correlación es el estadístico que permite medir el grado de asociación de dos variables linealmente relacionadas. Sus valores varían entre -1 y 1. Si  $X$  e  $Y$  son independientes,  $r = 0$ .

#### 2.7.2. Coeficiente de determinación ( $r^2$ )

De acuerdo con Villón [12],  $r^2$ , indica que la proporción o porcentaje de la variación total de la variable dependiente  $Y$ , es explicada por la variable independiente  $X$ ; varía en el rango de  $0 \leq r^2 \leq 1$ , o de 0 a 100 %. Cuanto mayor sea el  $r^2$ , mayor será la confiabilidad de las predicciones y menores serán los errores predictivos. Para la regresión lineal simple se tiene que,  $r^2 = R^2$  y pueden ser denotados con letras mayúsculas, significando lo mismo.

#### 2.7.3. Regresión lineal simple

Según Villón [12], la regresión lineal simple permite estimar en forma lineal una variable dependiente  $Y$ , en función de una variable independiente  $X$ ; se suele usar para completar datos o extender un registro. El modelo de regresión lineal está dado por la ecuación (17).

$$y = a + b \cdot x \quad (17)$$

Donde,  $x$ , es la variable independiente o conocida,  $y$ , es la variable dependiente o que se trata de predecir,  $a$  y  $b$  son parámetros que son determinados por el método de mínimos cuadrados.

#### 2.7.4. Regresión no lineal

La regresión no lineal indica que existen una asociación no lineal entre la o las variables dependientes e independientes. Entre los modelos no lineales más conocidos se tiene: exponencial, potencial y logarítmico. A continuación, se indican

Tabla 1: Criterios y valores numéricos para la ecuación de Cowan [9]

Condición del cauce			Valores
Material considerado	Tierra		0,020
	Corte en roca	$n_0$	0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de Irregularidad	Suave		0,000
	Menor	$n_1$	0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variación de la Sección Transversal	Gradual		0,000
	Ocasionalmente alternante	$n_2$	0,005
	Frecuentemente alternante		0,010–0,015
Efecto de las Obstrucciones	Insignificante		0,000
	Menor	$n_3$	0,010–0,015
	Apreciable		0,020–0,030
	Severo		0,040 - 0,060
Vegetación	Baja		0,005–0,010
	Media	$n_4$	0,010–0,025
	Alta		0,025–0,050
	Muy alta		0,050–1,000
Cantidad de Meandros	Menor		1,000
	Apreciable	$m_5$	1,150
	Severa		1,300

las ecuaciones del modelo de regresión no lineal: Exponencial, está dado por la ecuación (18).

$$y = ab^x \quad (18)$$

Potencial, está dado por la ecuación (19).

$$y = ax^b \quad (19)$$

Logarítmica, está dado por la ecuación (20).

$$y = a \ln x + b \quad (20)$$

Estas ecuaciones pueden ser resueltas por el método de los mínimos cuadrados con un artificio adecuado pudiéndose reducir a ecuaciones lineales y aplicándose una regresión lineal simple.

### 3. Metodología

Para obtener el modelo, en primer lugar, se han obtenido los valores del coeficiente de rugosidad por los métodos: distribución de velocidades, fórmula de Manning y Cowan, con datos obtenidos mediante aforos que es una actividad importante para conocer la disponibilidad del recurso hídrico, Díaz [13] realizados por el Laboratorio de Calidad

Ambiental, Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - UNASAM. Luego se llevó a cabo un análisis estadístico relacionando los diámetros efectivos de granulometría por cada punto de aforo con los valores del coeficiente de rugosidad para los tres métodos seleccionados.

#### Descripción del área de estudio

El área de estudio, se ubica en la región Ancash, provincias de Recuay, Huaraz y Carhuaz, y comprende los distritos de Catac, Ticapampa, Recuay, Olleros, Huaraz, Independencia, Jangas, Tarica, Pariahuanca y Anta, ubicada entre las coordenadas UTM 8915258.00 m S, 233116 m E aguas abajo del puente Catac – Recuay, y, 8963881.28 m S, 215570.84 m E aguas arriba del aeropuerto Anta – Carhuaz, entre una altitud que varía de 3545 msnm y 2743 msnm respectivamente, perteneciente a la Cuenca del Río Santa (Figura 1).

#### 3.1. Información básica

A continuación, se describen resumidamente las fuentes y la información usada en la investigación:

1. Información cartográfica: Cartas Nacionales (19-h, 19-i, 20-h y 20-i), con escala 1:100000,



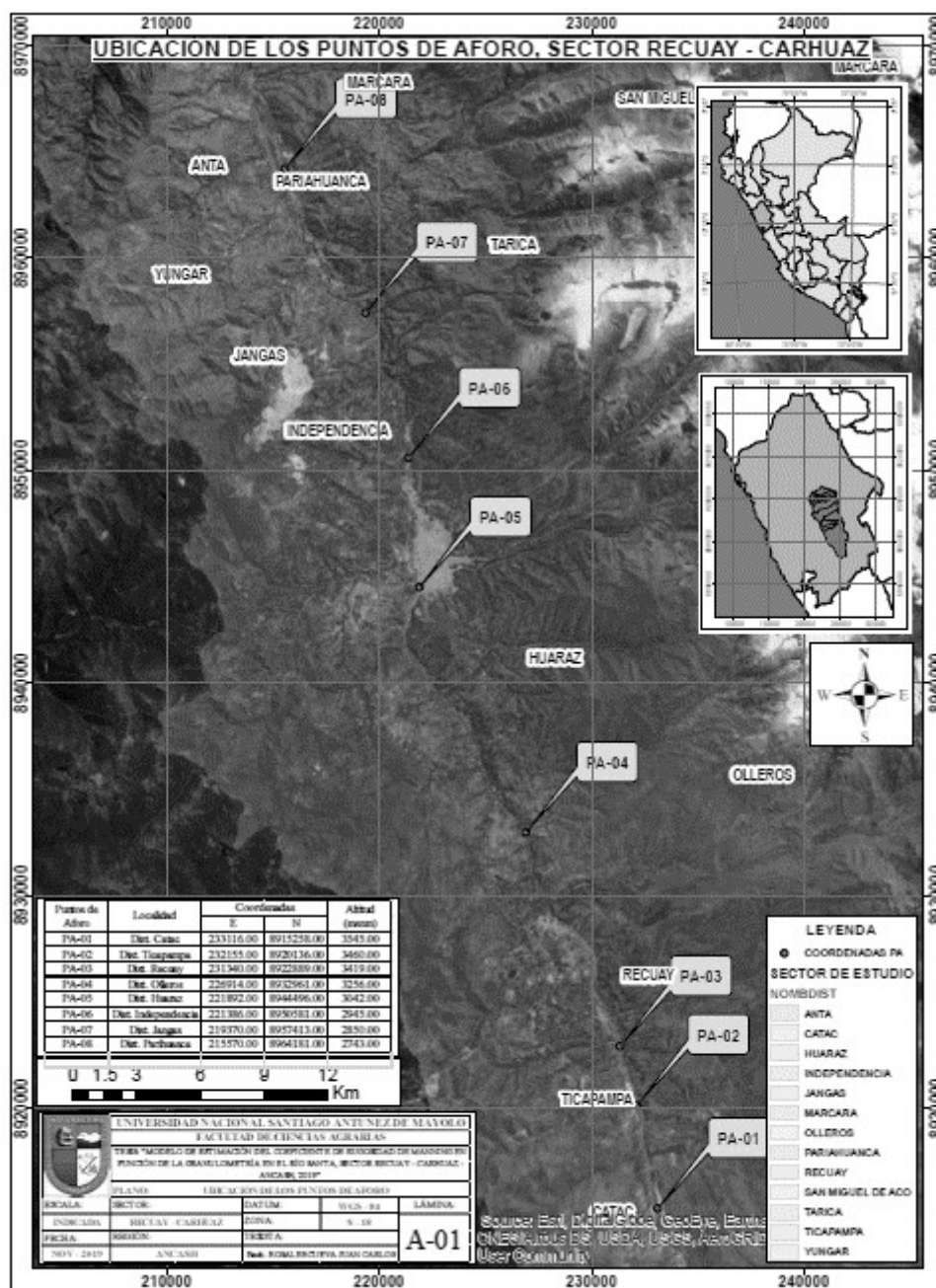


Figura 1: Ubicación de puntos de aforo, sector Recuay–Carhuaz

y el modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 30 metros.

2. Información topográfica: Obtenida mediante uso de equipos topográficos en cada uno de los puntos de aforo y sus respectivos tramos.
3. Información hidráulica: Obtenida mediante aforos, Villón [14] por el Servicio de monitoreo de agua del Laboratorio de Calidad

Ambiental – UNASAM, en periodo de estiaje. Los puntos de aforo se muestran en la Figura 1.

### 3.2. Fases de estudio

#### 3.2.1. Fase de campo

En la fase de campo, se procedió a la recolección de la información y datos de la zona de estudio tales como: parámetros hidráulicos de secciones transversales de sitios específicos o puntos de aforo (PA), pendiente, material de lecho y velocidades

de flujo mediante aforo con correntómetro. Así mismo, fotografías e imágenes satelitales. También se realizó la verificación y planificación en campo, como el reconocimiento del entorno y su ubicación de puntos de aforo (PA), seleccionándose ocho (08) puntos con su respectivo tramo de estudio. La pendiente se realizó por medición directa haciendo uso del nivel de ingeniero y la extracción de material de río se realizó en cada punto de muestreo.

### 3.2.2. Fase de gabinete

En la fase de gabinete se procesó la información, estimando el coeficiente  $n$  de Manning, los diámetros efectivos de partículas,  $d_i$ , y estableciendo las relaciones entre ambos parámetros y los modelos de estimación correspondientes. Finalmente se validó el modelo establecido de modo tal de aceptarlo como representativo para el área de estudio. A continuación, se resume el procedimiento:

1. Identificación de los puntos de aforo (PA) y procesamiento de la información de la sección transversal.
2. División del ancho de la sección transversal, en un número de subsecciones con un mínimo de un 10 % por cada una de éstas, Villón [14].
3. De las curvas de distribución de velocidades se obtuvo el valor correspondiente a la velocidad a dos y a ocho decimos de la profundidad  $V_{0,2}$  y  $V_{0,8}$ ; es decir, a 0,8 y 0,2 respectivamente del fondo del canal, ICC [15] y Tapia [16]. El coeficiente  $n$  de Manning se calcula en cada sub sección, en las secciones transversales de los PA aplicándose la ecuación (14), conocido el tirante hidráulico  $y$ , y la relación de velocidades  $x$ , el valor de  $n$  para la sección total se estimó como la media de los valores de  $n$  de las subsecciones.
4. El valor de  $n$  se calcula en función de la altura de rugosidad  $k$ , mediante las ecuaciones (9), (10) y (11).

5. Conocido el  $A$ ,  $R$ ,  $S$  y  $Q$ , mediante la ecuación (15) se determinó el coeficiente  $n$  de Manning.
6. De la Tabla 1 y la ecuación (16) se determinaron los valores de  $n$  de Manning.
7. El análisis granulométrico del lecho del río por punto de aforo (PA) se hizo mediante el tamizado siguiendo la norma ASTM D-422, Gutiérrez [17], obteniéndose así las curvas granulométricas con sus respectivos diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$ , y  $d_{90}$ .
8. Mediante análisis de regresión se estableció el modelo de estimación del coeficiente de rugosidad. Se probaron funciones de relación, lineal y no lineal aplicando las ecuaciones (17), (18), (19) y (20), Sánchez [18]. Mediante la prueba  $t$  de Student. El  $t$  calculado,  $t_c$  esta dado por la ecuación (21).

$$t_c = \frac{r\sqrt{n_1 - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (21)$$

Donde,  $n_1$ , es número de pares de valores. Así mismo, el  $t$  tabular,  $t_t$  se obtiene de las tablas estadísticas de la distribución  $t$  preparadas para este fin con un nivel de significación  $\alpha$  o una Probabilidad de  $(1 - \alpha)$  y con Grado de Libertad ( $GL = n_1 - 2$ ). Es decir,  $\alpha/2 = 0,025$  y  $GL = n_1 - 2$ . Por último, se aplicó el criterio de decisión: si  $|t_c| \leq t_t$ , entonces  $r = 0$  por tanto no hay correlación significativa; en cambio, si  $|t_c| > t_t$ , entonces  $r \neq 0$  por tanto es significativo y existe correlación entre las variables.

9. Finalmente se contrasta y se valida el modelo con mayor valor de coeficiente de correlación propuesto en la estimación del coeficiente de rugosidad en función de la granulometría, con el método de la fórmula de Manning usando los parámetros hidráulicos medidas directamente en campo, los cuales se consideran los menos subjetivos de los métodos de estimación del  $n$  de Manning.

#### 4. Análisis y discusión de resultados

##### 4.1. Descripción de los puntos de aforo (PA)

En la Tabla 2 se presentan la ubicación de los ocho (8) puntos de aforo seleccionados en función de una combinación de criterios, tramos vulnerables y facilidades de medición de los parámetros hidráulicos.

##### 4.2. Parámetros hidráulicos de secciones transversales

En la Tabla 3 se presentan los parámetros hidráulicos de las ocho secciones de aforo seleccionadas ( $A$ , área hidráulica,  $P$ , perímetro mojado,  $R$ , radio hidráulico,  $S$ , pendiente media y  $Q$ , caudal) que son aplicados al cálculo del  $n$  de Manning.

##### 4.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para los  $n$  de Manning para cada uno de los puntos de muestreo y para cada uno de los procedimientos hidráulicos seleccionados.

##### 4.4. Coeficiente de rugosidad mediante medición de rugosidad

En la Tabla 5 se presenta los resultados obtenidos de las alturas de rugosidades,  $k$ .

Con dichos resultados se ha realizado un análisis gráfico entre las variables del coeficiente de rugosidad,  $n$ , ( $n$  calculado mediante medición de velocidades) y la altura de rugosidad,  $k$ , que se muestra en la Figura 2. La línea de tendencia a la que mejor se ajusta es a una regresión lineal simple, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9879$ ; lo que indica que el 98,79 % de la variación del coeficiente de rugosidad,  $n$ , es explicada por la altura de rugosidad,  $k$ , y el 1,21 % restante es debido a los errores y a otras variables no consideradas.

De igual forma, mediante el análisis estadístico, el  $t_c$  es igual a 22,23 y el  $t_t$  es igual a 2,447 lo que significa que el  $t_c$  es mayor que el  $t_t$ , y se concluye que existe correlación significativa entre los coeficientes de rugosidad,  $n$  y las alturas de rugosidad,  $k$ .

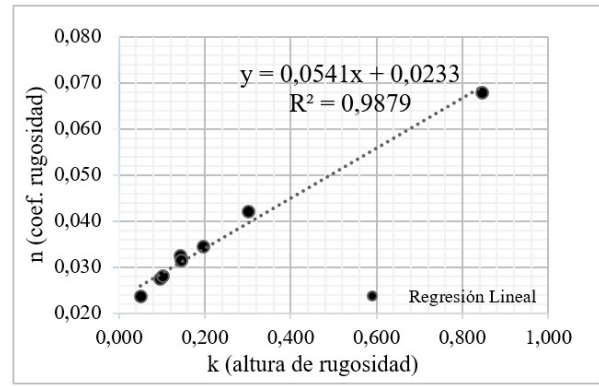


Figura 2: Coeficiente de rugosidad,  $n$ , y altura de rugosidad,  $k$

Dónde:  $n$ , desviación estándar de  $n$ ,  $R$ , radio hidráulico y  $k$ , altura de rugosidades han sido obtenidos según la metodología establecida en la sección 3.2.2.

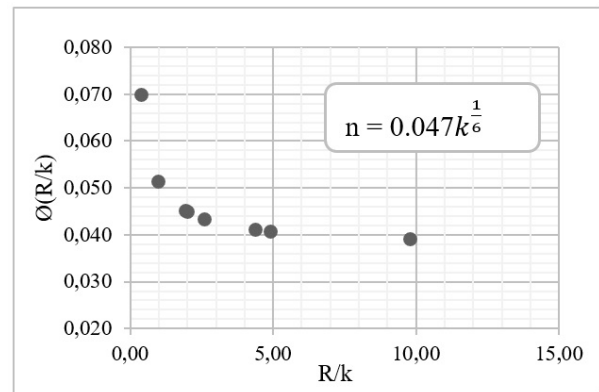


Figura 3: Relación de  $\phi(R/k)$  y  $R/k$ .

La Figura 3, muestra que para un amplio rango de  $R/k$ , la variación de  $\phi(R/k)$  es baja; cuyo coeficiente de variación es de 22,90 %, por consiguiente la relación podría aproximarse mediante el valor medio; 0,047 (media de valores de  $\phi(R/k)$ ).

Combinando la Figura 3 y la ecuación (9) se obtiene  $n$  en función de la altura de rugosidad,  $k$ , dado por la ecuación (22).

$$n = 0,047 \cdot k^{1/6} \quad (22)$$

##### 4.5. Diámetros representativos del lecho de río

De análisis granulométrico se han obtenido los diámetros efectivos  $d_i$ , para las muestras de

Tabla 2: Puntos de aforo (PA) en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz

Puntos de aforo	Localidad	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Progresiva (km)
		E	S		
PA-01	Distrito de Catac	233116,00	8915258,00	3545,00	0+000,00
PA-02	Distrito de Ticapampa	232155,00	8920136,00	3460,00	5+166,05
PA-03	Distrito de Recuay	231340,00	8922889,00	3419,00	8+188,40
PA-04	Distrito de Olleros	226914,00	8932961,00	3256,00	20+347,90
PA-05	Distrito de Huaraz	221892,00	8944496,00	3042,00	34+460,25
PA-06	Distrito de Independencia	221386,00	8950581,00	2945,00	41+113,30
PA-07	Distrito de Jangas	219370,00	8957413,00	2850,00	49+158,10
PA-08	Distrito de Pariahuanca	215570,00	8964181,00	2743,00	58+024,35

Tabla 3: Parámetros hidráulicos en cada sección transversal

Puntos de aforo	A (m <sup>2</sup> )	P (m)	R (m)	S (m/m)	Q (m <sup>3</sup> /s)
PA-01	52,420	158,360	0,3310	0,0045	27,724
PA-02	51,460	176,390	0,2917	0,0035	31,179
PA-03	36,950	131,010	0,2820	0,0075	31,018
PA-04	98,450	263,570	0,3735	0,0019	54,290
PA-05	91,300	242,720	0,3762	0,0043	71,346
PA-06	111,650	238,030	0,4691	0,0037	101,387
PA-07	159,280	364,750	0,4367	0,0018	102,944
PA-08	115,100	235,200	0,4894	0,0032	110,651

Tabla 4: Coeficiente de rugosidad, *n* (medición de velocidades, fórmula de Manning y Cowan)

Puntos de aforo	Método		
	Medición de velocidades ( <i>n</i> )	Fórmula de Manning ( <i>n</i> )	Método Cowan ( <i>n</i> )
PA-01	0,0680	0,0607	0,0530
PA-02	0,0421	0,0428	0,0430
PA-03	0,0324	0,0444	0,0480
PA-04	0,0315	0,0410	0,0380
PA-05	0,0345	0,0435	0,0380
PA-06	0,0276	0,0403	0,0480
PA-07	0,0280	0,0377	0,0330
PA-08	0,0237	0,0364	0,0330
Promedio	0,0360	0,0433	0,0418
Desv estándar	0,0141	0,0075	0,0074
Coef, Variación	0,3905	0,1740	0,1782

sedimentos en puntos de aforo, los que se presentan en la Tabla 6.

Los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$  corresponden a 10 %, 30 %, 50 %, 60 %, 84 % y 90 % de los porcentajes acumulados que pasan la curva granulométrica.

#### 4.6. Relación de los coeficientes de rugosidad y los diámetros efectivos

Para analizar las relaciones entre las variables *n* de Manning y los diámetros efectivos,  $d_i$ , se generaron los modelos estadísticos descritos en la metodología, dados por modelos lineales y no lineales (exponencial, potencial y logarítmico).

Tabla 5: Altura de rugosidades  $k$  y función  $\phi(R/k)$

Puntos de aforo	$n$	Des. Est. de $n$	$R$ (m)	$k$ (m)	$R/k$	$\phi(R/k)$
PA-01	0,0680	0,0292	0,3310	0,8447	0,3919	0,0699
PA-02	0,0421	0,0319	0,2917	0,3003	0,9714	0,0515
PA-03	0,0324	0,0282	0,2820	0,1411	19,991	0,0449
PA-04	0,0315	0,0201	0,3735	0,1447	25,808	0,0434
PA-05	0,0345	0,0278	0,3762	0,1958	19,207	0,0452
PA-06	0,0276	0,0272	0,4691	0,0958	48,963	0,0408
PA-07	0,0280	0,0202	0,4367	0,1002	43,587	0,0411
PA-08	0,0237	0,0245	0,4894	0,0500	97,971	0,0391
Promedio	0,0360					0,0470
Desv. Est.	0,0141					0,0100
Coef. Var.	0,3905					0,2290

Tabla 6: Diámetros efectivos de material de río

Puntos de aforo	Resumen de los diámetros de las partículas (mm)					
	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{84}$	$d_{90}$
PA - 01	9,651	18,344	25,934	29,681	41,422	54,464
PA - 02	1,060	5,418	13,656	18,762	35,293	44,316
PA - 03	1,586	10,879	17,868	22,615	35,543	42,344
PA - 04	0,659	3,545	8,835	13,759	30,529	35,301
PA - 05	0,904	5,720	15,727	22,436	48,377	58,811
PA - 06	0,939	3,145	6,372	8,433	41,340	54,412
PA - 07	0,491	2,634	8,551	13,137	33,420	44,442
PA - 08	0,202	0,734	3,473	8,300	24,170	29,394

Tabla 7: Análisis estadístico del Modelo Lineal entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$

$d_d$	Método							
	Medición de velocidad ( $n$ )				Fórmula de Manning ( $n$ )			
	$R^2$	$r$	$t_c$	r sig.	$R^2$	$r$	$t_c$	r sig.
$d_{10}$	0,887	0,942	6,873	Si	0,931	0,965	8,984	Si
$d_{30}$	0,764	0,874	4,402	Si	0,921	0,960	8,370	Si
$d_{50}$	0,762	0,873	4,377	Si	0,841	0,917	5,642	Si
$d_{60}$	0,680	0,825	3,570	Si	0,739	0,860	4,117	Si
$d_{84}$	0,165	0,406	1,088	No	0,235	0,485	1,356	No
$d_{90}$	0,203	0,451	1,237	No	0,259	0,509	1,447	No

r sig.: correlación significativa,  $t_t = 2,447$

#### 4.6.1. Regresión lineal

Las estadísticas del modelo lineal entre el  $n$  de Manning (método de medición de velocidades, fórmula de Manning y Cowan) y los diámetros efectivos,  $d_i$ , de la granulometría se muestran en la Tabla 7 y la Tabla 11.

#### 4.6.2. Regresión no lineal

En la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se muestran los resultados del análisis estadístico entre el  $n$  de Manning (método medición de velocidad y fórmula de Manning) de los modelos: exponencial, potencial y logarítmico respectivamente, con los diámetros efectivos,  $d_i$ . Asimismo, en la Tabla 11 y Tabla 12 se muestran los resultados del análisis estadístico entre el  $n$  de Manning (método Cowan)

Tabla 8: Análisis estadístico del Modelo Exponencial entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$

$d_d$	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	$R^2$	r	$t_c$	r sig.	$R^2$	r	$t_c$	r sig.
$d_{10}$	0,788	0,888	4,717	Si	0,886	0,941	6,842	Si
$d_{30}$	0,736	0,858	4,093	Si	0,929	0,964	8,840	Si
$d_{50}$	0,810	0,900	5,053	Si	0,875	0,935	6,484	Si
$d_{60}$	0,745	0,836	4,188	Si	0,777	0,939	4,567	Si
$d_{84}$	0,213	0,462	1,272	No	0,272	0,522	1,498	No
$d_{90}$	0,236	0,486	1,362	No	0,286	0,535	1,548	No

r sig.: correlación significativa,  $t_t = 2,447$

Tabla 9: Análisis estadístico del Modelo Potencial entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$

$d_d$	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	$R^2$	r	$t_c$	r sig.	$R^2$	r	$t_c$	r sig.
$d_{10}$	0,838	0,915	5,577	Si	0,941	0,970	9,809	Si
$d_{30}$	0,667	0,817	3,469	Si	0,751	0,867	4,259	Si
$d_{50}$	0,693	0,832	3,676	Si	0,696	0,834	3,710	Si
$d_{60}$	0,662	0,814	3,427	Si	0,643	0,802	3,284	Si
$d_{84}$	0,242	0,492	1,385	No	0,296	0,544	1,588	No
$d_{90}$	0,253	0,503	1,427	No	0,292	0,540	1,573	No

r sig.: correlación significativa,  $t_t = 2,447$

Tabla 10: Análisis estadístico del Modelo Logarítmico entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$

$d_d$	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	$R^2$	r	$t_c$	r sig.	$R^2$	r	$t_c$	r sig.
$d_{10}$	0,826	0,909	5,330	Si	0,919	0,959	8,267	Si
$d_{30}$	0,649	0,806	3,327	Si	0,691	0,831	3,660	Si
$d_{50}$	0,585	0,765	2,908	Si	0,638	0,799	3,250	Si
$d_{60}$	0,566	0,752	2,795	Si	0,595	0,771	2,968	Si
$d_{84}$	0,186	0,431	1,169	No	0,254	0,504	1,429	No
$d_{90}$	0,212	0,460	1,269	No	0,262	0,512	1,459	No

r sig.: correlación significativa,  $t_t = 2,447$

modelo exponencial, y, potencial y logarítmico respectivamente, con los diámetros efectivos  $d_i$ .

#### 4.7. Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad

Se seleccionaron los modelos (lineal y no lineal) que muestran mejor grado de asociación y, por tanto, mayor coeficiente de correlación, r,

para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning, n, por cada método desarrollado (método de medición de velocidades, ecuación de Manning y Cowan). Los resultados se presentan en la Tabla 13 resaltados con un sombreado. Observando los valores de dicha tabla, se encuentra que para estimar el n de Manning por el método de la medición de velocidades, el modelo lineal

Tabla 11: Análisis estadístico del Modelo Lineal y Exponencial entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$

$d_d$	Modelo							
	Lineal. Método de Cowan ( $n$ )				Exponencial. Método de Cowan ( $n$ )			
	$R^2$	$r$	$t_c$	r sig.	$R^2$	$r$	$t_c$	r sig.
$d_{10}$	0,483	0,695	2,366	Si	0,434	0,659	2,147	Si
$d_{30}$	0,630	0,794	3,199	Si	0,598	0,773	2,985	Si
$d_{50}$	0,484	0,696	2,371	No	0,471	0,686	2,310	No
$d_{60}$	0,336	0,580	1,744	No	0,330	0,574	1,720	No
$d_{84}$	0,242	0,492	1,385	No	0,257	0,507	1,442	No
$d_{90}$	0,272	0,522	1,495	No	0,277	0,526	1,516	No

r sig.: correlación significativa,  $t_t = 2,447$

Tabla 12: Análisis estadístico del Modelo Potencial y Logarítmica entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{90}$

$d_d$	Modelo							
	Potencial. Método de Cowan ( $n$ )				Logarítmico. Método de Cowan ( $n$ )			
	$R^2$	$r$	$t_c$	r sig.	$R^2$	$r$	$t_c$	r sig.
$d_{10}$	0,735	0,857	4,076	Si	0,756	0,869	4,315	Si
$d_{30}$	0,629	0,793	3,187	Si	0,621	0,788	3,138	Si
$d_{50}$	0,415	0,644	2,062	No	0,408	0,639	2,031	No
$d_{60}$	0,247	0,497	1,403	No	0,245	0,495	1,394	No
$d_{84}$	0,309	0,556	1,638	No	0,292	0,540	1,572	No
$d_{90}$	0,305	0,552	1,621	No	0,297	0,545	1,593	No

r sig.: correlación significativa,  $t_t = 2,447$

arroja el mejor ajuste, con un coeficiente de correlación  $r = 0,942$  entre las variables  $n$  y el  $d_{10}$ ; estableciéndose así el modelo lineal (MLin) dada en la ecuación (23).

$$n = 0,0042(d_{10}) + 0,0278 \quad (23)$$

Para el método de fórmula de Manning, el modelo Potencial posee mejor ajuste entre las variables  $n$  y el  $d_{10}$  con un coeficiente de correlación,  $r = 0,970$ . De esta forma se obtiene el modelo potencial (MPot-02) dada en la ecuación (24).

$$n = 0,0429(d_{10})^{0,1371} \quad (24)$$

Para el método de Cowan, el modelo Logarítmico presenta mejor ajuste con un coeficiente de correlación,  $r = 0,869$  entre las variables  $n$  y el  $d_{10}$ . De esta forma se obtiene el modelo logarítmico (MLog) dada por la ecuación (25).

$$n = 0,0058 \ln(d_{10}) + 0,0418 \quad (25)$$

Y, por último, para el método de la medición de la rugosidad se ha obtenido un modelo Potencial (MPot-01) dado en la ecuación (26)

$$n = 0,047(k)^{1/6} \quad (26)$$

Cabe señalar que el modelo MPot-01 está en función de la altura de rugosidad  $k$ , en metros, pero relacionándolo mediante análisis estadístico con los diámetros efectivos  $d_i$  de la granulometría y contrastando con  $n$  obtenidos por fórmula de Manning, se ha encontrado mejor ajuste con el  $d_{10}$  (mm), es así que se puede reemplazar el  $k$ , por el  $d_{10}$  obteniendo así el modelo Potencial (MPot-01) dado en la ecuación (27).

$$n = 0,047(d_{10})^{1/6} \quad (27)$$

#### 4.8. Validación del modelo general

Para validar el modelo general de la investigación, se estiman los  $n$  de Manning por los cuatro procedimientos desarrollados y expresados

Tabla 13: Modelos de regresión para cada método de estimación desarrollado

Regresión	Modelo											
	Med. de Vel. (n)				Manning (n)				Cowan (n)			
	R <sup>2</sup>	d <sub>i</sub>	r	r sig.	R <sup>2</sup>	d <sub>i</sub>	r	r sig.	R <sup>2</sup>	d <sub>i</sub>	r	r sig.
Lineal	0,887	d <sub>10</sub>	0,942	Si	0,930	d <sub>10</sub>	0,964	Si	0,630	d <sub>30</sub>	0,794	Si
Exponencial	0,810	d <sub>50</sub>	0,900	Si	0,928	d <sub>30</sub>	0,963	Si	0,598	d <sub>30</sub>	0,773	Si
Potencial	0,838	d <sub>10</sub>	0,915	Si	0,941	d <sub>10</sub>	0,970	Si	0,735	d <sub>10</sub>	0,857	Si
Logarítmica	0,826	d <sub>10</sub>	0,909	Si	0,919	d <sub>10</sub>	0,959	Si	0,756	d <sub>10</sub>	0,869	Si

mediante las ecuaciones (23), (24), (25) y (27) y se contrasta con el  $n$  obtenido por el método de la fórmula de Manning ( $n$  observados). En la Tabla 14, se presentan los resultados numéricos comparativos de este análisis y en la Figura 3 se muestra los resultados gráficos de los coeficientes de correlación,  $r$ , de  $n$  de Manning observados y estimados por los modelos encontrados. Así mismo de la Tabla 14, MLin, MPot-01, MPot-02 y MLog son abreviaturas del: modelo lineal, modelo potencial 01, modelo potencial 02 y modelo logarítmico respectivamente.

#### 4.9. Comparativo entre los coeficientes de rugosidad de Manning

La Tabla 15 muestra una comparación de los valores de  $n$  de Manning estimados por los métodos de estimación (medición de velocidades, medición de rugosidades, fórmula de Manning y Cowan). Donde se observa que el promedio de  $n$  de los cuatro métodos es 0,042 y el coeficiente de variación es 11,37%, por esta razón se asume el valor de  $n$  como representativo para el río Santa en la zona de estudio.

#### 4.10. Discusiones

A partir de los resultados obtenidos, de la Tabla 15, se ha determinado un  $n_{\text{mín}} = 0,024$ ,  $n_{\text{máx}} = 0,069$  y  $n_{\text{promedio}} = 0,042$  (considerado como la media de los métodos desarrollados: medición de velocidades, medición de rugosidad, fórmula de Manning y Cowan).

El método de medición de la rugosidad no establece directamente el valor de  $n$ , sino que establece una función para calcular  $n$  en función de la altura de rugosidad,  $k$ . Es así que, entre los métodos antes mencionados, el valor de  $n$  de

Manning se encuentra dentro del rango establecido de 0,030 a 0,050 para corrientes de montañas con fondo: grava, piedras y pocos cantos rodados propuesto por Chow [7].

La función obtenida para estimar  $n$  de Manning por el método de la medición de la rugosidad, está dado por:  $n = 0,047(k)^{(1/6)}$  que viene a ser mayor a la ecuación de  $n = 0,0336(k)^{(1/6)}$  obtenido en los grandes ríos de Venezuela [1], y análogo a la ecuación  $n = 0,044(k)^{(1/6)}$  obtenido en el río Chonta, distrito de Baños del Inca – Cajamarca [3].

Se observa que en la aplicación del análisis de regresión lineal y no lineal entre el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning y los diámetros efectivos  $d_i$ , en la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, para los diámetros menores o iguales al diámetro medio  $d_{50}$  se obtienen mejor coeficiente de correlación,  $r$ , a diferencia de los diámetros mayores que no guardan relación entre las dos variables, López [19].

Del contraste de los modelos, se observa que son dos los modelos de mejor ajuste: MPot-02, con  $r = 0,9776$  y MPot-01 con  $r = 0,9804$ . La estimación de  $n$  de Manning mediante el modelo MPot-02 da como resultado un  $n_{\text{promedio}} = 0,043$  y la estimación mediante el modelo MPot-01 da como resultado un  $n_{\text{promedio}} = 0,048$  (Tabla 14).

Se puede decir que el  $n$  medio del MPot-02 se aproxima al  $n$  estimado como la media de los métodos de medición de velocidades, fórmula de Manning y Cowan, y el  $n$  medio de MPot-01 diverge del  $n$  estimado como media de los métodos desarrollados.



Tabla 14: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) observados y estimados

PA	Observados n Manning	Estimados			
		n (MLin)	n (MPot-01)	n (MPot-02)	n (MLog)
PA-01	0,0607	0,0683	0,0686	0,0585	0,0549
PA-02	0,0428	0,0322	0,0475	0,0432	0,0421
PA-03	0,0444	0,0345	0,0508	0,0457	0,0445
PA-04	0,0410	0,0306	0,0438	0,0405	0,0394
PA-05	0,0435	0,0316	0,0462	0,0423	0,0412
PA-06	0,0403	0,0317	0,0465	0,0425	0,0414
PA-07	0,0377	0,0299	0,0418	0,0389	0,0377
PA-08	0,0364	0,0286	0,0360	0,0345	0,0325
Promedio	0,0433	0,0359	0,0476	0,0433	0,0417
Desv. Est.	0,0075	0,0132	0,0095	0,0070	0,0064
Coef Var.	0,1740	0,3676	0,2004	0,1617	0,1540

Tabla 15: Valores del coeficiente de rugosidad n de Manning

Puntos de aforo	Medic. de Vel.	Manning	Cowan	Medic. de Rug.
PA-01	0,0680	0,0607	0,0530	0,0686
PA-02	0,0421	0,0428	0,0430	0,0475
PA-03	0,0324	0,0444	0,0480	0,0508
PA-04	0,0315	0,0410	0,0380	0,0438
PA-05	0,0345	0,0435	0,0380	0,0462
PA-06	0,0276	0,0403	0,0480	0,0465
PA-07	0,0280	0,0377	0,0330	0,0418
PA-08	0,0237	0,0364	0,0330	0,0360
Promedio	0,0360	0,0433	0,0418	0,0476
Desv. Est.	0,0141	0,0075	0,0074	0,0095
Coef. Var.	0,3904	0,1740	0,1780	0,2004

## 5. Conclusiones

El coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) estimado por el método de medición de velocidades es lineal en función del  $d_{10}$ .

El coeficiente de rugosidad de Manning estimado por el método de la fórmula de Manning y por el método de la medición de la rugosidad es potencial en función del  $d_{10}$ .

El coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) estimado por el método de Cowan es logarítmico en función del  $d_{10}$ .

El modelo que presenta mayor coeficiente de correlación es el modelo potencial y el que presenta menor coeficiente de correlación es el modelo logarítmico.

El coeficiente de rugosidad de Manning adecuado para la zona de estudio es de 0,042.

## 6. Recomendaciones

Realizar estudios en épocas de lluvias y en más secciones del río Santa y en otros ríos del país. Extraer por cada punto de aforo cinco muestras del material de lecho de río.

Se recomienda sistematizar los cálculos de estimación del  $n$  de Manning para su mejor aplicación, así como implementar redes de monitoreo hidrometeorológicos e instalación de estaciones.

## 7. Referencias

- [1] M. Osío, F. Valencia, E. Guevara, y H. Cartaya di Lena, "Cálculo del coeficiente de rugosidad "n" de manning en los grandes ríos de Venezuela," *Revista Ingeniería UC*, vol. 7, no. 2, pp. 1–2, 2000.
- [2] C. Fernández, A. León, y Y. Rodríguez, "Revista INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL," *Influencia del método de estimación en el coeficiente*

- de Manning para cauces naturales*, vol. 39, no. 1, pp. 17–31, 2018.
- [3] N. Burgos, “Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning mediante mediciones de velocidad y profundidad, empleando un molinete hidrométrico, en el río Chonta, Cajamarca, 2016,” Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Cajamarca, 2017.
- [4] D. Pastora, “Evaluación de la fórmula de Manning en el río Ostua,” Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.
- [5] G. Colmenárez and J. Pardo, “Estudio de la relación de la rugosidad topográfica obtenida a partir de datos LIDAR y GPS con el coeficiente de rugosidad n de Manning,” *Revista C & G*, vol. 24, no. 1–2, pp. 143–159, 2010.
- [6] G. Guzmán y T. Vera, “Estudio del intercambio de agua superficial y agua subterránea en el río Cumbe,” Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca, 2013.
- [7] V. Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*. MacGraw Hill Latinoamericana, 2004.
- [8] R. French, *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill Latinoamericana, 1988.
- [9] A. Rocha, *Tuberías y Canalizaciones*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2007.
- [10] C. García y J. Martín, “Caracterización granulométrica del lecho móvil de un río de gravas efímero: Aplicación a un tramo de la riera de Les Arenas,” *Revista Acta Geológica Hispánica*, vol. 36, no. 1–2, pp. 137–147, 2001.
- [11] L. Crozzoli y R. Batalla, “Aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos con lecho de gravas,” *Revista C & G*, vol. 17, no. 3–4, pp. 29–39, 2003.
- [12] M. Villón, *Hidrología Estadística*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola, 2005.
- [13] C. Díaz, J. Segovia, M. Garduño, y S. Tejeda, “Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, no. 1, pp. 73–91, 2012.
- [14] M. Villón, *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2004.
- [15] Instituto Privado de Investigación sobre el cambio climático, *Manual de medición de caudales*. Instituto Privado de Investigación sobre el cambio climático, 2017.
- [16] G. Tapia, J. Molina, G. Pérez, y A. Torres, “Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Reporte Técnico, 2012.
- [17] J. Gutiérrez, “Cálculo del coeficiente de rugosidad de manning utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico,” Tesis de Maestría, Universidad de la Salle, 2009.
- [18] R. Sánchez, “t-Student. Usos y abusos,” *Revista Mexicana de Cardiología*, vol. 26, no. 1, pp. 59–61, 2015.
- [19] R. López, J. Barragán, y A. Colomer, “Predicción de la resistencia al flujo en ríos de montaña,” *Revista Ingeniería hidráulica en México*, vol. 23, no. 3, pp. 65–76, 2008.

# Mathematical model of electrical conductivity as a function of water flow in soils using Flow Net

David Duarte-González \* 

*Departamento de Matemáticas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela*

**Abstract.-** This article studies and discusses the physical-mathematical relationships that govern electrical conductivity and hydrodynamics in porous soils, involved in agricultural irrigation systems and also in grounding systems. For purposes of optimizing irrigation, use of water resources, determination of suitable land for grounding systems and its inherent precision, the parameters of water content in the soil, energy potential of the water, electrical conductivity and, consequently, the general characteristics of the sensors are a fundamental part of this study, since they represent the basic “raw material” for the development of complex irrigation forecasting systems and grounding systems design, to which as the technique advances, more and more variables and methodologies of monitors and control. Initially, the study will analyze the mathematical models that govern both the water content in the soil, and those related to resistivity; then the link between both fields and the different types of sensors for each case are studied. The main motivation of this study is to lay the foundations to initiate more complex description models through computer-assisted numerical methods, additionally with heuristic techniques, thus taking advantage of the computational power available at this time. At the end of the study, a more technical view is obtained about the hydrodynamic processes involved in agriculture and other technologies, due to the low availability of an increasingly scarce and expensive resource such as water.

**Keywords:** water; irrigation; spat; content; flow; model; agriculture.

## Modelo matemático de conductividad eléctrica en función del flujo acuífero en suelos usando mallado de flujos

**Resumen.-** En este artículo se estudian y discuten las relaciones de orden físico-matemático que rigen la conductividad eléctrica y la hidrodinámica en suelos porosos, involucrada en los sistemas de riego agrícola y también en sistemas de puesta a tierra (SPAT). Para efectos de optimización de riego, uso de recursos hídricos, determinación de terreno adecuado para Sistemas de Puesta a Tierra (SPAT) y su precisión inherente, los parámetros de contenido de agua en el suelo, potencial energético del agua, conductividad eléctrica y, por consecuencia, las características generales de los sensores, son parte fundamental de este estudio, ya que representan la “materia prima” de base para el desarrollo de sistemas complejos de pronóstico de riego y diseño de SPAT, a los que a medida que avanza la técnica, se van agregando cada vez mas variables y metodologías de monitoreo y control. Inicialmente en el estudio se analizarán los modelos matemáticos que rigen tanto el contenido de agua en el suelo, como los relacionados con la resistividad; luego se estudia el enlace entre ambos campos y los distintos tipos de sensores para cada caso. La motivación principal de este estudio es fundamentar las bases para iniciar modelos de descripción mas complejos a través de métodos numéricos asistidos por computador, adicionalmente con técnicas heurísticas, aprovechando así el poder de cómputo disponible en este momento. Al final del estudio se obtiene una visión mas técnica acerca de los procesos hidrodinámicos involucrados en la agricultura y otras tecnologías, debido a la poca disponibilidad de un recurso cada vez mas escaso y costoso como lo es el agua.

**Palabras clave:** agua; riego; SPAT; contenido; flujo; modelo; agricultura.

Recibido: 26 de octubre, 2020.

Aceptado: 27 de noviembre, 2020.

### 1. Introducción

Se pronostica que la población mundial sobrepasará los 9 mil millones de habitantes en 2050, lo que supone un problema de grandes dimensiones, en todos los rubros económicos, pero especialmente, para la industria agrícola. En la actualidad, desafíos como las condiciones climáticas extremas y el

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: deduarte1@uc.edu.ve (D. Duarte-González)

impacto ambiental del desarrollo agrícola, se combaten eficientemente con diversas técnicas desarrolladas desde los últimos años, sin embargo, el hecho de satisfacer la demanda de más alimentos, se presenta como el mayor de los retos que la humanidad haya enfrentado nunca. Para satisfacer estas necesidades, evidentemente crecientes, la agricultura debe recurrir a nuevas tecnologías [1].

El cambio climático (incremento de la temperatura, aumento de dióxido de carbono y variación en la acidez del suelo) supone un impacto, a veces, de grandes proporciones, que ha venido afectando la agricultura y a los procesos de cultivo. Este impacto se refleja en baja productividad y calidad en la mayoría de las cosechas, posiblemente debido a la falta de herramientas adecuadas que permitan al agricultor obtener información precisa y en el momento indicado. No obstante, se ha venido trabajando en tecnologías inalámbricas con dispositivos de monitoreo de variables, cada vez más discretos, y eficientes en el consumo energético, que se encargan de la toma de datos facilitando así las decisiones para mejorar los procesos de cultivos y cosecha. Todo esto se resume a incrementar la eficiencia del proceso agrícola, siempre y cuando se lleve a cabo un efectivo monitoreo en tiempo real [1].

La efectividad de los cultivos depende del conocimiento del estado de los mismos y de la vigilancia sobre los parámetros ambientales más importantes como son: la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y otros parámetros que comprometen su rendimiento [2]. El monitoreo, y por consecuencia, la eficiencia y precisión de los sistemas de riego, dentro de los parámetros asociados a los sistemas de siembra, siempre han sido de vital interés para los investigadores y desarrolladores de soluciones en este ámbito. Son diversas las variables a considerar en un contexto de riego de precisión, y muchas dependen de cada tipo de cultivo, tipos de suelos y condiciones ambientales.

El tipo de suelo, composición química, estratificación y compactación del material son propiedades inherentes de la formación geológica del suelo en un sitio determinado; aunque no permanecen constantes, su variación depende de

cambios a largo plazo [3].

Las nuevas aplicaciones de agricultura inteligente basadas en el monitoreo, en las redes de sensores inalámbricos, *Cloud Computing* y las tecnologías de Internet de las Cosas, permitirán a la industria agrícola reducir el gasto innecesario de fertilizantes y, principalmente, del agua en los sistemas de riego [4].

En los países desarrollados se elaboran Bases de Datos con parámetros que permiten estudiar diversas variables, tanto climáticas como hidrológicas, a partir de las cuales se hace posible la validación de datos provenientes de simulaciones, y de esta manera hacer los modelos más fidedignos logrando que se puedan realizar futuras proyecciones. Sin embargo, esta validación podría ser especialmente complicada en lo referente a humedad del suelo debido a la dificultad que entraña la obtención de datos observacionales en esta variable. Además, distintas bases de datos expresan la humedad del suelo de forma diferente, por ejemplo, como volumen de agua en un volumen de suelo o como capa de agua equivalente. Por ello, los datos de humedad del suelo no siempre son fácilmente comparables [5].

Por otro lado, se sabe que el suelo está formado por materias en estado sólido, líquido y gaseoso. La materia en estado sólido la componen los diferentes minerales que contiene el suelo y algunos compuestos orgánicos. La materia en estado líquido corresponde al agua con diferentes tipos de sales disueltas. El aire y el vapor de agua constituyen la materia en estado gaseoso. La interacción de estas diferentes sustancias en sus diferentes fases hace que el comportamiento del suelo sea complejo, en la Figura 1 se observa el modelo aproximado de composición volumétrica del suelo de textura media [6].

### 1.1. Fundamentación

#### 1.1.1. Determinación de la humedad en el suelo basado en tierra

En el reporte técnico de Li *et al.* se revisa el estado del arte de los métodos basados en tierra para la caracterización de la dinámica espacio-temporal del agua contenida en el suelo a escala de campo. En este trabajo discuten los métodos



Figura 1: Representación esquemática por volumen de un suelo de textura media [6]

puntuales, enfoques hidrofísicos, radiometría de banda L, inducción electromagnética, medición de resistividad, sondas, etc. Se estudian sus principios básicos y los desarrollos recientes en el procesamiento de datos [7].

### 1.1.2. Sistema de riego autónomo para pequeños cultivos basado en medición de temperatura y humedad

En el trabajo de Gómez *et al.* los autores proponen un sistema de riego autónomo compuesto de un esquema de aspersión, con el menor número de elementos para mayor cubrimiento de área, el cual se acciona automáticamente a partir de la medición de temperatura ambiente y humedad del suelo. La fundamentación de este trabajo estuvo en la implementación de un sistema modular con la posibilidad de añadir más variables, validándolo en un cultivo de maíz durante seis meses, distribuyendo equitativamente seis grupos de sensores, humedad y temperatura, en el área destinada para el cultivo; se diseñó para que los sensores interactuaran con los 6 aspersores, también dispuestos para tal fin, estos aspersores son 70-10-30G que cubren 20 m de diámetro a 72 psi cada uno, accionados por un microcontrolador. Los resultados arrojan mejoras físicas en los cultivos con menor consumo de agua, en comparación al suministro permanente con

manguera, estableciendo así mejores condiciones de calidad, mediante un sistema sencillo y de bajo costo, cuya recuperación de inversión se obtiene en un tiempo de dos a tres cosechas [8].

### 1.1.3. Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos

En el modelo numérico para flujos en un medio poroso, establecido por Duran *et al.* se empleó un método numérico para resolver las ecuaciones de Darcy en la determinación de flujos de agua en un medio poroso. A través de la Ley de Darcy se evaluó el gradiente de presión versus caudal, diámetro y velocidad. Los autores utilizaron un permeámetro para comparar los resultados obtenidos. El modelo numérico fue utilizado para variar la geometría del permeámetro y determinar las condiciones óptimas de su funcionamiento [9].

En este artículo se tratará, como primer paso, los aspectos físicos-matemáticos del perfil de agua existente en los suelos destinados para sistemas agrícolas y su correlación con la conductividad eléctrica característica. Luego se establecerá un modelo basado en flujo planimétrico vertical para analizar el comportamiento de la conductividad eléctrica del suelo, y la irrigación del agua en el mismo.

Para establecer la relación físico-matemática entre dos parámetros de naturaleza distinta como lo son la conductividad eléctrica y la cantidad de humedad que posee un material, en este caso, el suelo para agricultura, se aprovecharán los aspectos matemáticos que posee la hidrodinámica existente en los suelos para agricultura la cual también tiene aspectos espacio-temporales que definen, de igual manera, el comportamiento eléctrico del mismo.

En el modelo propuesto se plantea la Ley de Darcy, desde un punto de vista de la dinámica conductiva eléctrica del suelo para tener un panorama amplio acerca de la materia prima necesaria para un sistema de riego de precisión.

### 1.2. Delimitación

Con esta investigación se pretende establecer un estudio minucioso general de la presencia de agua en el suelo, con la intención de establecer la

relación directa o indirecta entre la conductividad eléctrica del suelo y el potencial de agua y/o humedad en el mismo. La motivación esencial es que la presencia de agua en el suelo es la variable principal y determinante para todo sistema de riego de precisión.

Los datos requeridos son:

- Conductividad y resistividad eléctrica del suelo.
- Contenido de agua en el suelo.
- Potencial de agua en el suelo.
- Características generales de los sensores.

## 2. Conceptualización

### 2.1. Conductividad y Resistividad eléctrica del suelo



Figura 2: Medición de resistencia en dos puntos separados del suelo

Partiendo del principio que todos los materiales poseen resistividad, desde el punto de vista físico y basados en la Ley de Faraday en su forma integral (Segunda Ecuación de Maxwell) se tiene la ecuación (1) [10].

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = u, \quad (1)$$

donde  $\vec{E}$  es el vector intensidad de campo eléctrico, y el diferencial se calcula en función de la longitud del conductor, en este caso, por tratarse de un suelo, debemos tomar en cuenta el segmento distancia mínima entre los puntos A y B de acuerdo con la Figura 2, y por la Ley de Ohm en su forma vectorial según la ecuación (2) [10].

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \cdot \vec{j}_c, \quad (2)$$

donde  $\sigma$  es la conductividad del suelo.

Siendo  $u$  la tensión existente en dos puntos distintos (A y B) de la superficie del suelo. Hipotéticamente la corriente  $i_c$  permanece constante a través del segmento distancia mínima entre los puntos A y B,  $\overline{AB}$ , entonces podemos considerarla proporcional a la circulación de  $\frac{1}{\sigma} \vec{j}_c$ , representándose así el efecto resistivo según la ecuación (3) [10].

$$\frac{\oint_l \frac{1}{\sigma} \vec{j}_c \cdot d\vec{l}}{i_c} = R \quad (3)$$

y sabiendo el comportamiento de la ecuación (4)

$$i_c = \int_S \vec{j}_c \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

Siendo S la sección transversal del material, entre los puntos A y B, queda la expresión de la resistencia como se muestra en la ecuación (5) [10].

$$R = \frac{\oint_l \frac{1}{\sigma} \vec{j}_c \cdot d\vec{l}}{\int_S \vec{j}_c \cdot d\vec{S}} \quad (5)$$

Tomando en consideración las ecuaciones (6) y (7) y sustituyéndolas en (5) se obtiene la ecuación (8).

$$\oint_l \frac{1}{\sigma} \vec{j}_c \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\sigma} j_c \cdot l \quad (6)$$

$$\int_S \vec{j}_c \cdot d\vec{S} = j_c \cdot S \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S} \quad (8)$$

Se puede denominar la resistividad característica del suelo  $\rho$ , según la ecuación (9) [10]:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

Quedando la resistencia expresada según la ecuación (10):

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (10)$$

De la ecuación (10) y teniendo en cuenta la ecuación (11)

$$EC_e = S, \quad (11)$$

se desprende la expresión de la conductividad eléctrica  $EC_e$  según la ecuación (12).

$$EC_e = \rho \frac{1}{R} \quad (12)$$

## 2.2. Contenido de agua en el suelo

Los dos parámetros más importantes que describen el estado de la presencia del agua en el suelo son, contenido de agua y potencial total del agua.

El contenido del agua se refiere a la fracción del suelo que está ocupada por agua y puede ser medida en masa-por-volumen.

El potencial total del agua se refiere a la energía del agua en el suelo y generalmente incluye potencial matricial (llamado, con frecuencia, potencial capilar o potencial de humedad), potencial gravitacional debido a la elevación, y potencial osmótico debido a la salinidad presente.

El contenido del agua se puede calcular gravimétricamente o volumétricamente. El contenido gravimétrico de agua es la masa de agua dividida entre la masa de suelo sólido. Se puede medir pesando una masa de suelo sólido secándolo durante 24 horas a 105 °C y repesando la muestra, según la ecuación (13).

$$\theta_{grav} = \frac{m_{agua}}{m_{suelo\_seco}} \quad (13)$$

Y la masa de agua la podemos calcular, de acuerdo a la ecuación (14):

$$m_{agua} = m_{suelo\_humedo} - m_{suelo\_seco} \quad (14)$$

Donde  $\theta_{grav}$  es el contenido gravimétrico de agua, (g/g);  $m_{agua}$  es la masa de agua, (g), y  $m_{suelo\_seco}$  es la masa de suelo seco (g).

## 2.3. Potencial de agua en el suelo

El potencial químico (osmótico), la elevación (gravitación) y el potencial hidráulico matricial (capilar), son todos los componentes del potencial total H, del agua en los suelos. La energía térmica también puede influir en la dirección del flujo de agua, aunque no está incluida en esta investigación.

El potencial osmótico es causado por el hecho de que el agua que tiene alta concentración de sales posee una energía más baja (más negativa) que el agua con menor concentración de sales. Así, el agua es conducida hacia las zonas de mayor salinidad, o, se le impide fluir de dichas zonas. De modo tal que si la salinidad es alta en el suelo, a las plantas se les dificulta obtener agua de este. La energía potencial osmótica en suelos saturados se puede calcular a través de la ecuación (15).

$$\phi_s = -3,6 \cdot EC_e, \quad (15)$$

donde  $EC_e$  es la conductividad eléctrica de la pasta saturada extraída, expresada en  $dS/m$ , y  $\phi_s$  es el potencial osmótico.

A medida que el suelo se seca, la salinidad se incrementa. El potencial osmótico, como función del contenido de agua está expresado de acuerdo a la ecuación (16).

$$\phi_s = -3,6 \cdot EC_e \cdot \theta_{sat}/\theta = -3,6 \cdot \theta_{sat}/R \cdot \theta \quad (16)$$

En cuanto a la energía cinética, ésta es despreciable debido a que la velocidad del agua es extremadamente pequeña en los suelos. Por lo tanto, el potencial total de agua en los suelos se expresa según la ecuación (17).

$$H = \frac{P}{\alpha g} + Z + \phi_s \quad (17)$$

Donde  $P$  es la presión ( $Pa$ ),  $\alpha$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ),  $g$  es la gravedad ( $9,82 m/s^2$ ),  $Z$  es la elevación sobre el nivel del mar ( $m$ ) y  $\phi_s$  es el potencial osmótico, ( $m$ ). [11]

## 2.4. Características generales de los sensores aplicados en la detección de cantidad de agua en los suelos

Una de las ventajas principales de los sensores de humedad del suelo es que miden los cambios

de humedad, antes que los cultivos comiencen a sufrir estrés por falta de humedad. En cuanto a las desventajas está en que deben ser dispuestos físicamente en el suelo, monitoreados y, posiblemente, removidos durante el proceso de cosecha. Otra desventaja es que muchos proveen estimaciones imprecisas del estado de la humedad en los suelos debido al muestreo de pequeño volumen al que tienen acceso, o en todo caso, a la ineficiente instalación.

Existen los tensiómetros, que tienen una copa cerámica porosa contenida en el suelo, y directamente miden el potencial de agua en este. A veces están conectadas directamente a los aspersores para controlar automáticamente el inicio del riego.

También están los que miden la resistencia eléctrica, la cual está inversamente relacionada con la humedad del suelo. Los dispositivos de resistencia eléctrica más comunes son bloques de yeso con electrodos dentro de los mismos. Las desventajas de los bloques de yeso incluyen respuestas lentas a cambios en el contenido de agua del suelo, sensibilidad al suelo a la salinidad, degradación química, posible daño por equipos de campo e insensibilidad a los potenciales de humedad del suelo a menos de 1 bar [11].

#### 2.4.1. Sensores de humedad de tipo capacitivo

Los sensores de humedad basados en capacitancia poseen dos electrodos que funcionan como un condensador y el suelo circundante hace las veces de material dieléctrico que almacena la carga. Existen en el mercado sensores de humedad del suelo de bajo costo, como el WaterScout SM100, de Spectrum Technologies (Figura 3) el cual se trata de un sensor activo con una precisión de 3%; este sensor tiene la capacidad de medir la conductividad eléctrica del suelo y la temperatura también [12].

#### 2.4.2. Sensores de humedad de tipo resistivo

Los sensores de tipo resistivo poseen dos puntas de prueba que funcionan como resistencias variables en función de la humedad del suelo como se muestra en la Figura 4. El rango de medición de estos sensores va de 0 a 100 del Contenido Volumétrico del Agua, teniendo una precisión de

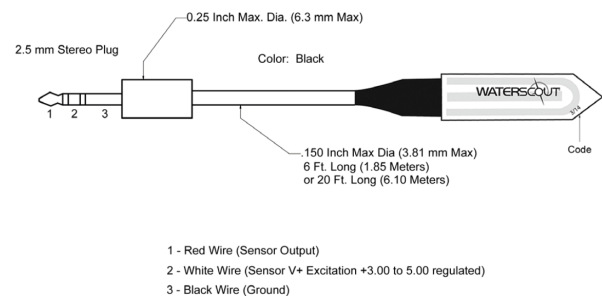


Figura 3: Esquema físico del Sensor SM100 de WaterScout. Fuente: Spectrum Technologies <https://www.specmeters.com/>

-0,5 y, tal vez, su característica más notoria es su bajo costo lo cual lo hace una buena solución para la variable de la humedad del suelo en la agricultura. Estos sensores se caracterizan por su bajo consumo en el orden de los miliamperios (mA) [13].

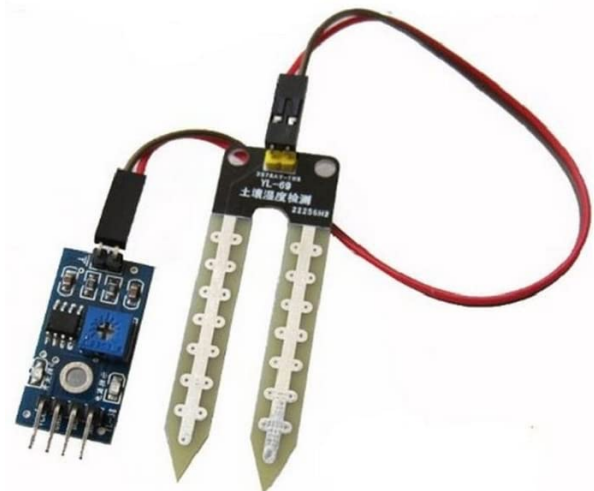


Figura 4: Sensor de tipo resistivo YL69. Fuente: <https://www.amazon.com/>

#### 2.4.3. Sensores para medición de impedancia

Los sensores basados en impedancia responden a los cambios de humedad, midiendo los cambios en su constante dieléctrica aparente como el mostrado en la Figura 5. Una señal sinusoidal de 100 MHz se aplica a una línea de transmisión interna que se extiende hacia el suelo por medio de una cabeza sensor. Los sensores de impedancia pueden tener una precisión de 1%, error de salinidad de 3,5% considerando que se trata de una medición bastante sensible [12].





Figura 5: Sensor de humedad del suelo basado en impedancia, ML3 ThetaProbe.  
Fuente: Delta T. <https://www.delta-t.co.uk/>

### 3. Modelo de irrigación y flujo de agua propuesto

#### 3.1. Flujo del agua en suelo

##### 3.1.1. Flujo en plano vertical

Para este análisis vamos a asumir que el flujo de agua está limitado a planos verticales; estableciendo un sistema de coordenadas con ejes  $X$  y  $Z$ . Sabiendo que el eje  $Z$  representa la dirección hacia arriba (vertical), o en otras palabras, la gravedad se supone que actúa en el sentido negativo de  $Z$ . En este caso vale destacar las dos componentes relevantes de la Ley de Darcy, a continuación en las ecuaciones (18) y (19).

$$q_x = -k \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (18)$$

$$q_z = -k \frac{\partial H}{\partial z} \quad (19)$$

Tomando en cuenta que la conservación de la masa exige que el agua no se puede perder o ganar desde un pequeño elemento, teniendo dimensiones diferenciales  $dx$  y  $dz$ , se resume a la Figura 6.

Como se puede observar, la diferencia entre el flujo de salida del elemento en el lado derecho y el flujo de entrada al elemento en el lado izquierdo

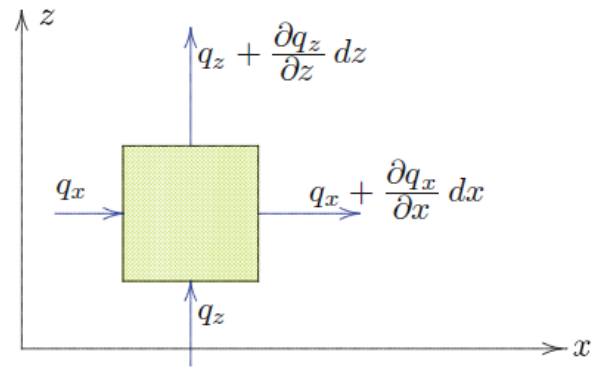


Figura 6: Efecto de la conservación de masa [14]

está la descarga. Del mismo modo, se observa el flujo por encima del elemento y debajo del elemento es la descarga vertical respecto al eje  $Z$ .

Es indudable que la suma de estas dos cantidades debe ser igual a cero, tal como se muestra en la ecuación (20):

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

Sustituyendo las ecuaciones parciales (18) y (19) en (20), se obtiene la siguiente ecuación (21):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (21)$$

Esta ecuación, matemáticamente se denomina *Ecuación de Laplace*, esta ecuación diferencial rige, junto con las condiciones de contorno, el flujo de agua subterránea en un plano, si el medio poroso es isotrópico y homogéneo, y si la densidad del fluido es constante. También se ha asumido que no se puede almacenar agua. La ausencia de almacenamiento es válida sólo si el suelo no se deforma y está completamente saturado.

El potencial de agua depende de la conductividad eléctrica del suelo, como variable única, ya que podemos asumir que tanto la presión, como la densidad del agua son constantes, en este caso, sustituyendo, la *Ecuación de Laplace* quedaría como se indica en la ecuación (22) [14]:

$$\frac{\partial^2 EC_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 EC_e}{\partial z^2} = 0 \quad (22)$$

### 3.2. Red de Flujo eléctrico (Flow-Net)

Por el principio de conservación de la carga, donde ésta ni se crea ni se destruye, se sabe que si en una superficie cerrada, la carga está disminuyendo, entonces hay un flujo de corriente neto hacia otra superficie del sistema.

Dado que la capacidad de conductividad eléctrica es linealmente dependiente del potencial de agua subterránea, y ésta a su vez es linealmente dependiente del flujo de agua en un plano vertical, entonces podemos definir que la variabilidad de la conductividad eléctrica del suelo está dada por las ecuaciones (23) y (24):

$$q_z = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (23)$$

$$q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (24)$$

Sustituyendo las ecuaciones (23) y (24) en la ecuación (20), se obtiene la ecuación:

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial x} = 0 \quad (25)$$

Se puede observar que el flujo está precisamente en la dirección  $X$  si el valor de  $\Phi$  es constante en esta dirección. Observe que la condición  $q_z = 0$  si  $\partial \Phi / \partial x = 0$ . De manera similar, el flujo está en la dirección  $Z$  solo si es constante en dirección  $Z$ , porque se deduce que  $q_x = 0$  si  $\partial \Phi / \partial z = 0$ .

Formalmente, esta propiedad se comprueba en la base del **diferencial total** según la ecuación (26).

$$d\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz = q_z dx - q_x dz \quad (26)$$

De aquí podemos observar que  $q_z/q_x = dz/dx$  es la dirección del flujo, por tanto  $d\Phi = 0$ . Concluyendo de esta manera que en una malla de líneas de potencial, el valor del flujo  $\Phi$  es constante a lo largo de las líneas de corriente.

En términos generales, se puede plantear la ecuación (27).

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta x} = \frac{\Delta EC_e}{\Delta z} \quad (27)$$

Si se elige un intervalo donde hacemos  $\Delta \Phi = \Delta EC_e$  entonces  $\Delta x = \Delta z$  generando así un pequeño

cuadrado diferencial como se aprecia en la Figura 7, siendo ésta una propiedad general de la Red de Flujos (Flow-Net).

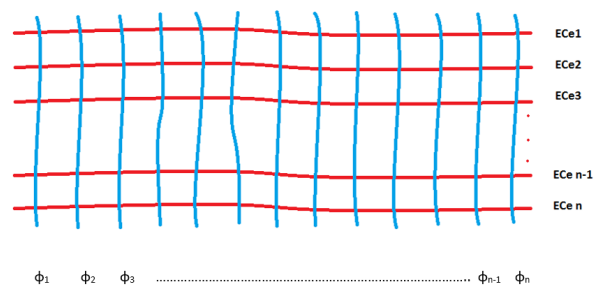


Figura 7: Líneas de flujo vs líneas de potencial expresado en capacidad de conductividad eléctrica

Un modelo físico que nos permita experimentar con los diferenciales de flujo en función de la conductividad eléctrica del suelo, dadas las composiciones de sus capas respectivas, se puede representar de esta manera, donde los elementos de los electrodos conforman una malla de líneas de flujo y líneas de potencial como se muestra en la Figura 8.

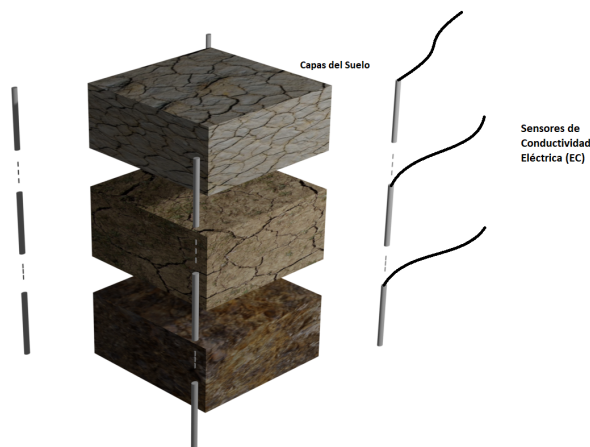


Figura 8: Representación artística en 3D de un sistema de detección de flujo en función de la conductividad eléctrica del suelo en sus diversas capas

## 4. Consideraciones finales

Como puede apreciarse, la relación entre el potencial de agua en el suelo y su conductividad

eléctrica es la base fundamental para el diseño de sistemas predictivos y sensores económicos para determinar, con una buena precisión, la cantidad de agua contenida en el suelo.

Según la ecuación (26), se establece matemáticamente la relación existente entre el flujo de agua en un suelo poroso y su conductividad eléctrica en un modelo planimétrico vertical.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se logró conseguir la expresión matemática que permite establecer la relación entre los parámetros de conductividad eléctrica y flujo de agua en un suelo poroso a través de la ecuación de derivadas parciales de Laplace y la Ley de Darcy, que describe la dinámica del agua. Dependiendo de la cantidad de intervalos elegidos para poner en marcha la Red de Flujos Eléctricos, dependerá el diseño del sensor acondicionado para tal fin, de modo que el monitoreo sea lo más fidedigno posible.

La validación de este modelo teórico debe constar de tres pasos:

- Establecer un algoritmo basado en elementos finitos para la resolución de la Ecuación de Laplace en función de la conductividad eléctrica del suelo.
- Diseñar un sensor de medición de conductividad eléctrica, directa o indirectamente, adaptado al método finito propuesto.
- Comparar con los métodos prácticos pre-existentes y verificar su funcionalidad vs economía de los recursos hídricos.

Es evidente que los métodos de cálculo del contenido de agua y/o potencial en un suelo, bien sea poroso, o de cualquier otra índole, basados en la obtención previa de su conductividad eléctrica, están sujetos a que los cambios importantes de valores, no sean detectados en un tiempo prudencial, influyendo así en la toma de decisiones, sin previamente haber hecho una predicción automática, dadas las condiciones de contorno del sistema, por tanto se hace necesario obtener un

algoritmo preciso, y de preferencia, autónomo, para lograr una alta eficiencia que reduzca los costos y aumente la productividad en el proceso de riego.





Para esto se recomienda un software que tome en cuenta las variables y cálculos propuestos en este trabajo y combinado con un método numérico finito y redes neuronales para lograr tal fin.

## 6. Referencias

- [1] S. I. Duquea, "Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos," *Revista Vector*, pp. 51–60, 2017.
- [2] L. Romero Amondaray, F. M. Piña Figueredo, y M. M. Goire Castilla, "Red de sensores inalámbricos para las casas de cultivos protegidos san José," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39, no. 1, pp. 16–26, 2018.
- [3] J. Briceño, "Manual para la medición de resistividad del suelo," *Universidad de Los Andes*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [4] F. Jonard, H. Bogena, D. Caterina, and S. Garre, "Ground-based soil moisture determination," *Observation and Measurement, Springer*, vol. 1, no. 2, 2018.
- [5] E. Romero Jiménez, M. García-Valdecasas Ojeda, P. Yeste Donaire, S. R. Gázmiz-Fortis, Y. Castro-Díez, y M. J. Esteban-Parra, "Estudio comparativo de distintas Bases de Datos de humedad del suelo superficial en la Península Ibérica," in *XI Congreso AEC (Asociación Española de Climatología)*, Cartagena, España, 2018.
- [6] J. C. Arcioni y J. F. Giménez, "La ionización de los suelos y las corrientes de los rayos a tierra," *Ingeniería Eléctrica* 357, Reporte Técnico, 2020.
- [7] X. Li, A. Klotzsche, D. Caterina, S. Garré, M. Schwank, H. Bogena, H. Vereecken, A. Monerris, F. Jonard, and C. von Hebel, "Ground-based soil moisture determination," *Agrosphäre, Tech. Rep.*, 2019.
- [8] P. F. Gómez, J. O. Gómez, y G. E. Serrano, "Sistema de riego autónomo para pequeños cultivos basado en medición de temperatura y humedad," *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 25, pp. 65–74, 2017.
- [9] M. Duran-Pinzón, J. Páez-Arango, y P. J. García-Guarín, "Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos," *Iteckne*, vol. 15, no. 1, pp. 24–33, 2018.
- [10] G. García Talavera, *Análisis Fisicomatemático de Redes Eléctricas*. Editorial Limusa, 1998.
- [11] P. Waller and M. Yitayew, *Irrigation and drainage engineering*. Springer, 2016.
- [12] S. Adla, N. K. Rai, H. Sri Karumanchi, S. Tripathi, M. Disse, and S. Pande, "Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 363, 2020.

- [13] N. Sandoval and J. Gomez, “Desarrollo de una aplicación web para registrar la temperatura y humedad del suelo, obtenidos por una red de sensores inalámbricos, utilizando el estándar IEEE 802.15. 4,” *Semilleros de Investigación*, vol. 1, no. 1, 2018.
- [14] A. Verruijt, *An Introduction to Soil Mechanics*. Springer, 2018, vol. 30.

# An assessment of development level of villages in Lorestan province using numerical taxonomy method

Maryam Hasanvandian , Alireza Poursaeed\* , Roya Eshraghi Samani ,  
Hamed Chaharsoughi Amin 

*Department of Agricultural Extension and Education, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran.*

**Abstract.-** In today's society, achieving development and reducing regional inequalities is one of the most important challenges facing governments. The role and position of villages in the process of economic, social and political development on a local, regional and national scale and the consequences of underdevelopment of rural areas such as widespread poverty, growing inequality, rapid population growth, unemployment, migration, and urban marginalization has attracted attention to rural development, and many experts believe that the cause of urban problems in developing countries is underdevelopment of rural areas. In the current research, in order to determine the degree of development of villages in Lorestan province, various economic, social and cultural sectors were considered and their ranking based on the development level using numerical taxonomic analysis method has been done. To do this, we using the latest statistics and information related to 2016, and 101 variables in the form of 8 indicators (educational, demographic, infrastructure, economical, health, service, cultural, welfare and agricultural performance) have been evaluated. According to our results, it was observed that the distribution of facilities and services in the villages of Lorestan province is unbalanced, as out of 87 villages of Lorestan province, four villages were identified as heterogeneous areas and Bazvand village has a development coefficient of 0,765 as a most provided village in this province. The rest of the villages in Lorestan province are being deprived as semi-provided and deprived villages. In conclusion, it has been said that most of the villages in this province need proper management and planning to develop and increase facilities and services.

**Keywords:** Lorestan Province; numerical taxonomy; development indicators.

## Evaluación del nivel de desarrollo de las aldeas en la provincia de Lorestan utilizando el método de taxonomía numérica

**Resumen.-** En la sociedad actual, lograr el desarrollo y reducir las desigualdades regionales es uno de los desafíos más importantes que enfrentan los gobiernos. El papel y la posición de las aldeas en el proceso de desarrollo económico, social y político a escala local, regional y nacional y las consecuencias del subdesarrollo de las zonas rurales, como la pobreza generalizada, la creciente desigualdad, el rápido crecimiento de la población, el desempleo, la migración y la marginación ha atraído la atención sobre el desarrollo rural, y muchos expertos creen que la causa de los problemas urbanos en los países en desarrollo es el subdesarrollo de las zonas rurales. En la presente investigación, se determinó el grado de desarrollo de las provincias de Lorestan, considerando sectores económicos, sociales y culturales y se realizó su clasificación en función del nivel de desarrollo mediante el método de análisis taxonómico numérico. Para ello, utilizamos las últimas estadísticas e información relacionada con 2016, y se han evaluado 101 variables en forma de 8 indicadores (educativo, demográfico, infraestructura, económico, salud, servicios, cultural, bienestar y desempeño agrícola). Se observó que la distribución de instalaciones y servicios en las aldeas de la provincia de Lorestan está desequilibrada, ya que de 87 aldeas de la provincia cuatro fueron identificadas como áreas heterogéneas y la aldea de Bazvand tiene un coeficiente de desarrollo de num 0,765 como pueblo más provisto en esta provincia. El resto de las aldeas de la provincia de Lorestan están siendo identificadas como aldeas semi-provistas y desfavorecidas. En conclusión, la mayoría de las aldeas de esta provincia necesitan una gestión y planificación adecuadas para desarrollar y aumentar las instalaciones y los servicios.

**Palabras clave:** Provincia de Lorestan; taxonomía numérica; indicadores de desarrollo.

Received: September 08, 2020.

Accepted: November 19, 2020.

\*Correspondence author:

*e-mail:*a\_poursaeed@yahoo.com (A. Poursaeed)

## 1. Introduction

Today, rapid growth of the urban population in the last few decades, is one of the most important aspects of global change [1], and the lack of financial, technical, and infrastructure facilities to create public and social uses of the city has created a heterogeneity and imbalance in the distribution of various facilities in the city. Also, rapid population growth has provided the prelude to extensive urban growth and development, and has brought about extensive changes from local to global scales in land use [2], as it can be said, the population of cities has increased, but the services that supply their different needs are not suitable for the citizens [3]. According to the UN program in recent years, the main issues of human development have been various. In this regard, among the key axes in drawing and achieving human development, we can mention the following: emphasis on financing and human development, the effects of global dimensions of human development and people's participation, human security, gender and human development, economic growth, human rights, etc [4]. Promoting human development depends on the capacity to acquire knowledge, access to the material possibilities of life, and enjoy a long and healthy life [5], and education and health centers also create social benefits, which is one of the factors influencing the human development index [6].

Hereof, inequality and its various dimensions are important signs of underdevelopment because regional inequalities in all their forms and levels can have dire consequences [7]. At the regional level, creating a logical balanced among people, employment and services is one of the most desirable ideals, and in recent years many governments and decision-makers have been trying to reduce the severity of regional inequalities [8]. Therefore, achieving the development and decrease of regional inequalities is one of the most important challenges for governments in today's society. The history of development is very vast and dates back to the time of natural and social changes on the planet. From a natural view point, the history of development coincides with

the evolution of geology and from a social view point is equal to the emergence of primitive human societies [9]. The prevalence of today's concept of development that is mostly relative, dates back to the 1960s, and before that, concepts such as reclamation (colonization), reform, development, improvement, promotion, and ultimately growth over the past years were discussed.

On the other hand, with the expansion of urbanization and the rapid growth of industry and technology in the world, the backwardness of rural areas of the world became more than ever visible, because villagers had lower incomes than urban dwellers and had little social, welfare, and educational services, hence they contributed little to growth and development [10]. The reasons for this were: the geographical dispersal of the villages, the lack of economic efficiency to provide social, professional and specialized services, the lack of agricultural job (lack of productivity), limited land resources (as opposed to population growth), and lack of proper management of managers.

The foundation for all the problems of backwardness in rural areas were found to be a widespread poverty, growing inequality, rapid population growth and growing unemployment [11]. For this reason, rural development was born to alleviate the extreme poverty of rural areas, improve the living standards and rural life quality, create employment and increase their productivity. Rural development is a multidimensional concept with different economic, social, and cultural dimensions, and one of these dimensions, due to their influence on the rural environment, is of great significance, which has caused the rural sector to always be considered [12].

### 1.1. Background and theoretical foundations of research

Literature reviews showed that there have been done many studies on the development and leveling techniques that can be mentioned below:

In [13], the authors try to use the indicators selected by the defined objectives, the TOPSIS and VIKOR methods to study sustainable development. The results may be advised to choose the

appropriate method to be used in similar studies. Amanpour [14] in a study titled *Regional Analysis and Rural Development Assessment* acknowledged that in the planning process, in order to achieve sustainable development and maintain it, all the necessary conditions of human societies and their needs must be considered. In this regard, despite Extensive studies have been conducted in Iran before, but not all aspects of development, especially rural development indicators, have been considered.

Dev [15] in his paper on the study of inequalities using the geographical distribution of income, examines spatial inequalities using geographic data, the findings show that the level of inequality between white and black neighborhoods is very acute.

Piketty & Saze [16], in a study on long-term inequality, explores and provides basic facts about the long-term evolution of income and wealth inequalities in Europe and the United States. It has been from Europe and now there is more inequality in America than in Europe. They acknowledge that it is possible for us to discuss this, but it is a lesson for the future.

Oliveira [17] in a study titled “A multivariate methodology to uncover regional disparities: A contribution to improve European Union and governmental decisions” using factor analysis to identify regional inequalities in 1991 and 1995 in Portugal. Leshner [18] in a research entitled “Analysis of the economics of investment provisions in regional trade agreements” have ranked developed and developing countries and classified them into different categories.

Molnar [19] by conducting a study titled “Factor influencing development level of settlements in South-Transdanubia”, development level of the settlements of this region in terms of 17 socio-economic and infrastructural social indicators for the years 2000 to 2004 has been determined using the combined development index method. Al-Hassan [20] studied on regional disparities in Ghana during 1990 to 2000. The results showed that economic growth during the period led to a reduction in general poverty in Ghana, but since this growth was mainly due to agricultural exports,

gap between the development of the northern regions and the southern regions has widened, because they have not been able to compete in agriculture.

Rosentstein [21] investigated cultural development and city neighborhoods. The results of this study demonstrate four characteristics of cultural development policy and argue the impact of these characteristics on cultural development and cultural life of neighborhoods. Jakub and Marcela [22] in a study titled “Factors affecting development of rural Areas in the Czech Republic: a literature review”, to detect effective indicators, 14 most frequently used indicators were identified based on the comprehensive analysis of the chosen Czech studies.

Summarizing the research conducted in Iran and outside the country shows that researchers have used different techniques and methods to measure development degree of regions and recognize and analyze inequalities and regional differences, and each of these methods has its advantages and disadvantages. Among the methods of measuring the level of development, multi-attribute decision-making (MADM) techniques have more application and generality. Therefore, the current research aims to investigate the inequalities between the villages of Lorestan province in terms of the level of development indicators using numerical taxonomic technique.

Nowadays, the issue of development is a concern for many countries, but there is no an equal definition for the development of which there is a universal agreement. Development is considered as a fundamental change in economic, social, and cultural variables in any society, and its realization requires the creation of harmony among its various dimensions. In general, development is a comprehensive process of economic, social, cultural and political activities that aim to continuously improve the lives of the population and its activities, freedom, participation and fair distribution of interests are among its basic bases [23]. In this regard, Charles Kindle Berger says: "In general, the term development implies a change in how production is done, as well as a revision in the allocation of resources and labor to different

sectors of production". But Miradell believes that development as the movement of a one-handed social system forward. Hodder [24] believes that given that the main goal of development is to eliminate all social inequalities, the most appropriate concept for development is growth along with social justice.

### 1.2. *The importance and necessity of research*

Basically, rural areas, as a rule of the settlement system and national activity, play an important role in national development, because the sustainable development of the land depends on the stability of the rural system as a subset of the land system, and the sustainability of rural spaces in different dimensions can play an effective function in regional and national development. Unfortunately, the evidence and experience show that the right and duty to develop rural communities and spaces, in proportion to its share, position and function in the national economy, has been ignored and rural areas in completely unequal situation to access opportunities and benefits from growth. Thereto, adjusting the socio-economic and territorial imbalances in order to develop rural communities and facilitate the growth and development of these communities is an essential and inevitable necessity [25]. The development of a rural area should be designed within the general framework of national policies [26]. Rural development is a dynamic process, dealing mainly with rural areas, and includes a number of factors, including agricultural growth, economic and social infrastructure, fair wages for housing and housing for landless people, rural planning, general health, education and literacy, communication, etc. Achieving development depends on various factors and conditions that should be put together to reach development aims. Experience of development in third world countries (i.e., countries mostly in Asia and Africa), at least in the rural sector, shows that the attitude towards development and the role of indigenous culture and the methods and strategies adopted play a key role in the success or failure of development programs [27]. Today, rural development is one of the most important purposes in national development, because without rural

development, development at higher levels will not be feasible. Unfortunately, although villages have been considered the country's production hub, but they neglected in planning. Therefore, its effects in recent years have been in the form of declining rural populations, rural poverty, lack of employment opportunities in rural areas, lack of facilities and services in rural areas and widespread rural-urban migration and population growth and uncontrollable expansion of large cities [28].

Hence, this study aims to show the provide level of rural areas in Lorestan province in various sectors included economic, social, agricultural, educational, etc., and then show the lacks and shortcomings in the development path, which sometimes lead to environmental instability. To do this, solving the problems caused by regional imbalances is the first step in recognizing and classifying villages in terms of provide level in different aspects such as economic, infrastructure and communication, socio-cultural, health, educational and other aspects with numerical taxonomic method. This method can be an excellent strategy for planners to focus more on development indicators in future programs. Therefore, it is necessary to identify deprived areas and comprehensive development studies to moderate regional inequalities in the Lorestan province and in each village.

## 2. Research method

Multi-attribute decision-making techniques are a good tool for ranking in a set of available indicators due to their multidimensional and often contradictory characteristics [29]. The use of quantitative methods to measure the development of regions not only reveals the differences between regions based on different variables, but can also be identified by knowing these heterogeneities at the regional level and having comprehensive and useful information about facilities, limitations and inequality. By allocating resources to less developed areas, they have paved the way for inequality adjustment. Numerical taxonomy is one of these methods.



### 2.1. Numerical taxonomy method

A numerical taxonomic method was first proposed in 1763. This method was proposed in 1968 as a tool for classifying the degree of development of different nations by Professor Sigmund Hulling in UNESCO. This method is able to divide a set into more or less homogeneous subsets and provide a scale that is used in planning to understand development degree. Also, by combining a number of indicators related to the criterion under evaluation, prioritize the studied options. Nevertheless, despite its positive features and its great application in regional studies, this method faces limitations such as that it is similar to the correlated indicators and also considers the same degree of importance for all indicators [30]. Numerical taxonomy method has the following advantages in compare to other methods: 1) divides the survey set into homogeneous subsets based on the specified indicators, and 2) grading of elements and components of each homogeneous subset [31]. Taxonomic analysis is based on the analysis of some predetermined indicators used in prioritizing options and shows a complete degree of evaluation.

Numerical taxonomy method has the following steps:

1. The initial information matrix table should be formed based on the indicators used, thus the names of the study areas in a column and the values of the indicators used in the opposite columns should be placed.
2. After preparing the data matrix, due to the fact that different indicators may have different scales, it is necessary to abandon the indicators used in the scales and eliminate the heterogeneity of the indicators. To do this, the standardization method can be used, which by converting the main indicators to standard indicators, the average of all indicators will be equal to zero and their standard deviation will be equal to one. The equations (1),(2) and (3) should be used to calculate the standard matrix:

$$z = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_i} \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

where  $z$ : standardized values,  $x_{ij}$ : the amount of change  $i$  in region  $j$ ,  $\bar{x}_i$ : average variable  $i$ , and  $S_i$ : Standard deviation of variable  $i$ . After standardizing the indicators used according to equation (1), a standardized table is obtained.

3. Calculate the distances between sections: After calculating the standard matrix, it is possible to obtain the difference between the distances of each section from the other sections for each of the indicators. To do this, we first subtract the first value of the first column from the first value of the first column, then subtract the first value of the first column from the value of the fourth row of the first column, and conduct these steps to the end for all columns.
4. Calculate the distance of each section from the other section based on the indicators used: To do this, we bring the obtained numbers to the power of two, we add them horizontally, and then we get their square root. This matrix is symmetric and its diameter is equal to zero, and each element represents the distance or difference between the two sections, which are showed in rows and columns. The minimum value in each row indicates the shortest distance.
5. Draw a figure: In this step, obtain the second shortest distance and, if necessary, the third shortest distance, so that all the sections are on the same graph.
6. Identify homogeneous sections: To achieve homogeneous sections, the upper and lower limits should be taken for the shortest

distances. To do this step, we used the equation (4) [32, 33]:

$$D^{\pm} = \bar{d} \pm 2 \cdot Sd \tag{4}$$

where:  $D^{\pm}$  = upper and lower limit,  $Sd$  = standard deviation,  $\bar{d}$  = average of the shortest distance which is obtained by the equations (5) and (6):

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{N} \tag{5}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{N}} \tag{6}$$

The sections that are within the upper and lower limits are part of the homogeneous sections that can be drawn in a figure, and the upper and lower sections should be classified in the form of other homogeneous groups.

- Calculate the compound distance of each region from the ideal region: At this step, sections or areas can be graded within each homogeneous group. For this, we should re-create the standard matrix for each of the homogeneous groups, and the largest number in each of the columns of the standard matrix being chosen as the ideal value. It should be denoted that if negative indicators are selected, the smallest number should be selected as the ideal value. It then calculated the compound distance of each section of the ideal section through the equation (7) and displayed it with the  $c_{io}$ , which in fact represents the distance from section  $I$  to the ideal section  $o$ . The smaller value of  $c_{io}$  indicate the more developmental of section [32, 33]. In other words, the distance of the desired section of  $io$  will be less, and on the contrary, the large value of the  $c_{io}$  indicates the underdevelopment of the section.

$$c_{io} = \sqrt{(z_i - z_o)} \tag{7}$$

where:  $c_{io}$  = compound distance of each section of the ideal section,  $z_i$ = values in the standard matrix, and  $z_o$  = the ideal value of each column is in the above mentioned matrix.

- Calculate the level of development of section: at this step, the relative development level of each sector can be calculated, and then arranged the sections according to the development level and their proximity or distance from the ideal section [32, 33].

### 3. Information and indicators

#### 3.1. Information

Lorestan province is one of the western provinces of Iran. The province has an area of 28.308 square kilometers and a population of more than 1.760.000. This province is a mountainous land and, except for a few limited plains, it is covered by the Zagros Mountains. According to national divisions, Lorestan province has 11 cities, 29 districts and 87 villages. The cities in this province are Khorramabad, Borujerd, Dorud, Aligudarz, Kuhdasht, Azna, Selseleh(Aleshtar), Dowreh, delfan(noorabad), romeshgan and Pol-e Dokhtar. The importance of this province is due to its numerous natural resources and mines. The location of this province and its cities in the geographical map of Iran is shown in Figure 1.

In this study, the desired indicators were selected to rank and determine the level of development of the villages of Lorestan province, and then the numerical taxonomic method was used. Therefore, in current study, sampling method was accorded to the available data, and all data were used. In this section, indicators for ranking the villages of Lorestan province are presented. Numerous and various indicators for measuring rural development have been introduced in research, programs and rural development projects in the country so far.

The nature and composition of the indicators used vary according to the objectives of the research, the approach used, the data available, and the research scope. For instance, in a research project to develop rural development indicators in Iran, which was commissioned by the Sustainable



Source: Country Mapping Organization.  
<http://www.ncc.gov.ir/search.html>

Figure 1: Location of the study area

Rural Development Subcommittee in 2007, these indicators are in the form of 3 environmental, social, and economical systems and 6 dimensions and in the form of 14 components and 32 criteria were used, and then introduce 217 indicators for measuring rural development in the country [25]. Scientists and various organizations have also used different indicators to estimate the extent of regional development. For example, in 1995, the United Nations Commission on Sustainable Development adopted 59 indicators (CSD, 1996). Then, in 2007, the United Nations introduced new revised indicators that included a set of 50 indicators (UNCSD, 2007).

In Iran, as in other underdeveloped and developing countries, there is no data concerning about the United Nation indicators. Therefore, with

a general view of the United Nation indicators, this research has considered 101 suitable indicators for Lorestan province. Selected indicators play an important role in the development of regions. In Iran, the statistical analysis of the provinces has been published by the Statistics Center of Iran ([www.amar.org.ir](http://www.amar.org.ir)). Because many data-related data were not accessible for a number of villages, villages with incomplete information were excluded.

### 3.2. Indicators

Selected indicators were classified into eight different categories, including education, population, infrastructure, economics, health care, cultural services, welfare, and agricultural performance. These indicators and sub-indicators are shown in Table 1.

First, studies and surveys were performed using numerical taxonomy method for all villages based on all indicators and then separately, based on each of the indicators.

## 4. Results and discussions

### 4.1. The final ranking of the villages of Lorestan province by numerical taxonomy method

The results of using the taxonomy method and ranking the villages based on the development coefficient are shown in Table 2. According to the results, the development coefficient varies from a maximum of 0,761 for Bazvand village to 1,000 in the Keshvar village.

According to the results of numerical taxonomy analysis, it was found that the distribution of facilities and services between the villages of this province has been done in a completely inappropriate way, so that the first rank in the ranking is related to Bazvand village, which according to Table 4 has a village with provided level. The Doroud and Shirvan villages have also been ranked next and were considered semi-provided areas. The rest of the villages have a development coefficient ( $F_i$ ) close to each other, therefore, the rest of the villages cannot be separated in terms of development. Thereto, other villages in Lorestan province are part of the

Table 1: Related indicators and sub-indicators

Row	Main Indicator	Sub-indicator
1	Educational	Percentage of literacy for men, percentage of literacy for women, percentage of general literacy, number of primary schools per 1000 students, number of high schools per 1000 students, number of high schools per 1000 students, ratio of high school class to total schools , total number of students, the literacy rate of rural women from the total population of literate people, the ratio of associate degree (and higher degree) farmers to the total population of literate farmers, the number of schools, the ratio of students to 6 years and older population, the ratio of office and administrative staffs to the population is 6-year-old population and older than literates, the ratio of 6-year-old population and older than illiterate to population of 6-year-old and older than, the ratio of illiterate farmers to the total population of farmers, the ratio of students to the active population, the population of male students in the country, the population of female students in the country, the population of male students in abroad, , the population of female students in abroad.
2	Population	Population number, population density, per capita housing unit, rural household size, number of men, number of women, percentage of immigration imported in the last 10 years, active population coefficient.
3	Infrastructure	The length of the road per 100 square kilometers, the percentage of asphalt road from all roads, the percentage of drinking water, the percentage of electricity, the percentage of telephone, the percentage of gas piping, the percentage of rural cooperatives , percentage of implementation of pilot and rehabilitation plan, percentage of public transportation, percentage of health center.
4	Economic	Percentage of mining, employment rate, percentage of industrial factories, number of employed men, number of employed women, number of poultry units, number of livestock units, number of industrial livestock units, number of deep and semi-deep wells per exploiter, per capita tractor for each operator, per capita cow and calf per user, sheep per capita for each operator, per capita area under cultivation of annual crops per user, percentage of land users to total agricultural operators, the ratio of agricultural workers to all employees in various economic sectors, the proportion of families with cars.
5	Healthcare	Percentage of purified tap water, percentage of public baths, percentage of health centers, percentage of physicians, percentage of dentists, percentage of welfare, percentage of veterinarians, percentage of emergency, percentage of delivery facilities, percentage of pharmacy, the ratio of the number of treatment beds per 1000 population, the ratio of round-the-clock clinics.
6	Service-cultural	Percentage of library, percentage of sports venues, percentage of villages with Islamic council, percentage of mosques and Hosseineh, percentage of internet access, rural population ratio in rural cooperatives, percentage of cooperatives, percentage of rural areas, percentage of tourism services (dining hall, public residence, etc.), percentage of agricultural promoters, percentage of established banks, percentage of places for selling protein and meat products.
7	Welfare	Percentage of access to radio, percentage of access to video media, percentage of waste collection system, percentage of access to magazines and newspapers, percentage of park (green space), percentage of information and communication technology, percentage of centers postal services and postal banks, percentage of ATMs.
8	Agricultural performance	Percentage of fruit production from horticultural products, yield of irrigated wheat per hectare, yield of rainfed wheat per hectare, yield of irrigated barley per hectare, yield of rainfed per hectare, yield of other irrigated crops per hectare , yield of other rain-fed crops per hectare, average consumption of organic fertilizers per hectare in farms, average consumption of livestock fertilizers per hectare in farms, average consumption of chemical fertilizers per hectare in farms, average consumption organic fertilizers per hectare in orchards, average consumption of livestock fertilizers per hectare in orchards, the amount of chemical fertilizers per hectare in orchards, average consumption of pesticides per hectare in orchards, average consumption of pesticides per hectare on farms.

semi-provided and deprived villages. It should be noted that the villages of Olad Ghobad have been removed from our list due to incomplete information, and also the four villages included Western Zalaghi, Romiani, Western Keragah, and Goodarzi have been identified as heterogeneous areas and we excluded them from list. The results show an unfair distribution and even lack of facilities and infrastructure in the villages of Lorestan province, so that the villages ranked 14

to 82 are considered deprived villages and were in one group. Considering the distances between the villages of this province, it is necessary to pay attention to the balanced distribution of services among different villages of the Lorestan province in order to achieve proper homogeneous development at the provincial level by adopting proper planning and management.

Therefore, with the results of data analysis based on numerical taxonomy method, and development

Table 2: The final ranking of the villages of Lorestan province by numerical taxonomy method

Village	Development degree (Fi)	Rank	Village	Development degree (Fi)	Rank	Village	Development degree (Fi)	Rank
Bazvand	0,761	1	Tashkan	0,910	29	Southern Mirbag	0,946	57
Doroud	0,844	2	Shurab (Dureh)	0,911	30	Eastern Miankuh	0,948	58
Shirvan	0,849	3	Malavi	0,911	31	Western Tarhan	0,950	59
Roumeshkan	0,856	4	Southern Khavi	0,911	32	Mamulan	0,950	60
East Silakhor	0,858	5	Eastern Koregah	0,911	33	Siuthern Beyranvand	0,954	61
Zhan	0,862	6	Eastern Tarhan	0,914	34	Eastern Zaz	0,956	62
Silakhor	0,866	7	Northern Kashkan	0,915	35	Zaghe	0,956	63
Heshmat Abad	0,871	8	Afrineh	0,916	36	Western Miankuh	0,957	64
Western Pachelak	0,871	9	Southern Kashkan	0,916	37	Zir Tang	0,958	65
Yousefvand	0,876	10	Veysian	0,919	38	Western Barbarud	0,959	66
Bordserah	0,880	11	Azna	0,919	39	Mahru	0,960	67
Ghale Mozafari	0,881	12	Eastern Pachelak	0,920	40	Cham Sangar	0,960	68
Chalanchulan	0,881	13	Valanjerd	0,923	41	Tang Haft	0,961	69
Southern Kuhdasht	0,886	14	Northern Dehpir	0,923	42	Sepid Dasht	0,962	70
Doureh	0,888	15	Do Ab (Selseleh)	0,923	43	Northern Itivand	0,964	71
Northern Mirbag	0,890	16	Kunani	0,924	44	Eastern Zalaghi	0,965	72
Souri	0,891	17	Darreh Seydi	0,929	45	Farsesh	0,966	73
Eastern Japlagh	0,891	18	Bolouran	0,929	46	Ghyed Rahmat	0,971	74
Jaydar	0,891	19	Northern Kahveh	0,931	47	Southern Itivand	0,972	75
Hemat Abad	0,892	20	Darb Gonbad	0,931	48	Gerit	0,975	76
Gol Gol	0,898	21	Cheshmeh Par	0,936	49	Northern Beyranvand	0,975	77
Forouz Abad	0,898	22	Khomeh	0,936	50	Western Kakavand	0,975	78
Western Japlagh	0,900	23	Robat (Khoram Abad)	0,939	51	Eastern Kakavand	0,976	79
Nourabad (Delfan)	0,905	24	Northern Kouhdasht	0,939	52	Kakasharaf	0,978	80
Oshtorinan	0,906	25	Ghalaie	0,940	53	Pishkuh	0,978	81
Hanam	0,907	26	Western Zaz	0,942	54	Zalaghi	1,000	82
Sothorn Dehpir	0,907	27	Nur Ali	0,942	55	Keshvar		
Eastern Borborud	0,908	28	Razan	0,946	56			

coefficient of rural provinces that have small distances from each other, it can be concluded that other methods along with numerical taxonomy technique can be used to increase ranking accuracy.

4.2. *General ranking of villages in Lorestan province based on each indicator by using the numerical taxonomy method*

The ranking of villages in each of the indicators is shown separately in Table 4. First, all the data in the Excel software was sorted. Then, the following steps were done: standardization, calculation of compound distance, homogenization, development

Table 3: Qualitative classification of development in numerical taxonomic method

Development coefficient	Development level
0 – 0,775	Provided
0,775 – 0,884	Semi-provided
0,884 – 1	Deprived

model determination ( $C_{io}$ ), and development coefficient ( $Fi$ ) separately for each of the studied indicators, calculation and final ranking based on the development coefficient index.

According to Table 4, the results are as follows:

- Educational indicator: In terms of educational index, South Koohdasht village with a development score of 0,63 had the first rank and Zhan (0,65) and Doroud (0,65) villages obtained the next ranks, respectively. According to these results and Table 3, it can be concluded that the distribution of educational facilities is heterogeneous so that the villages ranked 1 to 18 are described as having privileged areas, and villages with ranking 19 to 54 are semi-provided, and next 20 villages are deprived villages. However, considering the high development coefficient of the first rank village and also the low difference between the first and last rank villages, it can be considered that the lack of planning or lack of supervision over the proper distribution of educational facilities and services is sensible and tangible.

The villages of South Dehpir, Western Zalaghi, Eastern Zaz, Shurab (Dureh), Western Tarhan, Western Kargah, Northern Kouhdashti, Golgol, Northern Mirbag, Noor Ali and Hemmat Abad were also identified as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.

- Population index: In terms of population index, Shirvan village with a development coefficient score of 0,39 has the first rank and Doroud (0,46) and Noor Abad (0,48) villages obtained the next ranks, respectively.

According to these results and Table 3, it can be said that the demographic conditions and the density of the active population are heterogeneous, so that the villages ranked 1 to 42 are described as provided areas, and the villages of ranks 43 to 73 are part of the semi-provided villages, as well as villages of Sepid Dasht, Farsesh, Cham Sangar, and Western Zaz were recognized as deprived villages. The villages of Southern Dehpir, Western Kargah, Goodarzi, Mahro, Hemmat Abad, Southern Khaveh, Eastern Zalaghi, Western Zalaghi, and Northern Kouhdasht were also identified as heterogeneous areas and were removed from our ranking list.

- Infrastructure index: In terms of infrastructure index, Chalancholan village with the coefficient development score of 0,22 has the first rank and Heshmat Abad (0,25) and Silakhor (0,28) villages achieved the next ranks, respectively.

According to these results and Table 3, it can be said that the distribution of infrastructure facilities is relatively homogeneous and fair, so that villages 1 to 68 are described as providing areas, and the villages of ranks 69-72 are part of the semi-provided villages. Only Mahour and Tang Haft villages were recognized as deprived villages.

Based on the results, it can be concluded that the focus on the distribution of infrastructure structures among Lorestan villages is less visible, and a more equitable distribution are necessary. Western Zalaghi, Souri, Farsesh, Goodarzi, Bazvand, Romeshkan, Romiani, Eastern Borbrud, Western Barbroud, Razan, Eastern Tarhan, and Qalaei villages were found to be as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.

- Economical index: In terms of economical index, Zhan village with the coefficient development score of 0.60 has the first rank and Silakhor (0,62) and Dureh (0,63) villages obtained the next ranks, respectively. According to these results and Table 3, it

Table 4: Villages ranking in Lorestan province based on each of the indicators using the numerical taxonomy method

Rank	Educational		Population		Infrastructure		Economical	
	Village	DC	Village	DC	Village	DC	Village	DC
1	Southern Kuhdasht	0,63	Shirvan	0,39	Chalanchulan	0,22	Zhan	0,60
2	Zhan	0,65	Dorud	0,46	Heshmat Abad	0,25	Silakhur	0,62
3	Dorud	0,65	Nur Abad (Delfan)	0,48	Silakhur	0,28	Dorud	0,63
4	Hanam	0,66	Southern Kuhdasht	0,51	Yusefvand	0,29	Western Pachelak	0,64
5	Shirvan	0,68	Northern Mirbag	0,53	Dureh	0,35	Eastern Japlagh	0,66
70	Boluran	0,94	Eastern Zaz	0,84	Eastern Zalaghi	0,80	Razan	0,90
71	Eastern Zalaghi	0,94	Kakasharaf	0,86	Cham Sangar	0,81	Ghayed Rahmat	0,90
72	Ghalayi	0,95	Eastern Tarhan	0,86	Keshvar	0,84	Northern Beyranvand	0,90
73	Gerit	0,97	Keshvar	0,86	Mahru	0,93	Northern Khaveh	0,91
74	Farsesh	0,98	Sepid Dasht	0,89	Tang Haft	1,00	Farsesh	0,92
75	Dare Seyedi	1,00	Farsesh	0,90			Pishkuh Zalaghi	0,92
76			Cham Sangar	0,90			Sepid Dasht	0,95
77			Western Zaz	1,00			Eastern Zalaghi	0,95
78							Western Zalaghi	0,96
79							Cham Sangar	0,96
80							Tang Haft	1,00
Rank	Health care		Services and cultural		Welfare		Functional-agricultural	
	Village	DC	Village	DC	Village	DC	Village	DC
1	Rumiyani	0,70	Heshmat Abad	0,53	Chalanchulan	0,50	Yusefvand	0,64
2	Northern Dehpir	0,70	Oshtorinan	0,58	Silakhur	0,51	Ghale Mozafari	0,68
3	Bardeh Sareh	0,70	Tashkan	0,59	Eastern Barbarud	0,67	Rumeshkan	0,72
4	Eastern Barbarud	0,72	Bardeh Sareh	0,60	Nur Abad (Delfan)	0,67	Cahm Sangar	0,72
5	Azna	0,72	Western Pachelak	0,61	Zhan	0,71	Ghalayi	0,75
71	Cham Sangar	0,92	Eastern Kakavand	0,85	Southern Beyranvand	0,98	Kargah	0,96
72	Pishkuh Zalaghi	0,93	Pishkuh Zalaghi	0,86	Eastern Kakavand	0,98	Ghayed Rahmat	0,999
73	Mamulan	0,93	Western Miankuh	0,86	Tang Haft	0,987	Zaghe	0,999
74	Western Kakavand	0,94	Cham Sangar	0,86	Western Zalaghi	0,987	Eastern Barbarud	0,999
75	Southern Itvand	0,94	Western Kakavand	0,88	Keshvar	0,987	Southern Beyranvand	1,00
76	Eastern Kakavand	0,94	Mahru	0,88	Kakasharaf	0,988	Western Miankuh	0,95
77			Tang Haft	0,92	Cham Sangar	0,992		
78	Northern Kuhdasht	0,96	Western Zalaghi	1,00	Souri	0,996		
79	Western Zalaghi	1,00			Western Zaz	0,996		
80					Eastern Zaz	1,00		

DC: Development coefficient

can be said that the distribution of facilities, structures and units effective in economic conditions is heterogeneous. Villages with ranks of 1 to 22 are described as providing areas, and the villages of ranks 23 to 67 are part of the semi-provided villages, as well as villages with ranking from 68 to 80 were recognized as deprived villages.

The economic index as well as its infrastructure is among the factors affecting various indicators that should be given more attention, and lack of planning and mismanagement regarding the economic index can be one of

the main reasons of underdevelopment and deprivation in different villages. It should be noted that the villages of Bolouran, Western Kargah, Northern Koohdasht, Western Miankooh, Bazvand and Noor Ali were found to be as heterogeneous areas and were omitted from the ranking list.

- Health care index: In terms of health care index, Romiani village with a development coefficient score of 0,70 has the first rank and Western Zalaghi village (1,00) allotted the last rank, which has a difference of 0,30 coefficients with each other, which shows the

lack of proper distribution of facilities and health infrastructure is at the village level of Lorestan province. According to these results and Table 3, the first to 21st rank villages are described as providing villages, and the villages of ranks 22 to 61 are part of the semi-provided villages, as well as villages with ranking from 62 to 79 were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Tang Haft, Shirvan, Goodarzi, Keshvar, Razan, and Romeshkan were identified as heterogeneous areas and were deleted from the ranking list.

- Services and cultural index: In terms of service and cultural index, Heshmat Abad village, with a development coefficient score of 0,33 had the first rank and Western Zalaghi (1,00) gained the last rank. According to these results and Table 3, it can be seen that the villages with ranking from 1 to 50 are described as providing villages, and the villages of ranks 51 to 76 are part of the semi-provided villages, as well as Tang Haft and Western Zalaghi were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Eastan Japlagh, Goodarzi, Western Japlagh, Cheshmeh Par, Northern Khaveh, Romiani, and Silakhor were also identified as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.
- Welfare index: In terms of welfare index, Chalancholan and Eastern Zaz villages were ranked first and last, with a development score of 0,501 and 1,00, respectively. According to these results and Table 3, it can be seen that the villages with ranking from 1 to 18 are explained as providing villages, and the villages of ranks 19 to 45 are part of the semi-provided villages, as well as villages from ranks of 46 to 80 were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Ghayed Rahmat, Goodarzi, Western Pachelak, Northern Mirbag, and Eastern Silakhor were also identified as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.
- Functional-agricultural index: In terms of service and cultural index, Yousefvand village, with a development coefficient score of 0,638 had the first rank and Southern Beyranvand (1,00) obtained the last rank. According to these results and Table 3, it can be concluded that the villages with ranking from 1 to 6 are explained as providing villages, and the villages of ranks 7 to 21 are part of the semi-provided villages, as well as villages from ranks of 22 to 75 were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Cheshempar, Dare Seyedi, Romiani, Oshtorinan, Tang Haft, Souri, Mahru, and Eastern Silakhor were identified as heterogeneous areas and were omitted from the ranking list.

## 5. Conclusion

In recent decades, rural development has been one of the main examples of development in most third world countries, hence it is a strategy to improve the social and economic life of the poor people in village and make a comprehensive effort to reduce poverty, and efforts should be made in village areas to increase production and performance, and in the general context of national policies, this should be taken into account [26]. In fact, there is a connection between rural development and national development (Cochrane, 2007). However, by examining and evaluating the distribution of services and facilities at the provincial and intra-provincial level, especially at the rural level, the need for special awareness to services and facilities distributions is more expected.

Due to the geographical location of Lorestan province and being located in the Zagros Mountains and semi-humid and semi-arid climate zones [34], this province has a great potential for development that can be further studied. Also, in some villages of Lorestan province, it is observed that although they are not in a good position in the ranking based on all indicators, but they have high rankings in the evaluation based on each of the indicators. For instance, Chalancholan



village, which is ranked 13th in the ranking based on all indicators and counted as a semi-provided areas, based on the infrastructure index, this village has the first rank, (development coefficient: 0,22), which shows it is suitable for development in terms of infrastructure.

Therefore, it can be concluded that in many development indicators, the planning were formed some villages have made relative progress in one dimension and these villages have not been properly developed in the other indicators, and this has caused to reduction rural development level for all indicators. By having a suitable planning for the homogeneous distribution of infrastructure, services, and comprehensive facilities in each of the villages of the Lorestan province, it is easy to imagine a coherent program that is appropriate to the comprehensive progress approach at the provincial level. In this regard, we can present the following suggestions:

1. Use studies and research on implementation and planning to prioritize villages
2. Encouraging private investment to progress the socio-economic indicators of the Lorestan villages
3. Establishment and reinforcement of service centers in the villages and central rural
4. Improving the business environment and creating a suitable environment for using personnel in various sectors
5. Considering the deprivations in the priority of development planning can decrease the gap amongst the villages. According to our results, it can be said that most of the villages of Lorestan province are deprived and need more attention from the authorities.
6. Balancing the pattern of distribution of facilities and services, as well as decentralizing some villages in the Lorestan province to benefit other villages
7. Pay attention to the capabilities of each region and appropriate policies to create jobs in deprived villages

8. Providing social welfare and welfare services according to all settlements of the province, especially rural areas to prevent the migration from rural areas to cities.

## 6. References

- [1] C. Xu, M. Liu, S. An, J. M. Chen, and P. Yan, "Assessing the Impact of Urbanization on Regional Net Primary Productivity in Jiangyin County, China," *Journal of Environmental Management*, vol. 85, no. 3, pp. 597–606, 2007.
- [2] J. Xi and N. N. Cho, "Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban–rural transects: A case study of Guangzhou, China," *Landscape and Urban Planning*, vol. 79, no. 1, pp. 96–109, 2007.
- [3] M. Sohel Rana, "Status of water use sanitation and hygienic condition of urban slums: A study on Rupsha Ferighat slum, Khulna," *Desalination*, vol. 246, no. 1–3, pp. 322–328, 2009.
- [4] United Nations Development Programme (UNDP), *Human Development Report 2003. Millennium Development Goals: A compact among nations to end human poverty*. New York, Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [5] J. Field, *Social capital: Keys Ideas*, 2nd ed., P. Hamilton, Ed. The Open University, Milton Keynes outledge, 2008.
- [6] B. A. Sullivan, M. Snyder, and J. L. Sullivan, *Cooperation: The Political Psychology of Effective Human Interaction*, 1st ed. Wiley-Blackwell, 2007.
- [7] M. Pacione, *Urban Geography, a Global Perspective*. London: Routledge, 2003.
- [8] A. Winkler, "Measuring Regional Inequality: An Index of Socio-Economic Pressure for Serbia," *Collection of Papers - Faculty of Geography at the University of Belgrade*, vol. 60, pp. 81–102, 05 2012.
- [9] D. Clark, *Urban World/Global City*. London and New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2003.
- [10] C. A. Archibong, "Technology, infrastructure and entrepreneurship: Role of the government in building a sustainable economy, school of business and economics North Carolina & T State University," *The International Journal Of Humanities and Social Studies*, vol. 3, no. 11, pp. 313–323, 2004.
- [11] Y. Azadi and H. BeikMohammadi, "Analysing and ranking development levels of rural regions in the Townships of Ilam Province," *Journal of Spatial Planning*, vol. 2, no. 2, pp. 41–62, 2013.
- [12] R. Das and A. K. Das, "Industrial Cluster: An Approach for Rural Development in North East India," *International Journal of Trade, Economics and Finance*, vol. 2, no. 2, pp. 161–165, 2011.
- [13] M. Piwowski, D. Milaszewicz, M. Latuszyńska, M. Borawski, and K. Nermend, "TOPSIS and VIKOR

- methods in study of sustainable development in the EU countries,” *Procedia Computer Science*, vol. 126, pp. 1683–1692, 2018.
- [14] S. Amanpour, S. Mokhtari Chelcheh, R. Hosseini Kahnaj, and E. Veisi, “Spatial Analysis and Evaluation of Rural Development (Case Study: Counties of Chaharmahal & Bakhtiyari),” *Journal of Research & Rural Planning*, vol. 4, no. 2, pp. 97–110, 2015.
- [15] B. Dev, “Assessing Inequality Using Geographic Income Distributions,” phdthesis, University of California, Santa Barbara and San Diego state University, 2014.
- [16] T. Piketty and E. Saez, “Inequality in the Long Run, the since of Inequality,” *Science*, vol. 344, no. 6186, pp. 838–843, 2014.
- [17] J. Oliveira Soares, M. M. Lourenço Marquês, and C. M. Ferreira Monteiro, “A multivariate methodology to uncover regional disparities: A contribution to improve European Union and governmental decisions,” *European Journal of Operational Research*, vol. 145, no. 1, pp. 121–135, 2003.
- [18] M. Leshner and S. Miroudot, “Analysis of the Economic Impact of Investment Provisions in Regional Trade Agreements,” OECD Trade Policy Papers, No. 36, OECD Publishing, Paris, techreport, 2006.
- [19] T. Molnar, “Factor Influencing Development Level of Settlements in South-Transdanubia,” *Journal of Central European Agriculture*, vol. 8, no. 3, pp. 277–284, 2007.
- [20] R. M. Al-Hassan and X. Diao, “Regional disparities in Ghana: Policy options and public investment implications,” International Food Policy Research Institute (IFPRI), GSSP working papers 2, 2007.
- [21] C. Rosenstein, “Cultural development and city neighborhoods,” *City, Culture and Society*, vol. 2, no. 1, pp. 15–29, 2011.
- [22] S. Jakub and T. Marcela, “Factors Affecting Development of Rural Areas in the Czech Republic: A Literature Review,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 220, pp. 496–505, 2016.
- [23] M. Mousavi, A. Meshkini, M. Vaisy, and M. Hosseini, “Assessing the levels of development of health services with decision-making model - several criteria) Case study: Cities of Khorasan Razavi province,” *Human settlement planning studies*, vol. 11, no. 37, pp. 99–112, 2016.
- [24] R. Hodder, *Development Geography (Routledge Contemporary Human Geography)*, 1st ed. Routledge, 2000.
- [25] R. Rezvani, *Introduction to Rural Development Planning in Iran*. Tehran, Iran: Qomes Publication, 2004.
- [26] A. Oddershede, A. Arias, and H. Cancino, “Rural development decision support using the Analytic Hierarchy Process,” *Mathematical Computer Modelling*, vol. 46, no. 7–8, pp. 1107–1114, 2007.
- [27] Millennium Challenge Corporation, *The Agency for International Development and the Millennium Challenge Corporation : fiscal year 2012 budget requests and future directions in foreign assistance : hearing before the Committee on Foreign Affairs, House of Representatives, One Hundred Twelfth Congress, first session, March 16, 2011*. United States: Government Publishing Office, 2011.
- [28] E. B. Barrios, “Infrastructure and rural development: household perceptions on rural development,” *Progress in planning*, vol. 70, no. 1, pp. 1–44, 2008.
- [29] T. Prato and G. Herath, “Multiple-criteria decision analysis for integrated catchment management,” *Ecological economics*, vol. 63, no. 2, pp. 627–632, 2007.
- [30] J. Mohammadi, A. Abdoli, and M. Fathi Beyranvand, “Investigating the level of development of Lorestan province cities by housing and welfare-infrastructure services, agriculture and industry,” *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, vol. 12, no. 25, pp. 127–150, 2013.
- [31] P. Kline, *An easy guide to factor analysis*. London and New York: Psychology Press, 1994.
- [32] K. Kalantari, *Data processing and analysis in socio-economic research using SPSS software*, 2nd ed. Tehran: Sharif Publishing, 2006.
- [33] B. Saroukhani, J. Tavakoli Vala, and A. Rostamzadeh, “Numerical Taxonomy and Its Application in Social Research,” *Journal of Historical Sociology*, vol. 4, no. 1, pp. 171–194, 2012.
- [34] P. Attarod, S. M. M. Sadeghi, T. G. Pypker, and V. Bayramzadeh, “Oak trees decline; a sign of climate variability impacts in the west of Iran,” *Caspian Journal of Environmental Sciences*, vol. 15, no. 4, pp. 373–384, 2017.

# Measuring angular coordinates in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) positioning systems and developing a new phase-metric method for goniometric control of UAVs

O. R. Kuzichkin <sup>\*,a</sup> , G. S. Vasilyev <sup>a</sup> , D. I. Surzhik <sup>b</sup> , A. V. Grecheneva <sup>b</sup> ,  
I. A. Kurilov <sup>b</sup> , S. M. Kharchuk <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Belgorod State University, Belgorod, Russia.

<sup>b</sup>Vladimir State University, Vladimir, Russia.

**Abstract.-** For the safe operation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), an effective Automatic Control System (ACS) is necessary, which for successful operation requires high accuracy of the initial information about the UAV's position in space. Based on the analysis of the shortcomings of the known orientation systems, a phase-metric method of goniometric (angular) control based on accelerometric and gyroscopic transducers for positioning the UAV is proposed, which has a higher accuracy and a wider range of measurement angles. The conducted study showed that in a wide range of rotation angles from 10 to 90 degrees, the root mean square error (RMS) of the results of calculating the rotation angle using the phase-metric method is 8,78 times less than the RMS of the results of calculating the rotation angle using the arctangent function. Reducing the error determines the effectiveness of the proposed method in UAV control systems.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles (UAV); orientation system; goniometer control; phase-metric method; accelerometer; gyroscope.

## Medición de las coordenadas angulares en los sistemas de posicionamiento de Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) desarrollando un nuevo método fase-métrico para el control goniométrico de los VANT

**Resumen.-** Para la operación segura de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), es necesario un sistema de control automático (SCA) efectivo, que para una operación exitosa requiere una alta precisión de la información inicial sobre la posición del VANT en el espacio. Basado en el análisis de las deficiencias de los sistemas de orientación conocidos, se propone un método de control goniométrico (angular) de fase métrica basado en transductores acelerométricos y giroscópicos para posicionar el VANT, que tiene una mayor precisión y un rango más amplio de ángulos de medición. El estudio realizado mostró que en un amplio rango de ángulos de rotación de 10 a 90 grados, el error cuadrático medio (RMS) de los resultados de calcular el ángulo de rotación usando el método de fase métrica es 8,78 veces menor que el RMS de los resultados de calcular el ángulo de rotación usando la función arcotangente. La reducción del error determina la efectividad del método propuesto en los sistemas de control de VANT.

**Palabras clave:** vehículos aéreos no tripulados (VANT); sistema de orientación; control de goniómetro; método fase-métrico; acelerómetro; giroscopio.

Received: August 31, 2020.

Accepted: October 05, 2020.

\*Correspondence author:  
e-mail: eav@ores.su (O. R. Kuzichkin)

### 1. Introduction

The effective functioning of unmanned aerial vehicles (UAVs) is provided by an automatic control system that performs the tasks of ensuring the required dynamic properties of the UAV, stabilizing the UAV's angular position and automating

trajectory control [1]. An investigation considered the use of ideal control hypothesis for the direction, route and control hypothesis of airplane, shuttle and rockets. A general methodology was adopted that includes modern control strategies based on multi-parameter trajectory optimization for each vehicle [2]. The ideal ways of each UAV were gotten by the hereditary calculation in an equal structure. As indicated by the elements of way arranging, hereditary encoding has a few files. Another hereditary administrator was acquainted with select a suitable pair of chromosomes for hybrid activity. The adequacy of the strategy was appeared by a few reproductions [3]. Another perception technique that utilizes UAVs to overview park-based physical movement was created. Contrasted with these strategies, the UAV perception instrument, covering bigger objective regions, is reasonable for including park clients in an increasingly dependable and effective manner and mapping their utilization designs; in any case, the device is more fragile at gathering itemized client data and looking over under poor climate conditions. In this manner, the UAV technique could supplement existing devices. At long last, this investigation proposed pragmatic ramifications of the UAV perception technique [4].

First of all, the unstable angular position of the UAV causes a decrease in flight safety. In addition, this factor leads to a decrease in the effectiveness of UAV communication systems with narrowly directed antennas due to the deviation of the angular coordinates of the aircraft from the maximum of the receiving antenna's directional diagram [5]. The deterioration of the received signal quality caused by this effect hinders the development of communication protocols for ad-hoc aircraft networks (Flying Ad Hoc Network, FANET) that use directional antennas and increase network performance compared to protocols based on omnidirectional antennas. For instance, a novel MAC convention, LODMAC (Location Oriented Directional MAC), which fuses the use of directional radio wires and area estimation of the neighboring hubs inside the MAC layer was introduced [6, 7]. These aspects determine the relevance of the development of new UAV ACS

[8, 9, 10].

A necessary condition for reliable operation of the UAV ACS is high accuracy of the initial information about the UAV position in space. For small-sized UAVs, free-form orientation systems (FOS) based on inertial sensors (micromechanical gyroscopes and accelerometers) are the most common sensors for orientation systems [11]. The main errors of such systems are non-linearity, zero offset, and noise component. These factors have a negative impact on the accuracy of measuring spatial and angular coordinates and, as a result, reduce the safety of the aircraft.

To improve the accuracy of determining the UAV's angular orientation, integration of various types of orientation systems is used, for example, the three-axis magnetometer module, the pyrohoryzon module, and the GPS/Glonass satellite navigation system module [12]. This method of aggregation increases the accuracy of determining pitch and roll angles and eliminates errors associated with the presence of residual uncompensated magnetic interference and an error caused by the UAV's sliding angle. The linear Kalman filter calculation was inferred, the detail of how it is executed and tried was talked about. In addition, the all-encompassing Kalman filter calculation; a rendition of the straight Kalman filter which can be applied to issues in which the perception and procedure models are non-linear was broadened [13].

The purpose of this work is to analyze the known methods for measuring angular coordinates in UAV positioning systems and to develop a new phase-metric method for goniometric (angular) control of UAVs based on accelerometric transformers.

A typical FOS block diagram based on inertial sensors (micromechanical gyroscopes and accelerometers) is shown in Figure 1 [13]. The main errors of such systems are non-linearity, zero offset, and noise component.

The gyroscopic orientation system is based on integrating the signals of three gyroscopes, which are angular velocity sensors. Each of the gyroscopes measures the corresponding angular velocity  $\omega_X$ ,  $\omega_Y$ ,  $\omega_Z$ . Based on the information about these projections, the yaw angles  $\psi$ , pitch

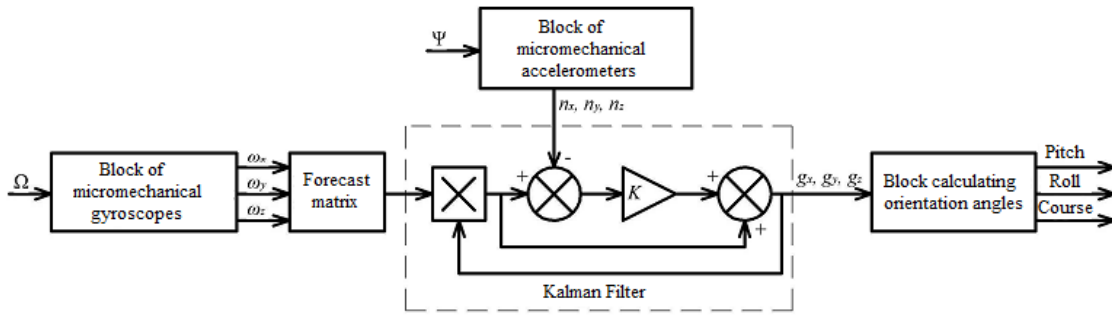


Figure 1: Typical FOS block diagram:  $\Omega$ -angular velocity of the UAV,  $\Psi$ -angular orientation of the UAV

$\omega$ , and roll  $\gamma$  can be determined based on the expressions in equation (1) [14]:

$$\begin{aligned} \psi_{k+1} &= \psi_k + T_0 \cdot \omega_{Z_k}, \\ v_{k+1} &= v_k + T_0 \cdot \omega_{X_k}, \\ \gamma_{k+1} &= \gamma_k + T_0 \cdot \omega_{Y_k}, \end{aligned} \quad (1)$$

Where  $T_0$  is the discreteness period;  $k = 0, 1, \dots$  are discrete samples.

The problem with gyroscopes when measuring UAV orientation angles is the accumulation of errors over time. This negative effect is caused by the offset of the zero obtained by pre-calibration during the flight, as well as the influence of noise.

The accelerometric orientation system is based on the measurement of accelerometer accelerations  $A_x, A_y, A_z$  (or equivalent gravity action) along the three coordinate axes  $X, Y, Z$ . Accelerometer readings are determined by projections of acceleration values on the corresponding coordinate axis:

$$\begin{aligned} A_x &= -g \cos v \sin \gamma, \\ A_y &= g \sin v, \\ A_z &= g \cos v \cos \gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

Where  $g$  is the acceleration of gravity. From the ratio in equation (2), the pitch  $v$  and roll  $\gamma$  angles of the UAV are determined with equation (3):

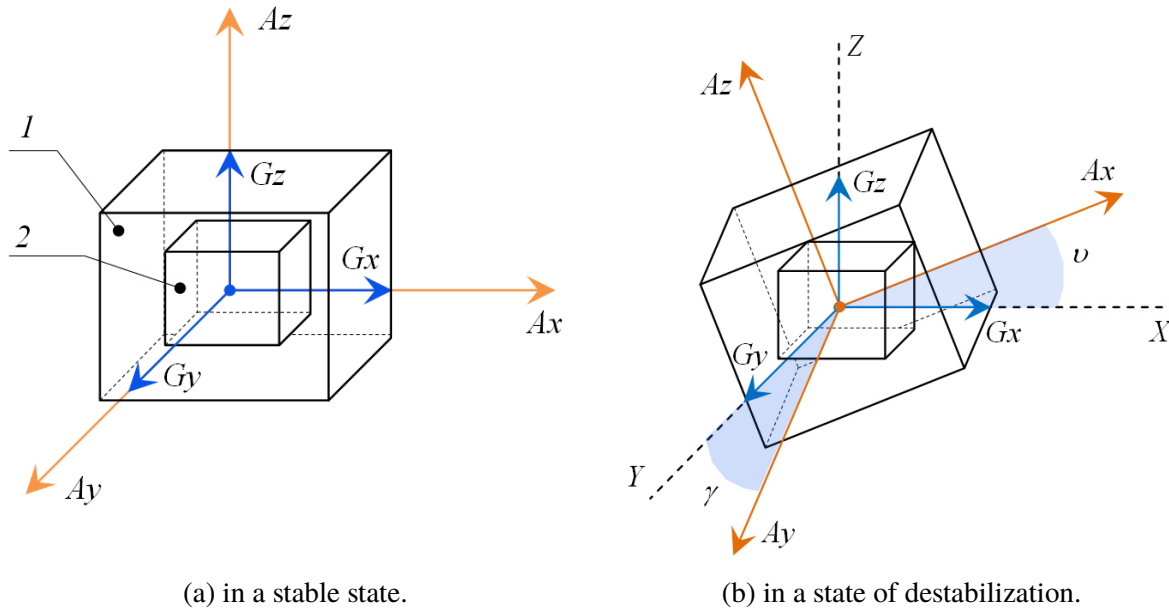
$$\begin{aligned} v &= \frac{180^\circ}{\pi} \arcsin \left( \frac{A_y}{g} \right), \\ \gamma &= -\frac{180^\circ}{\pi} \arctan \left( \frac{A_x}{A_z} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

The accelerometric system does not tend to accumulate errors and is selective to the horizon plane, but is subject to accelerated movement, and the output signal contains high-frequency noise. The error in estimating the required output parameters of the FOS (pitch, roll, yaw) can be significantly increased by using accelerometric sensors with improved characteristics as part of the micromechanical accelerometer unit.

Problems of accelerometric sensors that are significant in the problem of estimating the angular position of the UAV are [15, 16]:

- Insufficient angle measurement range for many commercially available accelerometers designed for inclinometric monitoring of buildings and structures (small deviations from the vertical need to be evaluated);
- High accuracy of accelerometers with wide measurement angles-more than 10 (for UAVs in different flight modes, it takes 30-40 degrees or more);
- Insufficient threshold sensitivity (minimum defined angle) and unacceptable measurement error of small angles less than 10 due to insufficient accuracy of arctangential transformations;
- Significant influence of temperature interference and other external destabilizing factors on the measurement error.

The combined use of gyroscopic and accelerometric measurements based on the phase-metric



1 – the symbol of the accelerometer, 2 – the symbol of the gyroscope  $A_x, A_y, A_z$  – coordinate system of the accelerometer,  $G_x, G_y, G_z$  – coordinate system of the gyro,  $XYZ$  geographic coordinate system.

Figure 2: The principle of registering the pitch angle  $\nu$  and roll angle  $\gamma$  of the UAV

method of goniometric (angular) control [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] for registering the pitch and roll angles of the UAV, as well as spatial positioning of the UAV, will compensate for the main drawbacks of the classical control methods described above, performed on the basis of expressions based on equations (1), (2) and (3). According to what was said, in the current study, it was tried to measuring angular coordinates and to develop a new phase-metric method for goniometric control of UAVS.

## 2. Proposed method

According to the proposed approach, registration of the UAV pitch angle  $\nu$  and roll angle  $\gamma$  is performed on the basis of calculating the difference in angular parameters relative to the measurements of the gyroscopic and accelerometric converters whose coordinate axes are coaxially located according to Figure 2.

During the movement of the UAV, the registered values of angular coordinates calculated on the basis of the accelerometer are balanced relative to the registered values of the gyroscope. In contrast to similar solutions for joint accelerometric and gyroscopic measurements, in this case, increasing

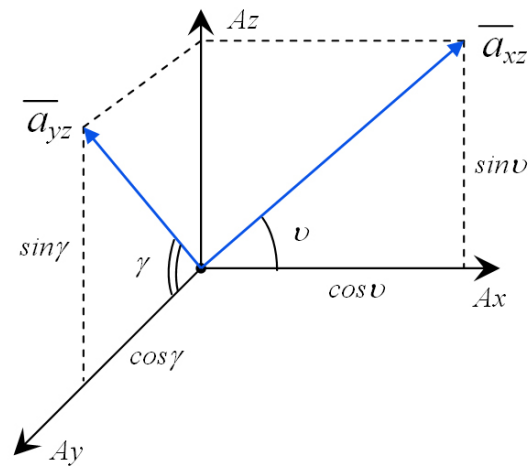


Figure 3: Phase-metric method for the computation of pitch angle  $\nu$  and roll angle  $\gamma$  of the UAV

accuracy and stability is achieved by using the phase-metric method to calculate the inclination angle of the accelerometric transformer.

According to the phase-metric method, to calculate the pitch angle  $\nu$  of the UAV and the roll angle  $\gamma$  from the registered values of the accelerometer, it is necessary to convert signals along the axes  $A_x, A_y, A_z$  into harmonic signals as is shown in Figure 3 according to equations (4), (5)

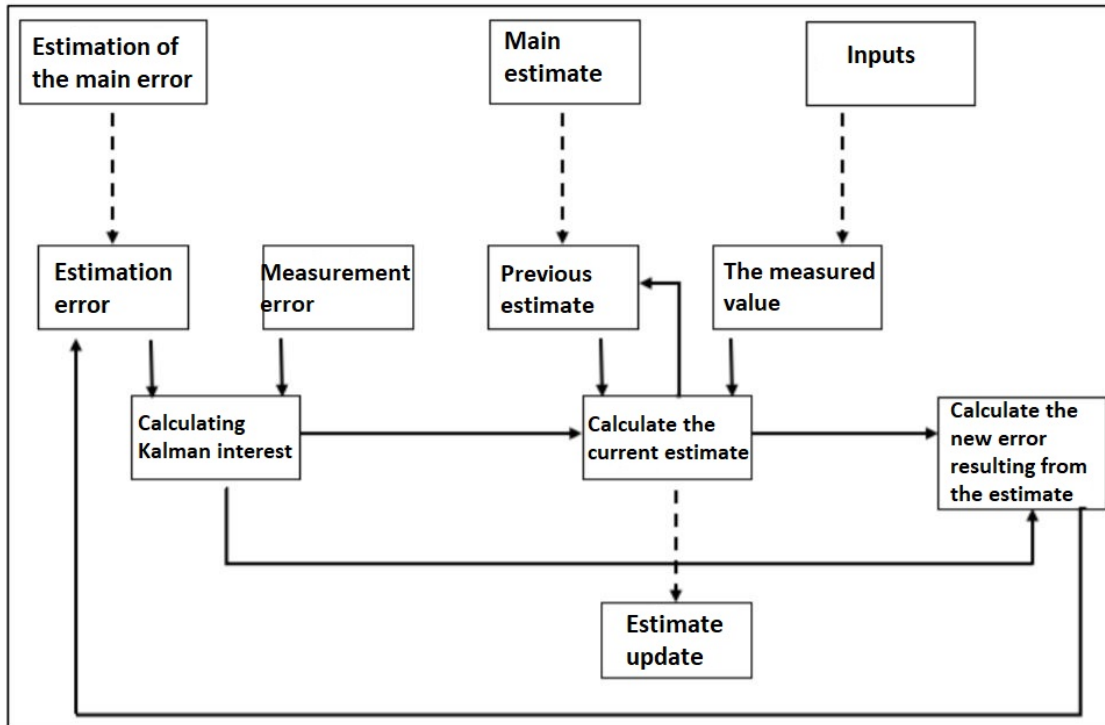


Figure 4: Diagram of Kalman filter implementation steps

and (6):

$$U_x = A_x \cdot U \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

$$U_y = A_y \cdot U \cdot \cos \omega t \quad (5)$$

$$U_z = A_z \cdot U \cdot \sin \omega t \quad (6)$$

According to trigonometric laws the pitch angle  $\nu$  and roll angle  $\gamma$  are determined based on the expressions (7) and (8):

$$U_\nu = a_x \cdot \cos \omega t + a_z \cdot \sin \omega t, \quad (7)$$

$$U_\gamma = a_y \cdot \cos \omega t + a_z \cdot \sin \omega t. \quad (8)$$

Then, after performing the conversion, the expressions for determining the pitch and roll angles  $\nu$  and  $\gamma$  are obtained by (9) and (10):

$$\begin{aligned} U_\nu &= a \cdot \sin \nu \cdot \cos \omega t + a \cdot \cos \nu \cdot \sin \omega t \\ &= a \cdot \sin (\omega t + \nu) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_\gamma &= a \cdot \sin \gamma \cdot \cos \omega t + a \cdot \cos \gamma \cdot \sin \omega t \\ &= a \cdot \sin (\omega t + \gamma) \end{aligned} \quad (10)$$

### 3. Results and discussion

At first place, we will take a closer look at the steps of the standard Kalman filter which also represents the overall view of the proposed phase-metric method. First of all, Figure 4 gives a more detailed view of the Kalman filter design process.

As a first step, how to calculate Kalman interest is shown. Kalman interest is a measure to examine the ratio between the accuracy of measurements (observations) and the accuracy of estimates. As can be seen in Figure 4, the calculation of Kalman interest is clearly visible. Based on this, Kalman's interest formula is as equation (11):

$$KG = \frac{E_{est}}{E_{est} + E_{mea}} \quad 0 < KG < 1 \quad (11)$$

Where  $KG$ ,  $E_{est}$  and  $E_{mea}$  are Kalman interest, Estimation error, and Measurement error, respectively. As the measurement accuracy decreases and the estimation accuracy increases, Kalman's interest rate approaches zero value. This indicates that the actual value is approaching. Now to be able to estimate the desired parameter at

the present time. Based on previous estimates, is obtained the equation (12):

$$E_{estt} = E_{estt-1} + KG(MEA - E_{estt-1}) \quad (12)$$

Where  $t$ ,  $MEA$  and  $E_{est}$  are time, the measured value, and the estimated value, respectively. The third basic equation of a standard Kalman filter according to the equation (13).

$$\begin{aligned} E_{estt} &= \frac{E_{mea} \cdot E_{estt-1}}{E_{mea} + E_{estt-1}} \\ &= (1 - KG)(E_{estt-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

The equation (13) are the three main equations of the Kalman filter steps. As a result, according to the three equations, we can easily run them backwards and then achieve the desired value.

The resulting angle values must be subtracted from the angle values recorded by the gyroscopic transducer. This will calculate the desired pitch and roll angles  $\nu$  and  $\gamma$ , which must be compensated for the spatial location of the UAV body using the balancing system and the control system.

The error of the results of calculating the angle of rotation based on two methods (phase-metric and using the arctangent function) was determined by comparing the calculated angle with the preset angle of rotation of the gear shaft (positioning accuracy  $0,001^\circ$ ). The rotation angle values were set to  $1^\circ$ , then from  $15^\circ$  to  $90^\circ$  in increments of  $15^\circ$ . The study showed that the standard deviation of calculation results of rotation angle via phase-metric method is 8,78 times less than a standard deviation of calculation results of rotation angle using the inverse tangent.

#### 4. Conclusions

To create effective UAV control systems, it is necessary to ensure high accuracy of the initial information about the UAV's position in space. To improve the accuracy of determining the UAV's angular orientation, various types of orientation systems are integrated. The disadvantage of this approach is the high hardware and algorithmic

complexity so the phase-metric method can be a good alternative that does not have these disadvantages. Based on the analysis of the shortcomings of the accelerometric and gyroscopic orientation system, a phase-metric method of goniometric control based on accelerometric and gyroscopic transducers for positioning UAVs is proposed.

The combined use of gyroscopic and accelerometric measurements based on the phase-metric method of goniometric (angle-measuring) control for registering the pitch and roll angles of the UAV, as well as spatial positioning of the UAV, will compensate for the main disadvantages of classical control methods performed on the basis of arctangent transformations by improving the exactness of deciding the UAV's precise direction. (insufficient angle measurement range, high error of accelerometers with wide measurement angles, insufficient threshold sensitivity, significant influence of temperature interference and other external destabilizing factors on the measurement error).

The study showed that in a wide range of rotation angles from  $10$  to  $90^\circ$ , the results of calculating the rotation angle using the phase-metric method are 8,78 times less than the results of calculating the rotation angle using the arctangent function. Reducing the error determines the effectiveness of the proposed method in UAV control systems.

#### 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 as part of the implementation 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".



## 5. References

- [1] D. Werner, “Drone Swarm: Networks of Small UAVs Offer Big Capabilities,” Consortium for Robotics and Unmanned Systems Education and Research, Technical report, 2013.
- [2] A. Tewari, “Advanced control of aircraft, spacecraft and rockets ,” in *Aerospace series*, I. Moir, A. Seabridge, and R. Langton, Eds. John Wiley&Sons, 2011, vol. 37.
- [3] H. Shorakaei, M. Vahdani, B. Imani, and A. Gholami, “Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm,” *Robotica*, 2016.
- [4] K. Park and R. Ewing, “The usability of unmanned aerial vehicles (UAVs) for measuring park-based physical activity,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 167, pp. 157–164, 2017.
- [5] I. Caragiannis, C. Kaklamanis, E. Kranakis, D. Krizanc, and A. Wiese, “Communication in wireless networks with directional antennas,” in *Proceedings of the twentieth annual symposium on Parallelism in algorithms and architectures*, Munich, Germany, 2008.
- [6] S. Temel and I. Bekmezci, “LODMAC: Location oriented directional MAC protocol for FANETs,” *Computer Networks*, vol. 83, pp. 76–84, 2015.
- [7] A. I. Alshabtat, L. Dong, J. Li, and F. Yang, “Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 48–54, 2010.
- [8] D. Dwivedi, G. S. Priyanka, G. S. Brindha, and G. E. Visuvunathan, “Unmanned aerial vehicle (UAV) safety system using Android app,” *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 3, no. 3, pp. 272–279, 2015.
- [9] V. V. Koryanov, T. V. Kokuytseva, A. G. Toporkov, S. N. Iljukhin, N. Mohamado, and V. Da-Poian, “Concept development of control system for perspective unmanned aerial vehicles,” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 151. EDP Sciences, 2018, p. 04010.
- [10] C. Paz, S. Nesmachnow, and J. H. Toloza, “A Parallel Multilevel Data Decomposition Algorithm for Orientation Estimation of Unmanned Aerial Vehicles,” in *Latin American High Performance Computing Conference*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 206–220.
- [11] A. V. Ladonkin and M. N. Mashnin, “Automated system for determining and correcting the autopilot coefficients of an unmanned aerial vehicle,” in *Proceedings of the Tula state University. Technical Sciences*, 2011, pp. 66–71.
- [12] I. V. Prokopiev and A. V. Betskov, “Structure of the control system for special-purpose unmanned aerial vehicles,” in *Proceedings Of the international Symposium "Reliability and quality"*, 2012, pp. 84–85.
- [13] H. Durrant-Whyte, *Introduction to Estimation and the Kalman Filter*. Australia: Australian Centre for Field Robotics, The University of Sydney, 2001.
- [14] V. V. Matveev and M. G. Pogorelov, “Autopilot of an unmanned aerial vehicle based on a smartphone,” in *Proceedings of the Tula state University. Technical Sciences*, 2015, pp. 136–148.
- [15] J. Doscher, “Accelerometer Design and Applications,” Analog Devices, Tech. Rep., 2008.
- [16] C. J. Fisher, “Using an Accelerometer for Inclination Sensing,” Analog Devices, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., Application Note AN–1057, 2010.
- [17] R. Mukherjee, J. Basu, P. Mandal, and P. K. Guha, “A review of micromachined thermal accelerometers,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 27, no. 12, p. 123002., 2017.
- [18] T. A. V. Walsum, A. Perna, C. M. Bishop, C. P. Murn, P. M. Collins, R. P. Wilson, and L. G. Halsey, “Exploring the relationship between flapping behaviour and accelerometer signal during ascending flight, and a new approach to calibration,” *International journal of avian science*, vol. 162, no. 1, pp. 13–26, 2019.
- [19] M. Andrejašič, “MEMS ACCELEROMETERS,” in *University of Ljubljana, Faculty for mathematics and physics, Department of physics Seminar*, 2008, pp. 1–17.
- [20] A. Grecheneva, N. Dorofeev, and O. Kuzichkin, “Analysis of mistakes and errors application of the accelerometric phase method of biomechanical control,” in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, vol. 1, 2016, pp. 383–390.
- [21] A. Grecheneva, I. Konstantinov, and O. Kuzichkin, “The structure of the information system to support the goniometric accelerometric control of human biomechanics,” in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, vol. 1, 2016, pp. 829–836.
- [22] A. V. Grecheneva, “Phase-metric method using a goniometer control on the basis of accelerometric transducers,” PhD Thesis, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia, 2019.
- [23] A. V. Grecheneva, O. R. Kuzichkin, N. V. Dorofeev, and I. S. Konstantinov, “Application of accelerometric sensors in measuring goniometric systems,” *Information systems and technologies*, vol. 4, no. 90, pp. 5–10, 2015.

# Suspension system design for a vehicle under BAJA SAE parameters

Omar Franco-Camacho <sup>\*,a</sup> , María Mago-Ramos <sup>a</sup> , Ricardo Ríos <sup>a</sup> ,  
Luis Vallés-Defendine <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Maintenance Research Line, Faculty of Engineering, Universidad Libre, Mechanics Program, Bogota, Colombia.

<sup>b</sup>Faculty of Engineering, Universidad de Carabobo, Mechanics Program, Valencia, Venezuela.

**Abstract.-** This research focuses his study on the design of a suspension system for a BAJA SAE vehicle under the PARAMETERS SAE (Society of Automotive Engineers). This society organizes seventeen (17) student competitions in eight (8) design series between university students called as Collegiate Design Competitions and Collegiate Design Contests, which is included representative themes that apply to vehicles Formula SAE, Formula Hybrid, SAE Aero Design, BAJA SAE, and SAE Clean Snowmobile Challenge. This research article evaluates the types of suspension that are implemented in mini-baja vehicles, and which, in turn, complies with the regulations established by the SAE competition of the year 2020. The methodology used from the mechanical engineering and control design components, use mathematical equations that govern dynamic movement to evaluate the behavior of the suspension system that through a CAD system, achieves modeling in a real environment, evaluating factors such as material, part dimensions or system selection, which can affect its proper functioning. This research is intended to support future applications, where there are suspension systems that allow to absorb the irregularities of the terrain with loads, where it is transmitted in less proportion according to the structure of the vehicle improving the experience of handling and maneuverability required for this type of student competitions, meeting the parameters established by SAE.

**Keywords:** design; suspension system; mini-baja vehicle; SAE parameters.

## Diseño del sistema de suspensión para vehículo de acuerdo con parámetros BAJA SAE

**Resumen.-** Esta investigación centra su estudio en el diseño de un sistema de suspensión para un vehículo BAJA SAE bajo los Parámetros SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices). Esta sociedad organiza diecisiete (17) concursos de estudiantes en ocho (8) series de diseño entre estudiantes universitarios denominados Competencias de Diseño Colegiado y Concursos de Diseño Colegiado, que incluyen temas representativos que se aplican a los vehículos Fórmula SAE, Fórmula Híbrida, SAE Aero Diseño, BAJA SAE, y SAE Clean Snowmobile Challenge. Este artículo de investigación evalúa los tipos de suspensión que se implementan en los vehículos mini-baja, y que, a su vez, cumplen con la normativa establecida por el concurso SAE del año 2020. La metodología utilizada a partir de los componentes de ingeniería mecánica y diseño de control, utiliza ecuaciones matemáticas que gobiernan el movimiento dinámico para evaluar el comportamiento del sistema de suspensión que a través de un sistema CAD, logra el modelado en un entorno real, evaluando factores como material, dimensiones de la pieza o selección del sistema, que pueden afectar su correcto funcionamiento. Esta investigación tiene como objetivo dar soporte a futuras aplicaciones, donde existan sistemas de suspensión que permitan absorber las irregularidades del terreno con cargas, donde se transmita en menor proporción según la estructura del vehículo mejorando la experiencia de manejo y maniobrabilidad requerida para ello, mejorando las competencias de los estudiantes, cumpliendo los parámetros establecidos por la SAE.

**Palabras clave:** diseño; sistema de suspensión; vehículo Mini Baja; parámetros SAE.

Received: October 28, 2020.

Accepted: November 27, 2020.

### 1. Introduction

The manufacture of BAJA SAE vehicles today is carried out in different universities as a degree option, in order to compete in the SAE Design Series<sup>®</sup> under different modalities, where it is innovated from mechanical engineering

\* Correspondence author:

e-mail:omara-franroc@unilibre.edu.co (O. Franco-Camacho)

exchanging knowledge and experiences to expand the professional vision of the student.

In this order of ideas, this research adjusts its contribution in the line of maintenance research, supporting the processes and competencies that the student of the Mechanical Engineering Program of the Free University can develop for the sectors of the automotive area, in terms of design applications of these baja SAE vehicles is concerned, deepening knowledge and applications in a practical way. Likewise, a mathematical analysis is used in the modeling of the parts that constitute said automobile, its correct simulation provides information to the student and/or technical staff interested in these areas of knowledge, of an optimal performance that manages to adapt the vehicle to the regulations of the competition for the year 2020 and obtaining the control and safety required, which will allow to occupy a relevant position in this type of competitions [1, 2].

Based on the above, this research is expected to show the design parameters required by the suspension system of the V1.0 BAJA SAE vehicle, under the expertise of the mechanical engineering student, in order to achieve a reduction in the weight of the suspension system and decrease the efforts caused by the loads in the supports generated by the irregularities of the terrain, as well as a linkage of the theoretical components and applications required by the automotive sectors in real way [3, 4].

## 2. Methodology

For the elaboration of the required suspension system, it was chosen to perform a simulation with ANSYS, for a correct selection of the latter, taking into account the critical variables to analyze, in addition, Matlab's Simulink was used to obtain a dynamic behavior of the vibrations produced by the ground, through a graphical programming environment to model, simulate and analyze dynamic systems that have multidomain [5, 6, 7]. This research features simulated analysis of failures and behaviors in controlled environments, by implementing these software programs better performance in real applications such as the SAE

competition. The suspension system models are correlated in such a way that a dynamic model is simulated according to irregularities of the terrain through an analysis of the stationary system and its calculated maximum load, where the manufacturer's data that has been selected in the design proposal is corroborated and then make design improvements adapted to the market [8, 9].

### 2.1. Compression spring or springs

This research makes use of a series of springs that follow the shock to withstand the stresses produced by the irregularities of the terrain, providing greater stability, passenger comfort, aid to the recoil of the shock at the time of the shock, decreasing the pressure exerted in this, so a coil spring of compression is used (The helical spring is the most widely used on the market nationally in Colombia for general use in valves, greasers and shock absorbers) [10]. There are cylindrical, conical, bionic and stamping coil compression springs, however, a cylindrical helical spring will be used, as this represents better attributes because it withstands lower tension than the other types of springs, so it distributes the loads evenly throughout it [11, 12, 13].

### 2.2. Spring materials

The springs are manufactured by cold or hot procedures, depending on the size of the material, the spring index and the desired properties, often during the manufacture of springs, they are relieved, after rolling, by means of moderate heat treatment according Table 1.

A compression helical spring with an original free length closes completely and returns to a reduced value. The process of inducing a permanent deformation is used by spring manufacturers to meet a free length specification or to reinforce the spring, this process is called  $L_o$  "deformation removal" [15, 16].

In that order of ideas, a coil spring used in the suspension of the mini-baja vehicle has elastic properties and good toughness, to absorb the shock between the surface and the chassis of the vehicle, for this reason, materials such as 6150 H tempered

Table 1: Carbon and spring alloy steels [14]

Piano Wire, 0.80-0.95C	UNS G10850	The most tenacious and employed
	AISI 1085	Increased stress resistance
	ASTM A228-51	Increased efforts at repeated loads
Oil-hardened wire, 0.60-0.70C	UNG G10650	Diameters from 0,12 to 3 mm
	AISI 1065	It is for general use
	ASTM 229-41	It's cheaper than piano wire
Hard drawn wire, 0.60-0.70C		Not suitable for shock or impact loads
		Diameters from 3 to 12 mm
	UNS G 10660	General and cheaper use
Chromium vanadium	AISI 1066	It should only be used where duration, accuracy and deflection are not important
	ASTM A227-47	Diameters 0.8 to 12 mm
	UNS G61500	Popular alloy for springs that involve greater stresses than those that employ carbon steel and requires fatigue resistance and high durability.
Silicon chromium	AISI 6150	Used for shock or impact loads
	ASTM 231-41	Diameters 0.8 to 12 mm
	UNS G92540	It is an excellent material alloy for springs subjected to high stresses and impact loads that require long life
	AISI 9254	Diameters 0.8 to 12 mm

steel trefiled wires, cooleds in oil, annelids, with a diameter of 9 mm [17, 18, 19].

### 2.3. Helical spring design

Due to the value of the equipment required by the suspension systems, the properties of the materials, the necessary parametric relationships, their adequacy assessment in terms of weight reduction, increase of the safety factor and design, which is necessary to take into account the maximum stresses, curvature effects, deflection-force ratios, tensile and compression efforts, as indicated in the following equations.

Where; the maximum stress of the wire is calculated by overlaying equations (equation (1)).

$$\tau_{\text{máx}} = \pm \frac{T_r}{J} + \frac{F}{A} \quad (1)$$

$\tau_{\text{máx}} = \frac{T \cdot \rho}{J}$ . It is the formula of the maximum torque (in order to calculate the particular effort).

$\frac{F}{A}$ : is direct shear stress (not bending).

But it is necessary to calculate the spring index as follows in equation (2), and the constant stress factor in equation (3).

$$C = \frac{D}{d} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{2C + 1}{2C} \quad (3)$$

Torque may be measured by a measure of the spiral curvature (which also determines the larger shear stress), as indicated in equation (4).

$$\tau = K_s = \frac{8FD}{\pi D^3} \quad (4)$$

In addition, the curvature correction factor increases the stress inside the spring, but only decreases a little on the outside, which is important for fatigue, even if there is no stress concentration factor as indicated in equation (5).

$$K_C = \frac{K_B}{K_S} = \frac{2C(4C + 2)}{(4C - 3)(2C + 1)} \quad (5)$$

The deflections of coil springs have a deflection-force ratio obtained by the Castigliano theorem, where the total corresponding deformation energy is shown in equation (6).

$$U = \frac{T^2}{2GJ} + \frac{F^2 l}{2AG} \quad (6)$$

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3}{d^4G} \left( 1 + \frac{1}{2C^2} \right) \approx \frac{8FD^3 N}{d^4G}$$

where the spring ratio is therefore;

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (7)$$

Extension springs must have means to transfer the load from the spring to the spring body, the stress increase factors are given by equation (8), as indicated (The *C* index is in Table 1).

$$(K)_A = \frac{4C^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)}; C_1 = \frac{2r_1}{d} \quad (8)$$

Table 2: Preferred range of torsional stresses due to initial stress, in steel extension coil springs [20]

Index (C)	Stress Interval (MPa)	Stress interval (kpsi)
4	115-183	16,7-26,6
6	95-160	13,8-23,2
8	82-127	11,9-18,4
10	60-106	8,71-15,4
12	48-86	6,97-12,5
14	37-60	5,37-8,71
16	25-50	3,63-7,26

Compression springs have four types of ends: simple type on the right, end to square and frosted on the left, end-to-square or closed right and simple end and frosted on the left, being necessary for the calculation of the dimensions of these springs review Table 3.

#### 2.4. Stability

A column will suffer buckling when the load is very high, so the coil springs will have a lateral deflection (roll) when it is very large, taking into account that the critical deflection is given by equation (9).

$$y_{cr} = L_o C'_1 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{C'_2}{\lambda_{efec}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (9)$$

Where;

$y_{cr}$ : deflection corresponding to the onset of instability.

$\lambda_{efec}$ : effective slenderness ratio.

$C'_1$  y  $C'_2$ : elastic constants.

$L_o$ : absolute stability.

#### 2.5. Description of the structure

The structure used in this research is a shock absorber whose spring is SAE 6150 H steel (Figure 1) with the addition of vanadium that allows to inhibit the growth of the grain at high temperatures, improve the strength and toughness of the spring, in order to have high degrees of elasticity (Table 3), also, the 6150 H steel has the material components indicated in Table 4 and 5. This suspension system has the dimensions required for the perfect coupling to the vehicle [21, 22, 23].

### 3. CAD modeling and simulation for dynamic analysis

For the analysis of behavior of static suspension system as shown in Figure 1, the shock absorber subjected to a load was modeled and simulated with the ANSYS software. On the other hand, for the analysis of structure dynamic behavior, the system was modeled and simulated with ANSYS, SolidWorks and Matlab. All these software apply the finite element analysis technique to predict how the system will work and react in a real environment, allowing to evaluate the performance of the system before the manufacturing process. Now, the mathematical model for static analysis follows equation (10) [24, 25].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE} \quad (10)$$

Where it is evident, that the unitary elongation experienced by the spring is directly proportional to the force applied on it. Using for this case the mathematical model shown in equation (11) of the Law of *Hooke*, which relates the force exerted by the spring to the elongation ( $x$ ) provoked by the external force ( $F$ ) applied to the end of this, as follows according to (11).

$$F = -k \cdot x \quad (11)$$

The suspension has its critical point at the time the vehicle jumps and its weight falls on both wheels, so a dynamic analysis is performed with a 45-degree lifting angle as seen in Figure 2.

Table 3: Formulas for calculating compression spring dimensions [20]

Term	Simple	Simple and frosted	Squared and closed	Squad and frosted
Extreme coils	0	1	2	2
Total spire	$N_{to}$	$N_{to} + 1$	$N_{to} + 2$	$N_{to} + 2$
Free length	$p \cdot N_{to} + d$	$p \cdot N_{to} + 1$	$p \cdot N_{to} + 3d$	$p \cdot N_{to} + 2d$
Solid length	$d(N_1 + 1)$	$dN_1$	$d(N_1 + 1)$	$dN_1$
Step	$(L_o - d)/N_a$	$L_o/(N_{to} + 1)$	$(L_o - 3d)/N_{to}$	$(L_o - 2d)/N_a$



Figure 1: JLMoto brand suspension system dimensioning reference 3100026. Source: JI motor official store, <https://bit.ly/3p66Gxi>

Table 4: Steel elements SAE 6150 H

Element	Content %
Iron, faith	96,885 – 97,88
Manganese, Mn	0,60 – 1
Chromium, Cr	0,75 – 1,2
Silicon, Yes	0,15 – 0,30
Vanadio, V	0,15
Sulfur, S	0,040
Phosphorus, P	0,035

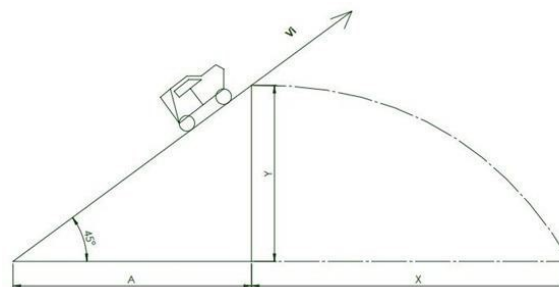


Figure 2: Critical load model scheme

Table 5: Good properties of steel SAE 6150 H

Property	International System
Tensile strength	924 MPa
Elastic limit	800 MPa
Elasticity module	205 GPa
Volume module	140 GPa
Cutting module	80 GPa
Poisson coefficient	0,29
Elongation to breakage	19,50 %
Brinell hardness	269
Rockwell B hardness	99
Rockwell C hardness	27
Machinability	55 %

in a given flight time is then calculated. In that sense, according to the model presented in Figure 2, the following characteristic parameters can be estimated.

The Final speed is calculated by equation (12).

$$V_f = V_i \cos 45(i) + V_i \sin 45 - gt(j) \quad (12)$$

when:  $g$ : gravity, [m/s<sup>2</sup>]

$t$ : time, [s].

$V_i$ : initial velocity, [m/s].  $V_i = 13,88$  m/s

$\tan 45^\circ$ :  $Y/A$

$y$ : vertical component, [m].

The speed at which the vehicle hits the ground

A: horizontal component, [m].

Distance A-1 m.

The Horizontal distance reached, known as X value (m), was calculated by equation (13).

$$Y = \frac{(\tan 45^\circ)X - (gX^2)}{2V_i^2 \cos(45^\circ) + 1} \quad (13)$$

By developing the quadratic equation, you get:

$$\begin{aligned} 1 &= X - 0.050X^2 \\ 0.050X^2 - X + 1 &= 0 \\ X_1 &= 2 \text{ m}; X_2 = 18 \text{ m} \end{aligned}$$

Where  $X^2$  is the distance taken for the following calculations, because it is the vertical component.

To determine the Flight time it was used equation (14).

$$t = \frac{x}{V_i \cos 45^\circ} \quad (14)$$

It is necessary to know and work with the vertical component, as it corresponds to the force with which the vehicle will exert a compression load on the suspension system.

Final velocity component  $Y$  [m/s] was estimated by equation (15), as follows.

$$V_{fy} = (V_i \sin 45^\circ - gt)j \quad (15)$$

At the same time, the Average strength [N] was calculated by equation (16), as follows.

$$F_{\text{prom}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (16)$$

$$\Delta p = mV_f - mV_i$$

$\Delta t$ : time delta [s].  $\Delta t = 0.5$  s

To Suspension system calculations, it was considered  $m = 265$  kg with approximately 70 kg rider. In that sense, taking as start point equation (17), the force can be calculated.

$$F = m \cdot a \quad (17)$$

$a$ : Acceleration, [m/s<sup>2</sup>].

$m$ : mass of a rider, [kg].

$$F = 265 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 2599,65 \text{ N}$$

Spring calculations are based in equation (18).

$$F = kx \quad (18)$$

$k$ : spring constant, [kg/s<sup>2</sup>].

$x$ : variation in length, [m].

$$k = \frac{2599,65 \text{ N}}{0,05 \text{ m}} = 51993 \text{ kg/s}^2$$

According to the manufacturer's data, the spring distance is 207 mm and the distance of the compressed spring is 70 mm

$$F = 51993 \text{ kg/s}^2 \cdot 0,137 = 7123,041 \text{ N}$$

In this way, you have a compression coil spring made of Chromium-vanadium number 17, whose outer diameter is inches and the ends are flat and frosted  $\frac{7}{16}$  inches with a total turn  $10\frac{1}{2}$ .

To estimate Creep effort are used equations (19) and (20).

$$s_{ut} = \frac{A}{d^m} = \frac{169}{0.039^{0.168}} = 291 \text{ kpsi} \quad (19)$$

$$s_{sy} = 0.45 \cdot s_{ut} = 0.45(291) = 131 \text{ kpsi} \quad (20)$$

To determine the static load according to creep effort, it is considered that the medium diameter of the spring coil is  $\frac{7}{16} = 0,400$  inches. So, parameters  $C$ ,  $K_B$  and  $F$  are calculated by equations (21), (22) y (23)

$$C = \frac{0,400}{0,039} = 10,3 \quad (21)$$

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} = 1,131 \quad (22)$$

$$F = \frac{\pi d^3 s_{sy}}{8K_B D} = \frac{\pi(0,039)^3 \cdot 131(10^3)}{8(1,131) \cdot 0,400} \quad (23)$$

$$F = 6,75 \text{ lbf}$$

where

$C$ : Spring index, [m].

$K_B$ : Bergtrosser's factor.

$F$ : Cutting force, [lbf].

To determine the spring scale is used equation (8), obtaining  $k$  factor

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} = \frac{(0,039)^4(11.2)10^6}{8(0,400)^3(9,5)}$$

$$k = 5,33 \text{ lbf/pulg}$$

In that sense, deflection caused by shear force is calculated by equation (24)

$$y = \frac{F}{k} = \frac{6,75 \text{ lbf}}{5,33 \text{ lbf/pulg}} = 1,26 \text{ pulg} \quad (24)$$

So, the solid spring length is estimated by equation (25)

$$L_s = d \cdot N_t \quad (25)$$

$$L_s = (0.039)(10.5)$$

$$L_s = 0.400 \text{ pulg}$$

Equations (26) allows to estimate the free length ( $L_o$ ) as follows

$$L_o = y + L_s = 1,26 + 0,400 = 1,66 \text{ pulg} \quad (26)$$

$L_o$ : [pulg].

To verify the absolute stability to prevent buckling, it is necessary the accomplish of condition:

$$L_o \leq 2,63 \frac{D}{\alpha} \leq 2,63 \frac{0,400}{0,5} \leq 2,10 \text{ pulg}$$

Because the free length is less than 2,10 inches; a buckling in the spring may not occur, however, a rod inside it may be necessary, resulting in the use of the shock as a mechanical aid component in the system [26, 27].

Finally, the step between coils is calculated by equation(27)

$$p = \frac{L_o}{N_a + 1} = \frac{1,66}{9,5 + 1} = 0,158 \text{ pulg} \quad (27)$$

In the Table 6 is presented a resume of the parameters estimated by the application of the models mentioned.

Table 6: Results given after the application of the models

Horizontal distance reached, [m]	$X_1 = 2$ $X_2 = 18$
Flight Time ( $t$ ), [s]	1,83
Final velocity component Y ( $V_{fy}$ ), [m/s]	-8,14
Average strength ( $F_{promY}$ ), [N]	4314,2
Spring force ( $F$ ), [N]	2599,65
Spring constant ( $k$ ), [kg/s <sup>2</sup> ]	51993
Hooke's law ( $F$ ), [N]	7123,041
Static load force ( $F$ ), [N]	30,0255
Spring scale ( $k$ ), [N/m]	933,46
Deflection ( $y$ ), [m]	0,032
Solid spring length ( $L_s$ ), [m]	0,010
Free length ( $L_o$ ), [m]	0,053

#### 4. Simulation for shock analysis

In accordance with the design of the suspension system previously performed, a simulation is carried out using the Matlab Simulink Program, in order to observe the behavior under established parameters, thus the expected result is to reduce costs and time in the manufacture of these systems in the automotive industry. The results obtained are of interest, when evaluating the time of restoration of the system from the starting point and the on peaks that can reach when generating the crash, with the irregularities of the terrain, based on free models [1].

The above makes it necessary to raise the system state equations, having as a parameter the acceleration a time range. As the system is purely mechanical, it does not have an electrical part, so Newton's second law is used to determine the model of the state equation as noted below (Figure 3) [28, 29].

$$\sum F_i = F_t$$

$$m\ddot{x} + k[x - y] + c[\dot{x} - \dot{y}] = 0$$

$$m\ddot{y} = k[y - x] + c[\dot{y} - \dot{x}] = 0$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[k[y - x] + c[\dot{y} - \dot{x}]]$$

where:

$\ddot{x}$ : acceleration of the system, [m/s<sup>2</sup>].



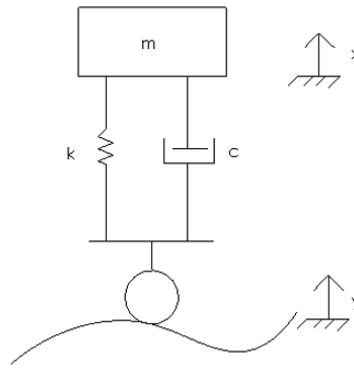


Figure 3: free body diagram of suspension system

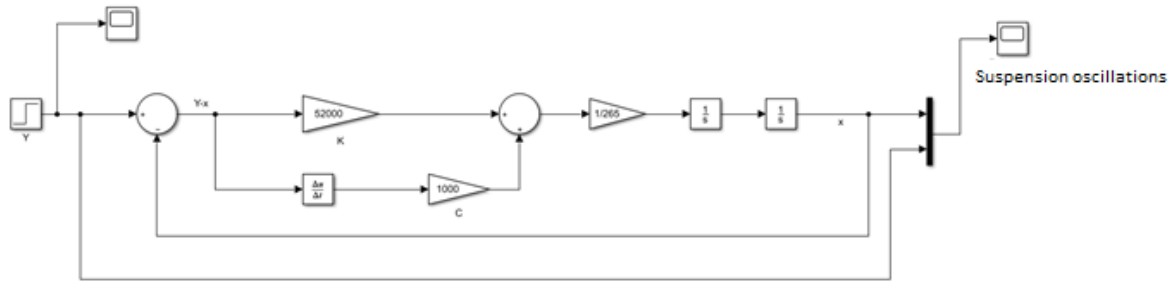


Figure 4: Control model for dynamic study of the suspension system

- $\dot{x}$ : speed of the system, [m/s].
- $x$ : system displacement, [m].
- $\dot{y}$ : wheel speed, [m/s].
- $y$ : wheel displacement, [m].
- $m$ : mass, [kg].  $m = 256$  kg
- $k$ : spring constant, [N/m].  $k = 52000$  N/m
- $c$ : Viscous coefficient of friction, [N·s/m].
- $c = 1000$  N · s/m

The Figure 4 shows the diagram of the implemented control and how it shows the oscillation of vibrations in the system over time. Obtaining from the previous model, a peak envelope of three (03) centimeters of deformation when taking a system input disturbance of two (02) centimeters as the initial value to which you want to reach, once the suspension, into contact with their regularities of the terrain. It is also observed that the system has a one-second signal start time as part of the system behavior with a stabilization time

of approximately four seconds until the required control signal is reached (Figures 4 and 5).

It can be verified that the suspension system properly absorbs the irregularities of the terrain in a time of 4 seconds to maintain stability and comfort in the driver. Likewise, you can control the number of oscillations that this can have by varying the spring constant and damping, as well as the value of the system peak is of paramount importance since by absorbing so much energy, this value of 75 % is linked to the establishment time and the energy that is has to stabilize the system. However, by having a lower vibration in the suspension system, it transmits greater kinetic energy to the body. Therefore, affecting the driving experience, so this type of suspension meets the optimal parameters for the correct power dissipation at right times [30].

This research requires the use of the CAD program like ANSYS 2020 for the corresponding simulation of the suspension system, incorporating

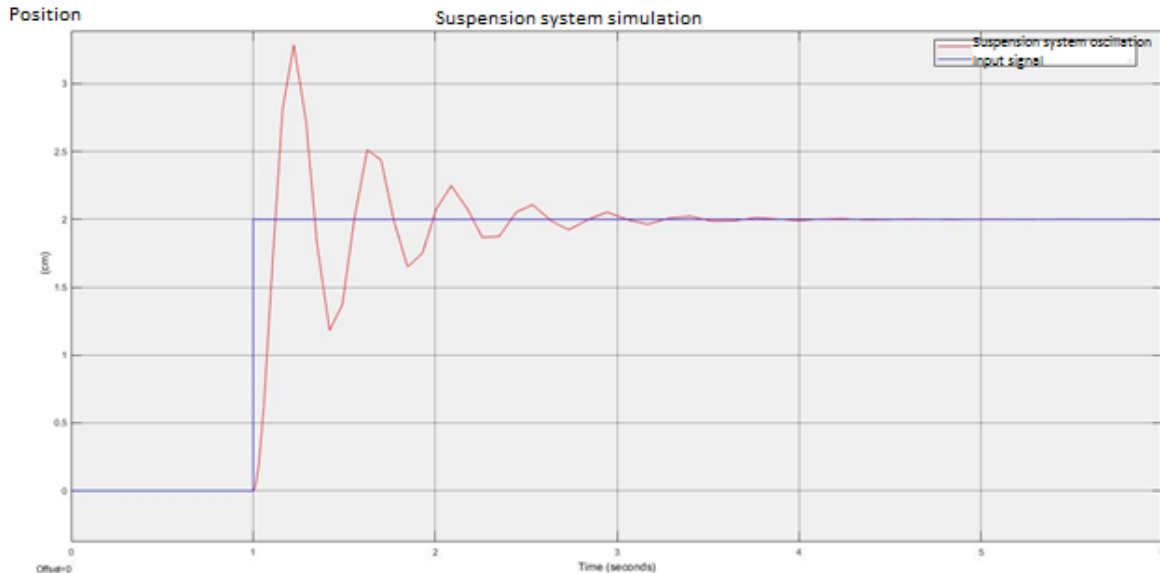


Figure 5: Suspension system oscillations under set parameters

the mesh of the suspension system and reaching the verification of the quality of the element through the mesh quality presentation offered by the ANSYS student community where a quality of the skewness metric parameter evidenced for 0,40063 which refers to a very good quality and an orthogonal quality parameter corresponding to 0,7329; significant of an equally very good quality as referred the theory evidenced below (Figure 6).

As stated above, we proceed to perform the test in which the system suspended has two rolling brackets and a maximum force, which was previously calculated at the top end of this, since it is the part that is fixed to the chassis of the vehicle and transmits the loads, Figure 7. Likewise, a mesh sizing is made which becomes thinner on the stem and spring of the damping since they are the areas of interest in deformation stresses.

By implementing the ANSYS 2020 R1 program, it is possible to generate a meshing of the suspension system with an applied force calculated in equation (12). Performing a rounding approximation of 7200 N and its due movement restrictions on the lower pin supports a stop. Having said the above, we proceed to a suspension system solution in which a focus is made on total

deformation, the equivalent elastic deformation of von-Mises, and the equivalent effort of von-Mises Table 5. According to the data provided by this simulation, it is observed that the suspension stem suffers the highest efforts and elastic limits, so that it could result in future defects or discontinuities due to fatigue or external loads in this. Likewise, a focus is made on this last effort as it is the one that gives us the information necessary to have an understanding of the maximum value in MPa and understand if the material fails with respect to the properties said in Figure 8 for this suspension system with SAE 6150 H steel.

According to the data obtained in figure 8, a topological analysis study is carried out in order to obtain a reduction in efforts and to be able to opt for another type of shock which generates greater reliability in both performance parameters and compliance with the regulations of the regulations of Baja SAE Design. Having said that, this study is generated in such a way that the restrictions are assigned Figure 8. Optimization such as the bottom bracket and shock spring as you do not want to delete or reduce material from these areas as they would affect the operation of the system for malfunction (Figure 9) [31].

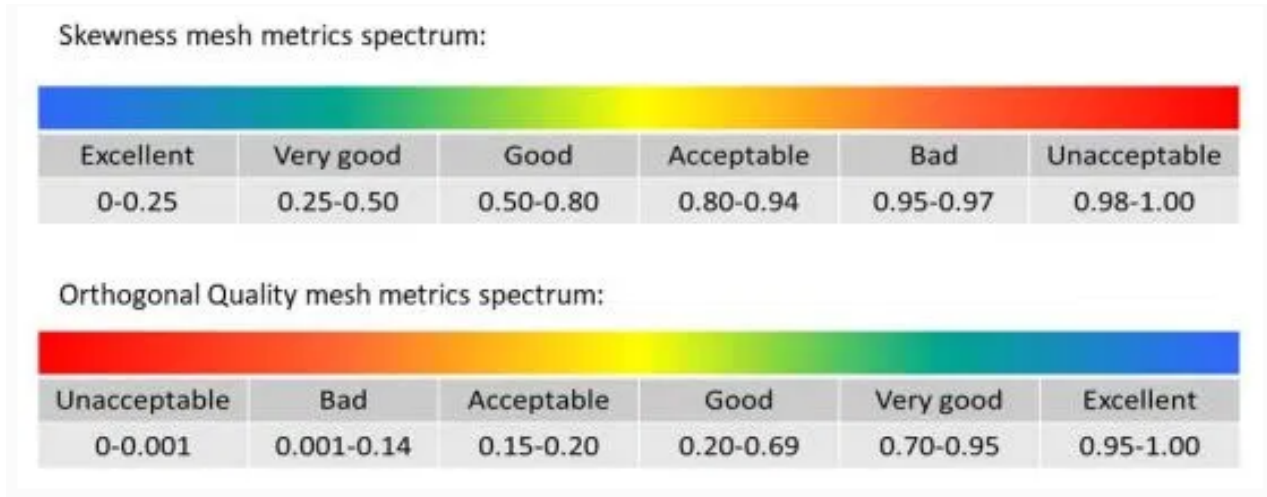


Figure 6: ANSYS mesh quality

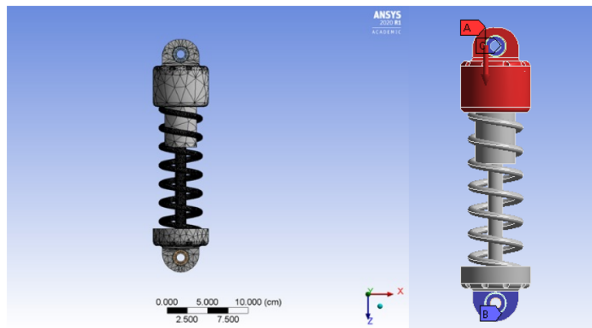
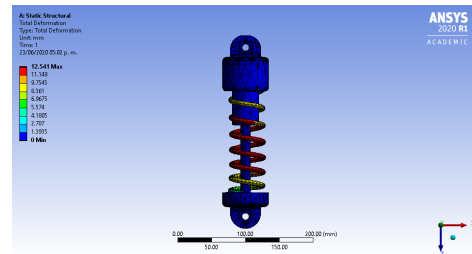


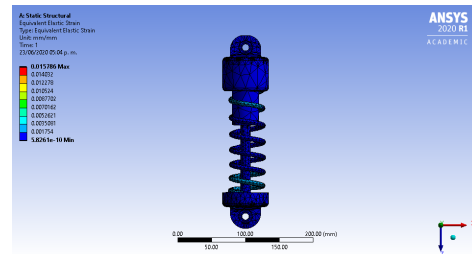
Figure 7: Meshing, Loads and structural supports applied to the suspension system

Once optimization is implemented, it is observed that there are areas such as the lower head that can be reduced by positively affecting the system and evidence that an extension of the diameter can be generated in the stem head. For the above, modifications are made to the Cad SolidWorks so that the shank diameter is extended, the diameter of the shock is enlarged, and the size of the lower head is reduced as seen in Figure 10.

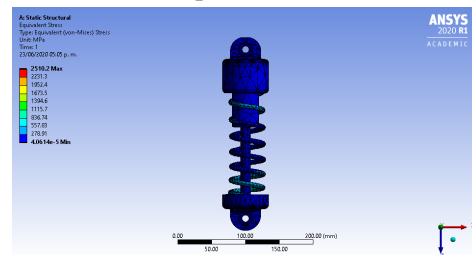
This variation in shock dimensions represents changes in maximum stress at the time of application of the same 7200 N load provided in the kinematic study of the maximum load received by the shock in a given instant of time. In this way a second static load study is carried out using the CAD program ANSYS 2020R1 in which variations are observed in terms of all stress values and deformations, resulting in a 5,34% decrease in the



(a) Total deformation



(b) vonVon-Mises equivalent elastic deformation



(c) vonVon-Mises' equivalent effort

Figure 8: Results for simulation in suspension system

shock mass and reduction an equivalent effort being now 662,42 MPa. According to the properties of the material SAE 6150 H in Table 4. Its elastic limit

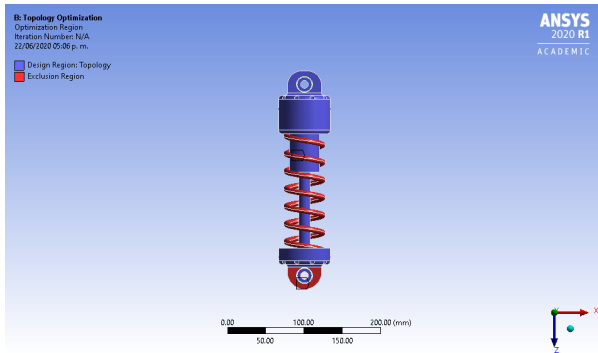
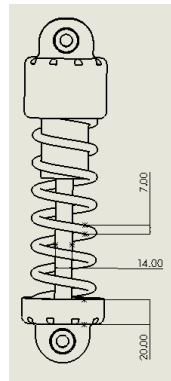
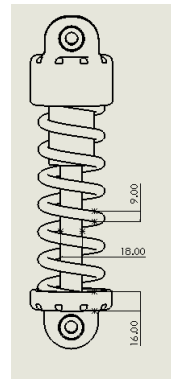


Figure 9: Areas to exclude in topological optimization



(a) Shock absorber JLMotor 250mm without topologically optimizing (mm)



(b) Topologically optimized JLMotor 250mm shock absorber (mm)

Figure 10: JLMotor 250 mm buffer design modifications

is 800 MPa which represents that such topological study and modification of the suspension geometry helps to reduce the failure in the elastic area of the material that could occur when having irregularities of the terrain. The implementation of the topological study helps reduce the efforts

and deformations as seen in Table 7. This way it can be selected under the JLMotor catalogs the type of suspension with the same or similar design characteristics proposed and thus is more optimally adapted due to the external parameters and factors posed by the SAE [32, 33, 20].

Table 7: Stress and deformation values for JLMotor 250 mm shock before and after topological optimization

	JLMotor 250mm shock absorber	JLMotor 250mm shock absorber topologically optimized
Mesh (mm)	300	300
Sizing (mm)	2	2
Elements	15168	15780
Nodes	31129	31506
Skewness	0,40063	0,46614
orthogonality quality	0,7329	0,7329
Element quality	0,66375	0,59083
Total deformation (mm)	12,541	52,578
Equivalent elastic deformation (mm / mm)	0,00011672	0,000381
Equivalent stress (MPa)	2510,2	662,41
Mass (kg)	25,984	24,595

According to the data provided by the simulations regarding the optimizations of the topological and performance of this in when the static simulation, the purchase of the shock absorber shock JLMotor 3100026 (Figure 11).

### 5. Discussions

Analyzing the results of total deformation, elastic deformation equivalent of von-Mises and effort equivalent of von-Mises obtained with a mesh of 350 mm and topological optimization to avoid defects due to external loads in steel 6150 H, together with design considerations such as topological optimization, three important points can be highlighted of the results obtained:

1. The selected suspension system from the JLMoto catalog meets the design and SAE



Source: JI motor official store.  
<https://bit.ly/3p66Gxi>

Figure 11: JLMoto brand suspension system dimensioning reference 3100026

requirements for optimal competitive operation with the consideration that said simulated model does not respond to machining cost issues in its topological optimization and vibration reduction without affecting the mechanical properties of the material.

2. An equivalent Von-Mises stress value is achieved by ANSYS 2020R1 of 662,41 MPa, thus ensuring that the suspension system does not fail under the critical conditions of dynamic displacement, because the elastic limit of the SAE

6150 H material is 800 MPa.

3. The ANSYS software through the topological study allows reducing the shock mass by 5,34 %; making it lighter and with better performance mechanical characteristics for the conditions posed by the SAE formula and making a contribution to the automotive industry from the mechanical Engineering.

## 6. Conclusions

The topological optimization of the suspension system can contribute to the automotive sector at the same time reducing costs in materials and manufacturing times. In this way, it is advisable to evaluate the conditions to which the suspension system will be exposed, and accordingly, areas that do not have stress concentrators are optimized.

The analysis of oscillations over time shows a high overshoot and an establishment in four seconds, for which the system adequately absorbs the irregularities of the ground without suffering high efforts that compromise the material and generate discontinuities or cracks.

The suspension system designed exclusively for competition provides greater reliability and improved results in terms of time reduction and absorption of terrain irregularities, providing comfort and a pleasant driving experience.

## 7. Acknowledge

To the Research Center of the Faculty of Engineering of the Universidad Libre, headquarters in Bogotá for carrying out the financing of the research project “Design and manufacture of low mini vehicle V.1.0 under SAE parameters”, which has allowed the SIM Semillero and its members to make presentations and articles at scientific events, which has strengthened the competitions in the maintenance line for students of the Mechanical Engineering Program.

## 8. References

- [1] G. I. Y. Mustafa, H. P. Wang, and Y. Tian, “Vibration control of an active vehicle suspension systems using optimized model-free fuzzy logic controller based

- on time delay estimation,” *Advances in Engineering Software*, vol. 127, pp. 141–149, 2019.
- [2] J. A. García-Manrique, S. Peña-Miñano, and M. Rivas, “Manufacturing to motorsport by students,” *Procedia Engineering*, vol. 132, pp. 259–266, 2015.
- [3] S. Chepkasov, G. Markin, and A. Akulova, “Suspension kinematics study of the “Formula SAE” sports car,” *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1280–1286, 2016.
- [4] R. Burdzik, “Novel method for research on exposure to nonlinear vibration transferred by suspension of vehicle,” *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 91, pp. 170–180, 2017.
- [5] I. V. Ryabov, V. V. Novikov, and A. V. Pozdeev, “Efficiency of shock absorb in vehicle suspension,” *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 354–362, 2016.
- [6] G. M. Szyma-ski, M. Josko, F. Tomaszewski, and R. Filipiak, “Application of time–frequency analysis to the evaluation of the condition of car suspension,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 58–59, pp. 298–307, 2015.
- [7] E. Sert and P. Boyraz, “Optimization of suspension system and sensitivity analysis for improvement of stability in a midsize heavy vehicle,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 997–1012, 2017.
- [8] B. Németh and P. Gáspár, “LPV-based Variable-Geometry Suspension Control Considering Nonlinear Tyre Characteristics,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 26, pp. 61–66, 2015.
- [9] C. Kavitha, S. A. Shankar, K. Karthika, B. Ashok, and S. D. Ashok, “Active camber and toe control strategy for the double wishbone suspension system,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 31, no. 4, pp. 375–384, 2018.
- [10] J. Díaz-Mendoza, L. Vidal-Portilla, C. Ramírez-Espinoza, y C. González-Pinzón, *Diseño de un vehículo Baja SAE*, ser. Colección Textos Universitarios. Serie Investigación. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2013.
- [11] S. K. Sharma, V. Pare, M. Chouksey, and B. R. Rawal, “Numerical studies using full car model for combined primary and cabin suspension,” *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 171–178, 2016.
- [12] M. Nagarkar, Y. Bhalerao, G. Patil, and R. Patil, “Multi-Objective Optimization of Nonlinear Quarter Car Suspension System – PID and LQR Control,” *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 420–427, 2018.
- [13] H. Jing, R. Wang, C. Li, and J. Bao, “Robust finite-frequency H. control of fullcar active suspension,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 441, pp. 221–239, 2019.
- [14] H. Carlson, *Spring Designer’s Handbook*. CRC Press, 1978.
- [15] S. Saurabh, K. Kumar, S. Kamal-Jain, S. Kumar-Behera, D. Gandhi, S. Raghavendra, and K. Kalita, “Design of suspension system for formula student race car,” *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 1138–1149, 2016.
- [16] G. Shelke, A. Mitra, and V. Varude, “Validation of Simulation and Analytical Model of Nonlinear Passive Vehicle Suspension System for Quarter Car,” *Today Materials: Proceedings*, vol. 5, no. 9, pp. 19294–19302, 2018.
- [17] W. Wang and Y. Song, “Analytical computation method for steady-state stochastic response of a time-delay nonlinear automotive suspension system,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 131, pp. 434–445, 2019.
- [18] A. Keivan and B. Phillips, “Rate-independent linear damping in vehicle suspension systems,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 431, pp. 405–421, 2018.
- [19] G. Yan, M. Fang, and J. Xu, “Analysis and experiment of time-delayed optimal control for vehicle suspension system.” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 446, pp. 144–158, 2019.
- [20] Associated Spring-Barnes Group, *Design Handbook*. Bristol, Conn, 1987.
- [21] D. Pastorcic, G. Vukelic, and Z. Bozic, “Coil spring failure and fatigue analysis,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 99, pp. 310–318, 2019.
- [22] Y. Mohammad-Hashemi, M. Kadkhodaei, and M. Mohammadzadeh, “Fatigue analysis of shape memory alloy helical springs,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 161–162, p. 105059, 2019.
- [23] T. Keerthi vasan, S. Shibi, and C. Tamilselvan, “Fabrication and testing of composite leaf spring using carbon, glass and aramid fiber.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 45–51, 2019.
- [24] J. Foard, D. Rollason, A. Thite, and C. Bell, “Polymer composite belleville springs for an automotive application.” *Composite Structures*, vol. 221, p. 110891, 2019.
- [25] X. Ma, P. Wong, and J. Zhao, “Practical multi-objective control for automotive semi-active suspension system with nonlinear hydraulic adjustable damper,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 117, pp. 667–688, 2019.
- [26] M. Omar, M. El-kassaby, and W. Abdelghaffar, “Parametric numerical study of electrohydraulic active suspension performance against passive suspension,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, p. 36093614, 2018.
- [27] M. Benko, L. Kucera, and L. Smetánka, “Front suspension design of the lightweight vehicle,” *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 623–630, 2019.
- [28] A. Furg, A. Myrell, A. Killinger, and R. Gadow, “Suspension and coating characterization of high velocity suspension flame sprayed (HVSFS) mixed titanium oxide–titanium carbide coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 371, pp. 90–96, 2019.
- [29] J. Shigley and C. Mischke, *Design in Mechanical*

*Engineering*, 6th ed. Mexico: McGrawHill, 2002.

- [30] L. Harus and H. Wiwiek, “A Comparative Study of the Damping Force and Energy Absorbtion Capacity of Regenerative and Conventional-Viscous Shock Absorber of Vehicle Suspension,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 758, pp. 45–50, 2015.
- [31] J. Rumney, “Construction of motor vehicle springs,” *Transactions (Society of Automobile Engineers)*, vol. 2, no. 2, pp. 45–56, 1907.
- [32] C. Patiño, C. Calderon, J. Ortiz, y O. Rodríguez, “Diseño y construcción de un prototipo mini baja SAE,” Trabajo para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad Pontificia Bolivariana., Bucaramanga, 2008.
- [33] V. Chacón, “Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortigadores magneto-reológicos,” Trabajo para optar a la título de Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad Mecánica, Escuela Politécnica Suerior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

## Índice de materias

### Symbols

índice de reproducción cromática general, 233

### A

accesibilidad, 91  
 aceite de semilla, 273  
 acelerómetro, 367  
 acero ASTM A131, 211  
 agricultura, 343  
 agua, 343  
 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  
 coeficiente de rugosidad, 328  
 CommonKADS, 69  
 competencia digital, 78  
 conductividad eléctrica, 102  
 construction control, 84  
 contenido, 343  
 control de goniómetro, 367  
 criterio de Nyquist, 224  
 Cuenca Ramis, 189  
 curva de intensidad de luz, 233

### D

derivados, 118  
 desarrollo sostenible, 91  
 diámetro efectivo, 328  
 Domino Logic, 282  
 DQO, 150

### E

Ecuación de Manning, 328  
 elongación, 102  
 entrecruzamiento químico, 273  
 equilibrio, 175  
 esfuerzo último, 102  
 esfuerzos residuales, 211  
 estabilidad paramétrica, 224  
 evaluación no invasiva, 41

### F

fardo de paja, 304  
 FCE, 69  
 filtros, 20  
 flujo, 343  
 flujo luminoso, 233  
 formación de agentes móviles, 224  
 formación de múltiples agentes, 224  
 frecuencia Cardíaca, 237

### G

GC-MS, 150  
 giroscopio, 367  
 GR4J, 189  
 granulometría, 328

### H

HBV, 189  
 hidráulica fluvial, 328  
 hidrogel, 273  
 HPLC, 150  
 humedecimiento parcial, 136

### I

indicadores de desarrollo, 353  
 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

método fase-métrico, 367  
 módulo de elasticidad, 304  
 Maracuyá, 273  
 Matute, Kelvyn, 102  
 Memristor, 282  
 meta-modelo cibernético, 29  
 microestructura, 102  
 modelación hidrológica, 189  
 modelo, 343  
 Modelo basado en agentes (MBA), 175  
 movilidad sostenible, 91  
 MTJ, 282

## N

número de pasadas, 211

## O

OODA, 69

## P

PARMA, 54  
 PERSEO, 54  
 plan estratégico, 78  
 polifenoles, 273  
 polisacárido, 118  
 preferencias de usuario, 6  
 proceso Fenton, 165  
 procesos de oxidación avanzada, 150  
 propiedades mecánicas, 211  
 Provincia de Lorestan, 353

## 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, 343  
 riego parcial, 136  
 riego por goteo, 136

rodamientos, 41  
 RS-MINERVE, 189

## S

sistema de orientación, 367  
 sistemas de recomendación, 6  
 SOCONT, 189  
 soldadura GMAW, 211  
 spat, 343  
 Sumador completo, 282  
 sustancia recalcitrante, 165  
 sustentabilidad, 304

## T

taxonomía numérica, 353  
 tecnología semántica, 6  
 transporte, 91

## V

vehículos aéreos no tripulados, 224  
 vehículos aéreos no tripulados (VANT), 367  
 vibraciones, 41  
 vivienda, 304  
 volumen ventricular, 237

## Subjects index

### A

academic performance, 78  
 accelerometer, 367  
 accessibility, 91  
 administración transdérmica, 249  
 advanced oxidation processes, 150  
 Agent Base Model (ABM), 175  
 agriculture, 343  
 analysis by analogy, 237  
 annealing, 102  
 applications, 118  
 ASTM A131 steel, 211  
 atrapanieblas, 319

### B

balancing, 175  
 bearings, 41

### C

Carbon Nanotube Field Effect Transistor, 294  
 cardiac output, 237  
 carwashes, 200  
 CDO, 150  
 chemical crosslinking, 273  
 chitin, 118  
 chitosan, 118  
 clay, 20  
 CMOS-like Pass Transistor Logic, 294  
 coalescence, 20  
 CommonKADS, 69  
 construction control, 84  
 content, 343  
 cryptography algorithms, 29  
 cybernetic meta-model, 29  
 cycle network, 91

### D

derivatives, 118  
 Dermal delivery, 249  
 design, 374  
 development indicators, 353  
 digital competition, 78  
 diseño, 374

Domino Logic, 282

drip irrigation, 136

### E

effective diameter, 328  
 electrical conductivity, 102  
 ELF, 69  
 elongation, 102  
 emulsión espontánea, 249

### F

Fenton process, 165  
 filters, 20  
 flow, 343  
 fluvial hydraulics, 328  
 fog, 319  
 Full Adder, 282

### G

GC-MS, 150  
 goniometer control, 367  
 GR4J, 189  
 granulometry, 328  
 grid computing, 69  
 groundwater, 175  
 gyroscope, 367

### H

HBV, 189  
 heart rate, 237  
 housing, 304  
 HPLC, 150  
 hydrogel, 273  
 hydrological modeling, 189  
 hydropower, 54

### I

incandescent lamp, 233  
 information exchange, 224  
 irrigation, 343

### L

lógica de transistor de paso tipo CMOS, 294  
 Latex, 78

LED filament lamp, 233  
 light intensity curve, 233  
 Lorestan Province, 353  
 lubricants, 200  
 luminous flux, 233

## M

malla metálica, 319  
 malla mosquitero, 319  
 malla raschel, 319  
 Manning's equation, 328  
 mechanical properties, 211  
 Memristor, 282  
 metal mesh, 319  
 microstructure, 102  
 mini-baja vehicle, 374  
 mists, 319  
 mobile agent formation, 224  
 model, 343  
 modulus of elasticity, 304  
 mosquito mesh, 319  
 MTJ, 282  
 multi-agent formation, 224  
 Multiplexer, 294  
 multiplexor, 294

## N

nanoemulsiones, 249  
 nanoemulsions, 249  
 neblinas, 319  
 nieblas, 319  
 non invasive assesment, 41  
 number of passes, 211  
 numerical taxonomy, 353  
 Nyquist criterion, 224

## O

oils production water, 20  
 OODA, 69  
 orientation system, 367

## P

parámetros SAE, 374  
 parametric stability, 224  
 PARMA, 54  
 partial irrigation, 136  
 partial wetting, 136  
 Passion fruit, 273

PDP, 294  
 PERSEO, 54  
 phase-metric method, 367  
 PIC, 249  
 PIT, 249  
 polyphenols, 273  
 polysaccharide, 118  
 potato yield, 136

## Q

Q-analysis, 29

## R

Ramis basin, 189  
 raschel mesh, 319  
 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  
 retardo de tiempo, 294  
 roughness coefficient, 328  
 RS-MINERVE, 189

## S

SAE parameters, 374  
 scientific and technical renovation substantiation,  
     84  
 seed oil, 273  
 semantic technology, 6  
 sensor networks, 69  
 sistema de suspensión, 374  
 social networks, 6  
 SOCONT, 189  
 spat, 343  
 spontaneous emulsion, 249  
 strategic plan, 78  
 straw bale, 304  
 suspension system, 374  
 sustainability, 304  
 sustainable development, 91  
 sustainable mobility, 91  
 synthetic flows, 54

## T

thermoelectric power, 54

Time Delay, 294  
transdermal delivery, 249  
transistor de efecto de campo de nanotubos de  
    carbono, 294  
transport, 91  
trappermists, 319

## **U**

ultimate effort, 102  
unmanned aerial vehicle (UAV), 224  
unmanned aerial vehicles (UAV), 367  
urban development, 84  
user preferences, 6

## **V**

vehículo Mini Baja, 374  
ventricular volume, 237  
vibrations, 41

## **W**

wastewaters, 200  
water, 343  
welding GMAW, 211

## Índice de autores (*Author index*)

### A

Abbasian, Karim, 294  
 Aguirre, Darío, 304  
 Albornoz, Andrés, 41  
 Aleida Cantor-Rudas, 237  
 Alíed Romero–Serrano, 118  
 Almarza-Morales, Ángel, 4  
 Araghinejad, Shahab, 175  
 Aref, Mohammad, 29

### B

Babazadeh, Hossain, 175  
 Baghban, Hamed, 294  
 Bagher Tavakoli, Mohammad, 282  
 Bakhtiari, Sedighe, 69  
 Bullón, Johnny, 20

### C

Cardenas-Vásquez, Ernesto, 165  
 Centeno-Bordones, Guillermo, 150  
 Chaharsoughi Amin, Hamed, 353  
 Cieza-León, Dante, 319  
 Cieza-León, Luis, 319

### D

Díaz, Albenis, 211  
 Díaz-Salas, Abelardo, 328  
 Duarte-González, David, 343

### E

Eshraghi Samani, Roya, 353

### F

Farias, Betty, 91  
 Fesharaki, Mehdi N., 69  
 Flores, Enrique, 41  
 Fooladvand, Hamed, 294  
 Franco-Camacho, Omar, 374

### G

García Sánchez, Francisco, 6  
 García, José V., 150  
 Grecheneva, A. V., 367  
 Guerra, Sergio, 211

Guevara-Pérez, Edilberto, 54, 136, 328

### H

Hasanvandian, Maryam, 353

### J

Jiménez, Ygmar, 150  
 Juan Pereira, 118

### K

Khadem-zadeh, Ahmad, 69  
 Kharchuk, S. M., 367  
 Kurilov, I. A., 367  
 Kuzichkin, O. R., 224, 367

### L

López, Erwin, 41  
 Lapidus, Azariy A., 84  
 Lujano, Apolinario, 189  
 Lujano, Efrain, 189  
 Lujano, Rene, 189

### M

Mago-Ramos, María, 374  
 Medina-Valderrama, Carlos, 165  
 Mejía-Marcacuzco, Abel, 54  
 Mejía-Marcacuzco, Jesús, 136  
 Mikaeva, S. A., 233  
 Monroy, Ruth, 249  
 Monzó, José María, 304  
 Mousalli, Victoria, 20

### N

Natividad-Toribio, Piero, 136  
 Noguera-Machado, Nirza, 273  
 Norouzzadeh-GilMolk, Ali, 29

### O

Ojeda, Luis, 273  
 Ordoñez, Joan, 78  
 Orrego-Zapo, Salvador, 165  
 Ortiz, Carlos, 200

### P

Pacheco, Franklin, 273

Parvizi, Pooria, 282  
Pazahr, Ali, 6  
Pereira, Juan, 249  
Pernía, Leidy, 150  
Poursaeed, Alireza, 353  
Prato, Jesús David, 20

## **R**

Ríos, Ricardo, 374  
Rahmani, Hamid, 175  
Ramazani-Khorshiddoust, Reza, 29  
Razuri-Ramírez, Luis, 136  
Rennola, Leonardo, 20  
Román, Yanitza, 78  
Romero, Jorge, 41  
Rosales-Cueva, Juan, 328

## **S**

Sánchez-Delgado, Miguel, 136  
Sabbaghi-Nadooshan, Reza, 282  
Salazar, Franklin, 20  
Salazar, Leonel, 102  
Samper Zapater, José Javier, 6  
Sarango-Julca, Douglas, 54  
saremi, Ali, 175  
Scotti, Emilly, 273  
Sidorovas, Luis, 102  
Sosa, Jesús David, 189  
Surzhik, D. I., 224, 367

## **T**

Torres, Carmelo, 211

## **U**

Uriarte-Tirado, Wilmer, 165

## **V**

Vásquez-Ramírez, Luis, 319  
Vallés-Defendine, Luis, 374  
Vasilyev, G. S., 224, 367  
Velásquez, Ingrid, 273  
Viera, Paulina, 304  
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 subscribed 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  $\text{\LaTeX}$ , 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 affiliation, 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 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X format, 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  $\text{\LaTeX}$  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](mailto:revistaing@uc.edu.ve).

Los trabajos en  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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 consider 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  $\text{\LaTeX}$  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](mailto:revistaing@uc.edu.ve).

The works in  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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). Additionally, 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](mailto: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:





# 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.<sup>a</sup> Carmen Guédez  
Directora Esc. Ing. Industrial

Prof. Tony Espinoza  
Asistente al Decano

Prof. Reny Marin  
Director Consejo Facultad

Prof.<sup>a</sup> Ledy Guerra  
Directora Esc. Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito  
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof.<sup>a</sup> Lissette Jiménez  
Directora de Postgrado

Prof.<sup>a</sup> Vanessa Hurtado  
Directora Esc. Ing. Mecánica

Prof. Edson Martínez Oberto  
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Luis E. Di Stefano  
Director de Administración

Prof.<sup>a</sup> Ixmit López  
Directora Esc. Ing. Química

Prof. Carlos Cochiarella  
Director de Asuntos Profesorales

Prof. Pablo Baricelli  
Director del Centro de Investigaciones  
Químicas

Prof. Ángel D. Almarza M.  
Director de Investigación y Producción  
Intelectual

Prof.<sup>a</sup> María Teresa Cruz  
Directora de Docencia y Desarrollo Curri-  
cular

Prof. César O. Seijas Fossi  
Director del Centro de Procesamiento de  
Imágenes

Prof. César Cuperto Ruiz P.  
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof.<sup>a</sup> Lin Hurtado  
Directora Estudios Básicos

Prof.<sup>a</sup> Marlin Gómez  
Directora de Extensión

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán  
Director del Instituto de Matemática y  
Cálculo Aplicado

Prof. David E. Duarte G.  
Director de Tecnologías de la Información y  
Comunicación

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](mailto:revistaing@uc.edu.ve)

Correo-e: [revistaing@gmail.com](mailto: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**  
**Enero–Diciembre 2020, Volumen 27**  
**Número 1–3**

---

---

**Revista Ingeniería UC se encuentra indizada en:**  
**Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;**  
**Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT;**  
**IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México);**  
**Periódica (México);**  
**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.**

---

---

**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**