



Enero – Diciembre 2018, Vol. 25, N° 1-3, ISSN 1316–6832



Revista INGENIERÍA UC

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

Disponible en:
Revista Ingeniería UC
servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista

VALENCIA – VENEZUELA

ISSN 1316–6832
Depósito legal pp 92.0200

**Revista
Ingeniería UC**

Revista indexada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile);
IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing);
LATINDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

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

Editor - Jefe

Prof. Angel D. Almarza M., PhD Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

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 Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Editores Honorarios

Prof. Edilberto Guevara, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof. Francisco Arteaga, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof.^a Lisbeth Manganiello, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Editores Asociados

Prof.^a Belén Paricaguán, PhD, Dirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof. Francisco Soto, MSc, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof. Angelina Correia, PhD, Escuela de Ingeniería Química, 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 Barbien
University of Houston, Estados Unidos
Dr. Ángel Rios Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España
Dr. Merlin 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

Revista indexada 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.

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

Comité Técnico*

Dr. Eliecer Colina, Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. César O. Seijas Fossi, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Francisco García Sanchez, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Fernando Mora, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Gian Franco Passariello, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Enrique Cázares Rivera, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México
Dr. Giovanni De Mercato, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dra. Yadir Martínez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Luis Vallés, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Luis Llave, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Alfredo Varela, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Johel Rodríguez, MSc, Universitat Politècnica de València, España
Dr. Sergio Pérez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Celeste Fernandez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Antonio Bonsjak, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. José R. Pacheco, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Susana Salinas de Romero, Universidad del Zulia, Venezuela
Dr. Cristóbal E. Vega González, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Donato Romanello, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Teddy Rojas, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Thalia San Antonio, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Carlos Jiménez, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Nereida Sanchez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Luis Melián, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Lucia Martino, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Antonio Millán, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Ricardo Villegas, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Jesús Jiménez, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela

Ing. Paulino Del Pino, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Wilmer Sanz, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Carlos Lameda, MSc, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela
Ing. Carlos Hernández, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Alfonso Alfonsi, Universidad de Oriente
Ing. Enrique Flores, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Ángel Villegas, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Damelys Zabala, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Demetrio Rey Lago, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Jennifer Aparicio, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Alfonso Zozaya, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Lilly Marciano, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. César Martínez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Guillermo Montilla, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Alejandro Centeno, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Laura Sáenz, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Enrique Flores, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Lic. Atilio Morillo, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Franklin Camejo, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Sergio Villazana, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Vanesa Altomare, Universidad de Carabobo, Venezuela
Lic. Reina Windevoxel, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Sandra Cabello, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Enrique Pérez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Julio Pineda, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Maria Teresa Cruz, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
*Lista parcial

Frecuencia de publicación

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

Información de Contacto

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
<http://revista.ing.uc.edu.ve/> Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

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

ISSN 1316–6832



Revista Ingeniería UC

ORGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Valencia – Venezuela

Contenido General, (*General content*)

Volumen 25 Número 1	1
Editorial volumen 25 número 1	2
<i>José Luís Nazar y Lisbeth Manganiello</i>	
1 Letter to the editor: Use of template for the preparation of the articles in scientific journal	4
Uso de plantilla para la preparación de artículo en revista científica	
<i>Jesús J. Jiménez G., Cristóbal Vega y Ahmad Osman</i>	
2 System of public transportation of passengers, its chaining and displacement towards the commerce	10
Sistema de transporte público de pasajeros, su encadenamiento y desplazamiento hacia el comercio	
<i>Diego López C., Fernando Torres D., Shirley Núñez G. y Gabriel Cevallos U.</i>	
3 Characterization spatio-temporal land use in watershed using geomatic techniques	19
Caracterización espacio-temporal del uso de tierras en cuencas mediante técnicas geomáticas	
<i>Bettys Farias, Adriana Márquez, Demetrio Rey Lago y Edilberto Guevara</i>	
4 The alternative method of the estimate of the quality of gas-exchange processes in the internal-combustion engine	31
El método alternativo de la evaluación de calidad de los resultados del intercambio de gases en los motores de combustión interna	
<i>Leonid M. Matyukhin</i>	
5 Analysis of the manning roughness coefficient variation in regard to the channel slope of 315 mm diameter PVC	43
Análisis de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con respecto a la pendiente del canal en tubería de PVC de 315 mm de diámetro	
<i>Alejandro Araya I., Valentina González C. y Maryelvi Jiménez</i>	
6 Design of Neural Networks on microcontrollers, applied in functional modules for an eco-park	50

Diseño de Redes Neuronales sobre microcontroladores, aplicadas en módulos funcionales para un eco-parque

David J. Steckler V., Cesar Nava, Jonattan Duarte, José Jhoan Zambrano y Cecilia E. Sandoval-Ruiz

7 Evaluation of the procedures of heavy metal removal in COD residues 61

Evaluación de los procedimientos de remoción de metales pesados en los residuos de la DQO

M. Torres, Darwin López y R. Windevoxhel

8 Implementation of a control system for a hand's passive rehabilitation device 69

Implementación de un sistema de control para rehabilitador pasivo de dedos de la mano

Washington Mosquera, Pablo Benavides, David Ojeda, Diego Ortiz

9 Design of a system of acquisition and data processing with the use of multisensors for university physics laboratories 76

Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para laboratorios de física universitarios

Yubiry González, Jesús Pérez y Emery Dunia

10 Characterization of the red mud calcined to different temperatures 86

Caracterización del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas

Darwin López y C. Linares

11 Fire effect on the tensile resistance of slabs steel reinforcement 93

Efecto del fuego sobre la resistencia a tracción del acero de refuerzo en losas

Angel Bepin, Nerio Pérez, Edson Martínez y Salvador Scola

12 Evaluation of the mechanical behavior of an AISI 1045 steel subjected to thermal treatments 99

Evaluación del comportamiento mecánico de un acero AISI 1045 sometido a tratamientos térmicos

Francisco Bolaños, José Caicedo, Carlos Alfonso, Anahi Santeliz y Argel Porrello

13 Design of a high availability cluster for a university virtual educational environment 108

Diseño de un cluster de alta disponibilidad para un entorno educativo virtual universitario

Herney Perafan, Nazareth Guia, Demetrio Rey y David Duarte

Volumen 25 Número 2	117
Editorial volumen 25 número 2	118
<i>José Luís Nazar y Lisbeth Manganiello</i>	
14 Review on asphaltene films at air – water and oil – water interfaces	120
Revisión sobre películas de asfaltenos en las interfases aire – agua y aceite – agua	
<i>Yasmín Tatá, Franklin Salazar – Rodríguez, Ana M. Forgiarini, José G. Delgado-Linares y Johnny Bullón</i>	
15 Ultra wideband antennas for communications systems on microwave frequency bands: A review	134
Antenas de banda ultra ancha para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas: Una revisión	
<i>Contreras, A. y Urdaneta, M.</i>	
16 Operation variables evaluation of vertical evaporators via a computational tool	149
Evaluación de las variables de operación de evaporadores verticales por medio de una herramienta computacional	
<i>J. Yaguaratty, V. Hurtado, A. Bolívar y Á. D. Almarza</i>	
17 Implementation of Monte Carlo algorithm in parallel for modeling the propagation of light in adult human skin	158
Implementación de un Algoritmo Monte Carlo en paralelo para el modelado de la propagación de la luz en piel humana adulta	
<i>Muñoz, A. y López, G.</i>	
18 Synthetic analysis of the debate on the integrated management of water resources in Peru	166
Análisis resumido del debate sobre la gestión integral de los recursos hídricos en el Perú	
<i>Edilberto Guevara–Pérez</i>	
19 Mechanical behavior of mixtures of polylactic acid (PLA) with polystyrene (PS)	184
Comportamiento mecánico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS)	
<i>Jhonny Medina, Patricia Cedeño, Ricardo Heras, Juan Carlos Hernández y Carlos Zapata</i>	
20 Evaluation of resistance to corrosion by pitting of stainless steel duplex SAF 2304	194
Evaluación de la resistencia a la corrosión por picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304	

Laura Sáenz, Jesús García y Omar Guzmán

- 21 Extraction optimal conditions evaluation in regenerative steam power plants by a computational tool** 204

Evaluación de las condiciones óptimas de extracción en plantas de potencia a vapor regenerativas por medio de una herramienta computacional

V. Hurtado, A. Bolívar y Á. D. Almarza

- 22 Spectral analysis of electromagnetic torque in fault detection of eccentricity of three-phase induction motors by means of canonical discriminant** 213

Análisis espectral de torque electromagnético en la detección de fallas de excentricidad de motores de inducción trifásicos mediante el discriminante canónico

Ledy Guerra, Francis Barboza, Rubén Terán, Irahis Rodríguez y Eva Monagas

- 23 Proposal for a matrix of minimum distances between AM broadcast stations for Venezuela based on the propagation curves ITU-R P.368** 221

Propuesta de una matriz de distancias mínimas entre estaciones AM para Venezuela basada en las curvas de propagación UIT-R P.368

Fabián Robledo

- 24 Physical Cell ID for LTE Network: recommendations for planification** 237

Identificador físico de celda para redes LTE: recomendaciones para la planificación y asignación

Romer Valor, Yofrank Torres y Ahmad Osman

- 25 Hydrolytic degradation and biodegradation of binary mixes of polylactic acid (PLA) with plastic residues** 248

Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos

Jhonny Medina, Yenifer Roche, Omar Maldonado, Juan Carlos Hernández, Carlos Zapata

- 26 Catalysts sulphide Fe-Mo supported in Zn-hydroxyapatites and its application in thiophene hydrodesulfurization reaction** 259

Catalizadores sulfurados Fe-Mo soportados en Zn-hidroxiapatitas y su aplicación en la reacción de hidrodesulfuración de tiofeno

Carlos Felipe Linares, Edith Figueredo y Freddy Ocanto

- 27 Development of virtual instrumentation applied to telecommunications laboratories using the Red Pitaya board** 266

Desarrollo de instrumentación virtual aplicada a laboratorios de telecomunicaciones usando la tarjeta Red Pitaya

Giusseppe Perretti, Robert Fernández, Carlos Mejías y Carlos Aponte

- 28 Nevus classification by calculating the fractal dimension and the harmonic analysis of the contour extracted from multispectral images 276**

Clasificación de nevus mediante el cálculo de la dimensión fractal y el análisis armónico del contorno extraído de imágenes multiespectrales

Alvaro Ascencio, José Zapata y Ahmad Osman

- 29 A liposoluble colorant from Annatto seeds (Bixa Orellana L.) as an input for food industry 291**

Un colorante liposoluble de semillas de Onoto (Bixa Orellana L.) como insumo para la industria alimentaria

José Camacaro, José Gómez, Milagros Jiménez, Cristóbal Vega y Lisbeth Manganiello

- 30 Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenarios 307**

Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano peruano bajo escenarios climáticos regionalizados

Pilares H., I. A., Montalvo, N., Mejía M., A., Guevara P. E., Fano M., G., Alfaro A., R.

Volumen 25 Número 3 320

Editorial volumen 25 número 3 321

José Luís Nazar, Lisbeth Manganiello y Angel Almarza

Reseña de Editores 323

- 31 Trend study: Applications of Colophony (Rosin) and its Derivatives 325**

Estudio de tendencia: Aplicaciones de la Colofonia y sus derivados

Natasha Tellería Mata, Samuel Villanueva, Magaly Henríquez

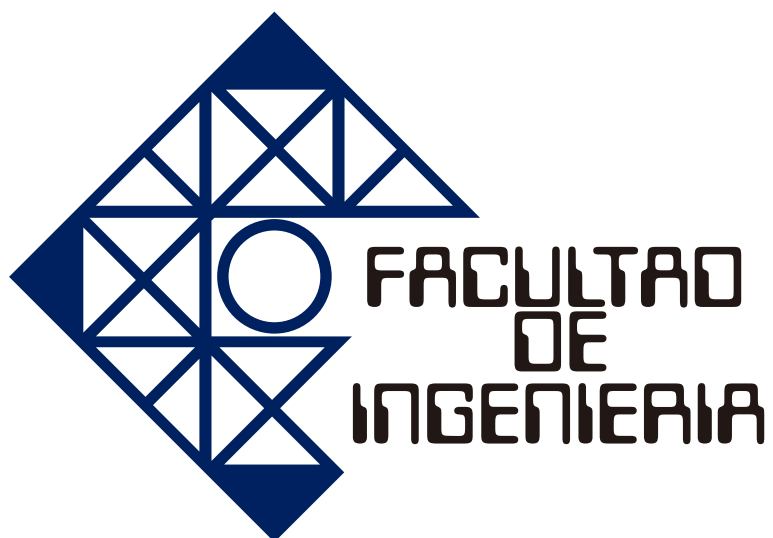
- 32 Impact toughness of the duplex stainless steel SAF 2304, with heating between 1100°C y 1300°C 338**

Tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF-2304, con calentamientos entre 1100°C y 1300°C

Laura Sáenz y Edwin Patiño

- 33 Modelling snowmelt on glaciers in the Santa River basin and its impacts in water resources** **347**
- Modelamiento de la desglaciación de los nevados de la cuenca del Rio Santa y su impacto en los recursos hídricos
- Elmer E. Calizaya Llatasi y Jesús A. Mejía Marcacuzco*
- 34 Reformulation of latex class A latex paint for interior use, by partial replacement of titanium dioxide by extenders.** **357**
- Reformulación de pintura látex clase A Semimate de uso interior, mediante la sustitución parcial del dióxido de titanio por exténderes
- Fabiola Sevilla, José Luis Muñoz, José Antonio Pérez, Belén María Paricaguán*
- 35 A Management Plan for Hazardous Substances in the Toxicology-Pharmacology and Organic Chemistry Laboratories** **369**
- Un plan de manejo de las sustancias peligrosas en los laboratorios de toxicología-farmacología y química orgánica
- William Peñaloza, Nasser Jamul, Angelina Correia*
- 36 Smith Chart *ad hoc* using GNU Octave for didactics purposes** **381**
- Diagrama de Smith *ad hoc* usando GNU Octave para fines didácticos
- A. J Zozaya*
- 37 Impedance spectroscopy in water/oil emulsions in a range of intermediate frequencies** **388**
- Espectroscopia de impedancia en emulsiones agua/aceite en un rango de frecuencias intermedias
- José Jorge, Juan Carlos Pereira, María Rodríguez, Nelson Barrios, David Oliva y José Antonio Navia*
- 38 Mechanical behavior model of stainless steel 304 H at high temperature** **396**
- Modelo del comportamiento mecánico de un acero inoxidable 304 H expuesto a elevada temperatura
- Franklin Acevedo y Laura Sáenz*
- 39 Reformulation of latex flat paint class A for exterior use, through the partial replacement of titanium dioxide by new extenders** **403**
- Reformulación de pintura látex clase A mate de uso exterior, mediante la sustitución parcial del dióxido de titanio por nuevos exténderes
- Belén María Paricaguán, José Luis Muñoz, Fabiola Sevilla y José Antonio Pérez*

40 Characterization of an austenitic stainless steel AISI 304 H with 15 year in service exposed at high temperature	415
Caracterización de un acero inoxidable 304 H expuesto a elevada temperatura por 15 años de servicio	
<i>Franklin Acevedo y Laura Sáenz</i>	
41 Study of the useful life of a submerged cutting tool to a cryogenic treatment in the machining of parts of steel AISI 1045.	424
Estudio de la vida útil de una herramienta de corte sometida a un tratamiento criogénico en el mecanizado de piezas de acero AISI 1045	
<i>Luis Sidorovas, Ron Francisco e Ivan Ramones</i>	
42 Review: Piezoelectric sensors applications in the detection of Contaminants in food	433
Estado del Arte: Aplicaciones de los sensores piezoeléctricos en la detección de elementos contaminantes en alimentos	
<i>Cristina de Sousa, Lisbeth Manganiello</i>	
Erratum	448
Fe de errata	449
Índice de materias	450
Subjects index	453
Índice de autores (<i>Author index</i>)	456
Apéndices	1
A. Línea editorial	2
B. Editorial line	3
C. Normas para la presentación de artículos	4
D. Authors Information	7
E. Carta de compromiso	9
F. Compromise letter	10
G. Índices de Revista Ingeniería UC	11



Volumen 25 Número 1

Editorial

La Revista Ingeniería UC en su edición de su número uno (1) correspondiente al periodo de enero a abril del año 2018 de su volumen 25, destaca la importancia de siempre “creer en lo que hacemos de manera responsable” buscando la excelencia en cada uno de los proyectos que emprendemos, mirando siempre hacía adelante, sin dejar de considerar nuestras bases, nuestros legados. Ciertamente los tiempos son difíciles y los obstáculos son muchos pero si logramos ver más allá se convierten en retos que superaremos y cada vez nos harán mejores. Desde la Revista Ingeniería UC nos levantamos y asumimos cada obstáculo como un reto, llenos de fe y convencidos que todo lo que acontece siempre será una oportunidad para sacar lo mejor de nosotros mismos.

Abrimos el presente número con un importante aporte desde la modalidad de “Carta al Editor” para el desarrollo de nuestra Revista Ingeniería UC, el trabajo de edición de una revista requiere de mucha dedicación, en la presente contribución se enfatiza el beneficio de contar con una plantilla pública y el uso de las herramientas de \LaTeX en la edición de nuestra Revista acercándonos más al trabajo científico, disminuyendo el trabajo tedioso, que atenta contra el control de la calidad del mismo. López, Torres, Núñez y Cevallos en su investigación analizan la reducción de pasajeros en el transporte público de Santo Domingo de Los Colorados, (Ecuador), la dinamización del comercio de bienes de consumo como resultado de la desconcentración de la ciudad, la nueva construcción de infraestructura vial, la reestructuración de rutas y frecuencias que no consideraron estos cambios.

Farías y colaboradores abordan la caracterización de los usos del suelo y la cobertura terrestre que han ocurrido en la cuenca del río Pao entre los años 1986 y 2016. El estudio muestra que las clases que presentan incrementos son: urbano: $-1,37\%$, agropecuario: $-22,99\%$, los descensos ocurren en las clases: agrícola: $1,12\%$; agua: $0,55\%$; vegetación: $8,1\%$; suelo deforestado: $9,66\%$; sombra: $2,28\%$. Como resultado en esta investigación se ha generado un mapa de usos del suelo proporcionando información que permite concluir que la cuenca del río Pao ha sufrido cambios en el uso y cobertura de la tierra. Leonid M. Matyukhin nos presenta las ventajas de la evaluación de la calidad de los resultados del intercambio de gases por medio de fracciones en volumen de los componentes de la mezcla de servicio que se compone del aire, combustible, gases residuales y los de recirculación. Araya y González bajo la tutoría de la profesora Jiménez nos presentan su trabajo de grado en donde se estudio el coeficiente de rugosidad de Manning aplicado a una tubería de PVC, tomando en cuenta los ensayos realizados en la investigación, se obtuvo un valor de coeficiente Manning de $0,0098$ con una eficiencia del $82,16\%$. Con este valor obtenido y las gráficas realizadas queda demostrado que la pendiente del canal no ocasiona una influencia en el coeficiente de Manning. Steckler y colaboradores nos presentan una técnica de implementación de redes neuronales –RNA en hardware, a partir de un prototipo a escala para mejorar la gestión y producción de energía eléctrica autogenerada, obteniéndose como resultado un sistema neuronal integrado.

Otro interesante trabajo de grado es presentado por Torres bajo la dirección de López y Windevoxhel donde se evaluaron procedimientos de remoción de metales pesados en los residuos de DQO, las muestras estudiadas fueron analizadas, antes y después de cada tratamiento, mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica a fin de obtener las concentraciones de plata y cromo presentes. Mosquera y colaboradores nos presentan una propuesta de control para un rehabilitador de dedos de la mano, cuyo propósito es la producción de dispositivos médicos. La creación de un aparato automático que asista al fisioterapeuta en la rehabilitación de la mano pudiera permitir la atención de pacientes de forma simultánea. González y colaboradores nos muestran el diseño y construcción de un sistema de

adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para la realización de diez trabajos prácticos de laboratorio, el sistema propuesto incorpora las tecnologías de adquisición y procesamiento de datos mediante la utilización de multisensores (sensor ultrasónico de posición, sensores de voltaje, de intensidad lumínica, de temperatura, de flexión mecánica y de efecto Hall) y un micro controlador PIC 16F870, unido a una interfaz de comunicación USB. López y Linares muestran sus resultados en la caracterización de lodo rojo a diferentes temperaturas, las muestras de lodo rojo no calcinado y calcinado en el intervalo entre 600 y 800°C fueron caracterizadas por las técnicas de difracción de rayos X (DRX), espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), y reflectancia difusa de UV-visible (RD-vis) del estado sólido. Bepin y Pérez bajo la dirección del profesor Edson Martínez contribuyen con su trabajo de grado sobre el efecto de fuego sobre la resistencia a tracción del acero de refuerzo en losas, todas las losas se sometieron a fuego constante durante 60 min a una temperatura mayor a 400°C para luego extraer el acero de refuerzo y ensayarlas a tracción. Los resultados arrojaron un excelente comportamiento del concreto como aislante. Bolaños y colaboradores nos aportan el estudio de la evaluación del comportamiento mecánico de un acero AISI 1045 sometido a tratamientos térmico. Finalmente Perafan y colaboradores presentan el diseño de un cluster de alta disponibilidad para un entorno educativo virtual universitario, el diseño se llevó a cabo utilizando máquinas virtuales para su posterior implementación en nodos de prueba en la Universidad de Carabobo.

Nos despedimos deseando como es costumbre en nosotros invitando muy cordialmente 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, ciencias afines

Profesor *José Luís Nazar*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesora *Lisbeth Manganiello*, PhD
Editora – Jefe

Letter to the editor: Use of template for the preparation of the articles in scientific journal

Jesús J. Jiménez Grimán^{*a}, Cristóbal Vega^a y Ahmad Osman^b

^aInstituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bCentro de Análisis y Tratamiento de Señales (CATS), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- The work of editing a journal requires a lot of dedication, it is a task that must be developed as a team and where the failure of any link in the chain affects the image of everyone. The numerous amount of aspects that can result in a rejected article, with severe, moderate or simple corrections obliges us to present a summary of the errors that are evident during the work of arbitration and editing of the articles. In addition to the problematic characteristics of the current template for the edition of the articles, the problems of receiving articles in .doc or .docx format and the benefits of having a public template where in a short time it is mandatory. Finally, it is affirmed that the use of the tools of \LaTeX in the edition of the Revista Ingeniería UC brings us closer to scientific work, reducing the tedious work, which threatens the quality control of it..

Keywords: scientific articles; mistakes; edition; arbitration.

Carta al editor: Uso de plantilla para la preparación de los artículos en revista científica

Resumen.- El trabajo de edición de una revista requiere de mucha dedicación, es una labor que hay que desarrollar en equipo y donde la falla de cualquier eslabón de la cadena repercute en la imagen de todos. La cantidad numerosa de aspectos que pueden derivar en un artículo rechazado, con correcciones severas, moderadas o simples nos obliga a presentar un resumen de los errores que se evidencian durante la labor de arbitraje y edición de los artículos. Además, se presentan las características problemáticas de la plantilla actual para la edición de los artículos, los problemas de recibir los artículos en formato .doc o .docx y lo beneficioso que representa contar con una plantilla pública donde en un tiempo cercano sea de carácter obligatoria. Finalmente, se plantea que utilizar las herramientas de \LaTeX en la edición de la la Revista Ingeniería UC nos acerca más al trabajo científico, disminuyendo el trabajo tedioso, que atenta contra el control de la calidad del mismo.

Palabras claves: artículos científicos; errores; edición; arbitraje.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: abril 2018

1. Introducción

Problemas y errores en la redacción de un artículo científico son abundantes, escribir bien es el producto de estudio y dedicación [1]. La publicación tiene la tarea de informar la ciencia, debe conocer el destinatario y una redacción mal escrita o inadecuada de sus secciones y/o gráficos puede dañar un buen trabajo [2]. Se necesita mantener el objetivo del manuscrito, consolidar la idea principal, no utilizar palabras por tanteo,

no dar rodeos interminables y además las fuentes deben ser confiables y pertinentes.

Al redactar un artículo es importante tomar como recomendación: la claridad o que todo el mundo entienda, la precisión o el desarrollo lógico que implica clasificar y ordenar las ideas, la concisión o que la redacción cumpla con un fin específico sin llegar a extremos de pobreza expresiva. No se permite opinar sin fundamento, se debe mostrar la realidad al lector mediante hechos, citas, etc., lo que implica para el lector deberá recurrir a la interpretación.

Todas las Revistas Científicas tienen requisitos de publicación específicos para los artículos y una organización básica de la estructura de los mismos [3, 1, 2] que consta de Introducción,

^{*} Autor para correspondencia:

Correo-e:jjjimenezgriman@gmail.com (J. Jiménez)

Métodos, Resultados y Discusión. Las partes de un artículo científico son: título, autores, resumen, palabras claves, introducción, materiales y métodos, resultados, tablas, figuras, discusión, conclusión, agradecimientos y referencias bibliográficas. Sin embargo, el detalle de composición relativo a cada una de estas partes es muy particular para cada órgano de divulgación y generalmente en las etapas de su edición se configuran ciertos obstáculos que podrían dificultar la fluidez natural al proceso de publicación del volumen.

La meta de mejora continua, a la que nos hemos acogido y la posibilidad cierta de incrementar la producción de la Revista Ingeniería UC y su calidad, ha impulsado un cambio en la estructura editorial y en la optimización de los procedimientos materializado en la elaboración de la nueva plantilla en la cual se ha invertido mucho tiempo en investigación y prueba. Élla, no solo tiene que ser un vehículo que facilite la elaboración de los artículos sino también disminuya el esfuerzo en la consolidación del volumen.

2. Obstáculos en la composición tipográfica

Los obstáculos son oportunidades, hay que superarlos y en la composición tipográfica existen los errores que serán los obstáculos que podemos generar nosotros en el afán por publicar un artículo.

Evitar los errores se convierte en una forma de no entorpecer el camino al éxito, conocer los errores y no cometerlos te favorece. En la edición de artículos se observan algunos errores, que son muy variados y que se presentan organizados por renglones a fin de tratar de facilitar su comprensión.

Errores en Título

El título no refleja el contenido del trabajo o no incluye los términos más relevantes del mismo.

Errores en Figura

1. Figuras con sobrante, entregan las imágenes en formatos adecuados (*png, jpg, pdf o eps*) pero dejan espacios inútiles que no permiten editar la figura correctamente.

2. Leyendas en figuras de tamaño inadecuado, cuando ubicamos la imagen es imposible leerlas por que su tamaño de fuente es muy pequeño, o distorsiona una fuente muy grande en la figura que hace desagradable la lectura.
3. Calidad de la imagen, una calidad pobre dificulta la lectura y un excesivo peso de la figura afecta la edición del artículo y de la revista. Tiene que lograr un equilibrio entre calidad y peso de la imagen.
4. Ordenamiento en figuras compuestas, si diseñan las figuras para una sola columna en el artículo en algunos casos concentran la composición de forma horizontal y produce que deba ser colocada en dos columnas, desaprovechando el espacio y causando problemas en la edición.
5. Colocación de tablas en figuras, la revista establece diferencias entre una y la otra y deben ser cumplidas.
6. Incorrecta identificación de la fuente o su falta, es de carácter obligatorio a fin de evitar el plagio.

Errores en Tabla

1. Colocación de pseudo-código o código en tablas, debe ser colocadas en Figura.
2. Colorear las Tablas, las tablas deben ser sencillas y diseñadas para facilitar su lectura.
3. La colocación de abreviaturas sin leyendas, dificulta la lectura o la imposibilita.
4. La colocación incorrecta de las unidades o su falta.
5. Ordenamiento incorrecto, produce dificultad de lectura o su imposibilidad.
6. Incorrecta identificación de la fuente o su falta, es de carácter obligatorio a fin de evitar el plagio.
7. Diseño incorrecto del tamaño de la Tabla, colocan columnas que resultan de operaciones básicas que no se justifican, columnas con un solo valor (injustificado).
8. El diseño de Tabla para una columna en el artículo debe ser el preferente ya que el uso de tablas de dos columnas injustificadas dificulta la edición y en algunos casos la lectura.
9. Uso de filas vacías.

Errores en ecuaciones

1. Uso de asteriscos como operador en el producto.
2. Uso de variables con muchas letras, dificulta o anula la lectura y dificulta la edición.
3. Inadecuada presentación, el uso de las ecuaciones en la revista es en una columna. En el caso de ecuaciones largas deben ser presentadas adecuadamente.
4. Numeración de las ecuaciones, las ecuaciones como elementos flotantes deben ser numeradas por que su posición depende del espacio en el artículo y deben ser referenciadas en el mismo. Las ecuaciones no flotantes no deben ser numeradas.
5. El orden inadecuado de las ecuaciones, produce dificultad de la lectura o su imposibilidad.
6. Uso de símbolos inadecuados, la revista exige el uso adecuado de la simbología.

Errores en la estructura del artículo

1. Inadecuada estructura, el artículo de la revista se divide en sección, subsección, subsubsección y párrafo, es obligatoria la numeración de la sección salvo en la sección de Agradecimiento que no lleva, siendo opcional la numeración en subsección y subsubsección. La jerarquización de la estructura debe ser respetada.
2. Inadecuado uso de los ambientes de listados, debe comenzar y terminar sin interrupciones. Cuando usamos estos ambientes reduce el ancho en el uso de la columna, debido a que son parte de un párrafo, deben ser usados razonadamente.

Errores en la metodología

1. Deficiencia en la presentación de la metodología, esto produce que se dificulte o se anule la comprensión del lector de las actividades que se reportan.
2. Información insuficiente, no permite o dificulta la evaluación y o reproducción de las actividades.

Errores en los resúmenes

1. Son muy extensos, distorsiona la presentación en la edición del artículo.
2. No refleja lo contenido en el artículo.
3. No se establecen en su contenido todo lo provechoso del mismo.

Errores en la bibliografía

1. Cualquier cosa a la bibliografía, la revista acepta lo que se clasifica como: a) Documento emitido por una institución reconocida, b) Reporte técnico avalado por una institución reconocida, c) Artículo en revista especializada, d) Libro, e) Manual, f) Congresos, g) Conferencias, h) Tesis de Pregrado o Postgrado y i) Estándares o reglamentos, avalados o exigidos por institución reconocida.
2. Insuficiente información en componente de la bibliografía.
3. La imposibilidad de verificación de un componente de la bibliografía, la revista exige la verificación.
4. Uso de estilo bibliográfico distinto del utilizado por la revista.
5. Datos incorrectos en autores, fechas, títulos, entre otras.

Errores en la redacción

1. Uso indiscriminado de mayúsculas, solo en mayúscula palabras al inicio de un párrafo, después de un punto, en el inicio de un título, en el nombre de un individuo o institución y en una unidad de medida en homenaje a un investigador.
2. Uso indiscriminado de las comillas, la revista no permite esto. Las comillas dobles en la cita textual de un documento.
3. Uso de punto decimal, en Venezuela por ley se debe usar la coma decimal.
4. Uso indiscriminado de negrillas.
5. Uso de fuentes de letras o símbolos distintas a las usadas en esta revista.
6. Uso de palabras en idiomas distinto al utilizado para redactar el artículo.
7. Párrafos muy cortos.

8. Párrafos muy largos.
9. No se entiende o es confuso, la revista no lo acepta.

Errores en palabras claves

1. Uso de palabra en lengua distinta al idioma que se usa.
2. Uso de palabras no vinculantes a tema seleccionado.

Hay instituciones como la Unesco, SKOS entre otras que están especializadas en este tema, y pueden dar orientaciones como: listas encabezamientos de materia, taxonomías, esquemas de clasificación, tesauros y cualquier tipo de vocabulario controlado.

Plagio

Plagio, la revista está en la obligación de evitar el plagio en cualquier forma posible.

3. Necesidad de plantilla para elaboración de los artículos

Justificar una nueva plantilla se presenta en tres partes uno problemas de la plantilla actual, dos el problema de recibir artículos realizados con procesador de palabras word y tercero las ventajas de contar con una planilla que *mitigue aún más la probabilidad de errores* en el proceso de edición del volumen.

Problemas de la plantilla actual (L^AT_EX)

- La plantilla actual para los artículos está realizada en clase documento article de L^AT_EX, eso impide la colocación de más de un artículo, menos aun un volumen de la revista Ingeniería UC.
- La plantilla actual está realizada en clase documento article que limita el número de elementos flotantes (Tablas y Figuras) obligando a extender manualmente la cantidad en algunos artículos.
- Los artículos realizados con la plantilla actual (que se elaboran por separado) al agruparlos para generar la revista pierden

el enlazamiento de las ecuaciones, Figuras, Tablas y referencias (bibliográficas o de secciones), bajando la calidad de la revista.

- La consolidación de los artículos con la plantilla actual requiere de la colocación manual de los números de páginas, esto causa molestias, aumenta el riesgo de errores y la corrección de los mismos.
- La plantilla actual tiene incompatibilidad con herramientas de L^AT_EX como subfigure por ejemplo, entre otros.
- La plantilla actual obliga la elaboración manual de índices de contenido, de autores o de palabras claves.
- Los paquetes de L^AT_EX utilizados requieren de actualización.

Problemas de recibir los artículos en archivos .doc

- Las dimensiones de las Figuras y Tablas al transformarlas al formato de la revista dos columnas pueden generar retrabajos e incomodidad de los autores y editores.
- La utilización de variados editores de ecuaciones al generar los archivos .doc podrían generar incompatibilidad, fallas en la transformación al formato de la revista y retrabajos que producen incomodidad a los autores y editores.
- La identificación de la estructura de los artículos (secciones, subsecciones, numeraciones, etc.) es colocadas de muy variadas maneras con estilos también muy variados lo que redundo en retrabajos y estimula las incomodidades en autores y editores.
- La presencia de códigos extraños o maliciosos en los artículos.
- La transformación de archivos al formato de la revista en muchos casos requiere de una depuración excesiva de los mismos.
- Muchas veces envían Tablas como Figuras, lo que produce retrabajos e incomodidades en autores y editores.

- Este tipo de archivos son muy permisivos y su transformación produce efectos extraños, retrabajos e incomodidades de autores y editores.
- La enorme cantidad de símbolos extraños que se presentan dificultan la edición de los artículos.
- Muchas versiones de estilos de bibliografías o errores en ellas.

Bondades de la plantilla nueva

- No hay limitaciones en objetos flotantes.
- Todos los índices se realizan de manera automática.
- Las numeraciones de páginas se realizan de manera automática.
- Permite de manera transparente la consolidación del volumen de la revista incluso con los tres números del volumen. La consolidación se realiza con el trabajo de cada artículo con muy poco esfuerzo.
- Mantiene los enlaces de las referencias de cualquier tipo, de cualquier cantidad de artículos sin problemas, clave para aspirar mejorar la clasificación de nuestra revista.
- Permite referencias de la primera y última página de cada artículo para su navegación, en el volumen de la revista.
- Existen dos plantillas, una para la solicitud de evaluación del artículo sin los logos y sin fecha de recibido ni de aceptado, y otra para los editores con los logos de la revista y fecha de recibido.
- Se actualizan los paquetes de L^AT_EX de fuentes, entre otros.
- Es posible utilizar comandos de L^AT_EX como subfigure, entre otros por ejemplo.

Aclaratoria

Utilizar una plantilla en la elaboración de un artículo ordena y favorece la realización del mismo, aunque exige un mínimo de conocimientos de L^AT_EX que tendrá que ser llenado por el autor:

- No existe una regla de oro ni procedimiento que asegure la elaboración de un artículo científico.
- La utilización de una plantilla como la propuesta solo favorece la elaboración de artículos científicos.
- La utilización de una plantilla como la propuesta, facilita las tareas de mejorar la clasificación de la revista y la posibilidad de mejorar la producción de la misma. Posibilidad de realizar volúmenes extraordinarios.
- Se requiere mejorar la evaluación de los artículos como medida en paralelo.

Requerimientos de paquetes para la plantilla nueva

El uso de paquetes de L^AT_EX indudablemente debe ser restringido a los que se utilizan en la nueva plantilla, los problemas que se generan de compilación o de incapacidad de uso con otros paquetes debe ser evitado. Se han colocado paquetes suficientes para el uso de acuerdo a la experiencia en los volúmenes, sin embargo hay que tener en cuenta:

- Es muy difícil establecer en un primer intento todos los paquetes necesarios para todas las necesidades de los autores de los artículos, por lo que es necesario establecer un mecanismo para recibir las necesidades de los autores.
- En un período perentorio pasar a utilización obligatoria de la plantilla. De donde se podría derivar la generación de entrenamiento para la utilización de la plantilla o venta del servicio de transformación de un artículo propuesto al formato de la plantilla.
- Utilización de archivos .bib para las bibliografías con bibtex con carácter obligatorio, se aprovecha de la enorme ayuda que se

presta a través de páginas como la de motor de búsqueda web google académico, servicio que prestan revistas científicas, editoriales, instituciones, etc. en donde se encuentran disponibles los bibtex de una inmensa cantidad de documentos científicos solo para copiarlos.

- Se deben generar estrategias desde la Universidad de Carabobo específicamente la Facultad de Ingeniería quien patrocina la Revista Ingeniería UC, para desarrollar los trabajos de investigación en ambiente \LaTeX y así poder formar los autores de nuestros artículos de mañana, como por ejemplo lo reportado por Mejías [4].

4. Referencias

- [1] Rafael Ferriols Lisart and Francisco Ferriols Lisart. *Escribir y publicar un artículo científico original*. Ediciones Mayo, S. A., 2005.
- [2] Alexander Arbey Sánchez Upegui. *Manual de redacción académica e investigativa: cómo escribir, evaluar y publicar artículos*. Católica de Norte Fundación Universitaria, 2011.
- [3] Francisco Moreno, Norma Marthe, and Luis Alberto Rebolledo. *Cómo escribir textos académicos según normas internacionales: APA, IEEE, MLA, VANCOUVER e ICONTEC*. Ediciones Uninorte, 2010.
- [4] Carlos Mejías, Ahmad Osman, Paulino Del Pino, and Alfonso Zozaya. Letter to the editor: Environment for the edition and writing thesis of the school of engineering of telecommunications of the university of carabobo. *Revista Ingeniería UC*, 24(1):1–11, 2017.

System of public transportation of passengers, its chaining and displacement towards the commerce

Diego López C., Fernando Torres D.*, Shirley Núñez G. y Gabriel Cevallos U.

Planificación y Gestión del Transporte Terrestre, Instituto Superior Tecnológico "Tsa'chila", Santo Domingo, Ecuador.

Abstract.- Analyze the reduction of passengers in public transportation in Santo Domingo de Los Colorados, (Ecuador), and the dynamization of consumer goods trade as a result of the deconcentration of the city, the new construction of road infrastructure, the restructuring of routes and frequencies who did not consider these changes. The results detail aspects of food sales trade as well as other consumer items, and their relationship with public transport, distinguish a decrease in these activities in the center of the city, traffic congestion and citizen insecurity, which decreased the travel demand. The research carried out analyzed the restructuring process of the public transport system in Santo Domingo de los Colorados that was achieved by the competent authority, without considering that the new road infrastructure in the periphery would produce a change in the mobility of the users, the new road infrastructure increased private and commercial investment in these residential sectors, increasing the displacement on foot of its inhabitants to new businesses, without the need to use urban transport, to acquire them in the city center, bringing impacts on commercial activity and on users with the increase in fare.

Keywords: public transport; chain; displacement; trade.

Sistema de transporte público de pasajeros, su encadenamiento y desplazamiento hacia el comercio

Resumen.- En este artículo se analiza la reducción de pasajeros en el transporte público de Santo Domingo de Los Colorados, (Ecuador), la dinamización del comercio de bienes de consumo como resultado de la desconcentración de la ciudad, la nueva construcción de infraestructura vial, la reestructuración de rutas y frecuencias que no consideraron estos cambios. Los resultados detallan los aspectos del comercio de ventas de alimentos así como otros artículos de consumo, y su relación con el transporte público, destacando una disminución de esas actividades en el centro de la urbe, la congestión vehicular e inseguridad ciudadana, lo cual redujo la demanda de viajes. La investigación realizada analizó el proceso de reestructuración del sistema de transporte público en Santo Domingo de los Colorados que realizó la autoridad competente, sin considerar que la nueva infraestructura vial en la periferia, produciría un cambio en la movilidad de los usuarios, la nueva infraestructura vial incrementó la inversión privada y comercial en estos sectores residenciales, aumentando el desplazamiento a pie de sus habitantes hacia los nuevos negocios, sin la necesidad de utilizar el transporte urbano, para adquirirlos en el centro de la ciudad, trayendo impactos sobre la actividad comercial y sobre los usuarios con el incremento de las tarifas.

Palabras claves: transporte público; encadenamiento; desplazamiento; comercio.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: Abril 2018

1. Introducción

En los últimos años en la ciudad de Santo Domingo de los Colorados cabecera cantonal de la Provincia Santo Domingo de los Tsáchila, desde Enero del 2015 a Julio del 2017 se han apreciado

cambios en el sistema de transporte público y en los hábitos de movilidad de sus habitantes para satisfacer las demandas de bienes y servicios.

La mayor inversión de infraestructura vial se ha dado en sectores residenciales, más que en comerciales, cambiando los hábitos de compra de los pobladores, quienes ahora prefieren comprar en sus propios sectores antes que trasladarse al centro de la ciudad.

Por otra parte los inversionistas vieron que al haber mejorado el acceso a estos sectores y que el servicio de buses desmejoró, existía

* Autor para correspondencia:

Correo-e: fatorresd@gmail.com (Fernando Torres D.)

una nueva oportunidad de negocios, por lo que aumentó la construcción de locales comerciales y con ello nuevos negocios sobre todo en áreas como alimentos y víveres a través de despensas, restaurantes y ferias libres. Reduciendo el encadenamiento en el desplazamiento que debe generar el servicio de transporte público en la economía de Santo Domingo de Los Colorados.

En el centro de la ciudad se encuentra las zonas comercial, financiera y de servicios públicos, áreas que no han tenido una adecuada planificación que ordene el transporte, el tránsito y la seguridad vial, en este sector de alta congestión vehicular y peatonal no se respetan las paradas, no existe carriles exclusivos para el transporte público de pasajeros, ni aceras con plataformas para el tránsito de personas con discapacidades, además que ahí se concentran cuatro de las cinco operadoras de buses, el mayor tráfico de taxis y vehículos particulares, el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) en la avenidas Quito alcanza los 30.134 vehículos y la avenida 29 de Mayo los 30.156 vehículos, siendo estas las avenidas que cruzan el centro de la ciudad, lo cual representa un volumen vehicular de aproximadamente 2500 vehículos en las horas de máxima demanda, de acuerdo a la relación porcentual establecida según estudios de tránsito en vías colectoras de las urbes en desarrollo realizadas entre el 05 y 15 de junio del 2017 por los estudiantes de la Carrera de Planificación y Gestión del Transporte Terrestre del Instituto Superior Tecnológico Tsáchila de la ciudad de Santo Domingo.

La meta de este trabajo es un estudio exploratorio para examinar la situación actual que no ha sido abordada anteriormente. El principal aporte de este estudio consiste en establecer la problemática de las interacciones entre transporte e individuos, desde una dimensión social, espacial y cuantitativa.

Para el logro de la meta fue analizado el proceso de reestructuración de un sector del sistema de transporte público por parte de la autoridad, el desarrollo comercial y la movilidad de las personas.

Estudio que es pertinente para que los organismos competentes puedan hacer posibles correctivos en la planificación del transporte urbano.

2. Redistribución de rutas

En la nueva redistribución de rutas, la demanda de pasajeros se redujo en un 11,96 % en el lapso de Enero 2015 a Julio 2017, según cifras publicadas en Resoluciones EPMT-SD-VQM-RSE-2015-001 y EPMT-SD-GG-HVV-2017-RCT-URBANO del ente regulador del Transporte, tránsito y seguridad vial del cantón Santo Domingo. Así mismo, el costo del pasaje se incrementó de 0,25 a 0,30 centavos, los tiempos de demora para el traslado aumentaron y en muchos casos los usuarios deben utilizar dos buses para dirigirse al mismo destino, la inseguridad (ver Tabla 1) que hay en el transporte, en las calles y en los mercados han reducido los viajes, así como el aumento en la congestión vehicular ocasionando que las personas prefieran comprar en sus propios barrios o lugares de residencia.

Tabla 1: Niveles de inseguridad ciudadana.

Sitio	% Inseguridad
Transporte Público	12,20 %
En el mercado	11,04 %
En la calle	11,01 %
Las carreteras	9,69 %
En el vehículo	7,53 %
En la casa	3,48 %
Otros	45,04 %

Fuente: Ecuador en Cifras, encuesta de victimización y percepción de inseguridad 2011.

Con la nueva Constitución Política del 2008 de la República del Ecuador, se consolidó una nueva organización Político-Administrativa a través de un nuevo régimen de desarrollo en territorio, incrementando las potencialidades y capacidades a los cantones o Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, mediante un modelo de autonomías y descentralizaciones basado en la planificación, regulación y control del tránsito, el transporte terrestre y la seguridad vial [1].

El Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Santo Domingo (GAD-SD) asumió las competencias en transporte, tránsito y seguridad vial [2], entre estas, el sistema de transporte público de pasajeros en el ámbito intracantonal (urbano-rural) [3], el mismo que funcionó sin ningún

cambio en sus rutas y frecuencias hasta junio del 2016 fecha en que se restructuraron cambiando las mismas en sus recorridos afectando a las demandas de pasajeros que estaban atendidas en las rutas anteriores. Sin embargo, los nuevos cambios afectaron a los transportistas y la población en las diversas dinámicas urbanas, incluyendo su estructura urbana y la movilidad de las mismas.

Los cambios propuestos en el Sistema de Transporte Público de Pasajeros se basaron en el número de unidades por operadora para su distribución y partición del mercado en la ciudad, de esta forma el número de rutas se ajustaron en 24 rutas y no en las 32 [4] que existían del sistema anterior que antes recorrían aquellas zonas que poseían los flujos de pasajeros suficientes como para sostenerlo económicamente.

Tabla 2: Transporte Público de Pasajeros, Santo Domingo (Sector Urbano).

Número de Pasajeros	Población	Número de unidades	Número de rutas	Año
247.223	418.957	394	32	2015
229.207	426.910	356	24	2016
218.634	434.849	343	24	2017

Fuentes: Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo, 2016-2017. Instituto Superior tecnológico Tsáchila, 2016. Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, INEC, 2010

La Tabla 2 muestra las nuevas rutas, la cuales fueron distribuidas de acuerdo a las nuevas demandas de pasajeros generados por el crecimiento urbano de la ciudad.

Los efectos que ocasionó el nuevo sistema de distribución de rutas y frecuencias a los usuarios, empresarios del transporte y al comercio de la ciudad desde junio del 2016 hasta julio del año 2017 entendiéndose que el transporte de pasajeros en el sector urbano busca mejorar y dinamizar la economía a través de que las personas satisfagan sus necesidades de desplazamientos mediante traslados cortos (etapas) a bajos costos fortaleciendo las áreas comerciales a lo largo y ancho de la ciudad especialmente en el entorno de sus recorridos donde se desarrollaran actividades comerciales incluyendo las ventas ambulantes,

la renovación de comercios deteriorados y la inserción de otros nuevos.

Las ventas en el sector comercial de Santo Domingo a diciembre del 2016 fueron de 1.411.227.239 millones de dólares mientras que para diciembre del 2017 se proyectan ventas en 1.362.061.911 millones de dólares, es decir una reducción en 3,5 %.

La nueva estructuración generó largas rutas, algunas de ellas sin la demanda suficiente ni para cubrir los costos operativos, otras muy rentables, y una sobreoferta de transporte en las horas de baja demanda, así como un incremento de la tarifa de 0,15 tarifa reducida y 0,30 centavos la tarifa completa. Este fue el resultado del estudio realizado por el ente regulador para la asignación de rutas y frecuencias de buses en el que no se realizó una investigación de campo que señale las necesidades reales de la población. Actualmente operan 343 buses en el sector urbano (Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo, 2017).

Ante tal dificultad, la Empresa Pública Municipal de Transporte, desde junio del 2016 fecha en que entro en vigencia el nuevo sistema de rutas y frecuencias ha realizado varios ajustes en las mismas porque el servicio no ha mejorado y la rentabilidad en las operadoras de buses sigue disminuyendo.

Los resultados generados entre junio del 2016 y julio del 2017 están en la Tabla 3, éstos demuestran claramente que las nuevas rutas asignadas han afectado la demanda en las cinco operadoras.

Para el cálculo de la rentabilidad financiera se ha considerado como tarifa promedio 0,27 centavos, la Tabla 2 muestra su desagregación.

Los ingresos obtenidos por unidad y por operadora indican claramente que la demanda estimada por la Empresa Pública de Transporte Santo Domingo está sobrevalorada (ver Tabla 3), por tanto su rentabilidad ha sido afectada, considerando que los costos operacionales en promedio por kilómetro recorridos son de 1,05 dólares con un promedio diario de 170 kilómetros de recorrido, es decir 178 dólares en promedio diario.

Estas cifras demuestran que la nueva asignación

Tabla 3: Cantidad de pasajeros por bus de cada operadora en relación al número promedio de las cinco operadoras.

Fecha	N° Pasajeros					
	promedio por bus	Operadora Río Toachi	Operadora Trans Tsáchila	Operadora Ejecutrans	Operadora Trans Metro	Operadora Rumiñahui
Junio-Noviembre, 2016	659	522	519	808	653	848
Diciembre 2016-Julio 2017	616	468	570	834	556	702
Julio-Diciembre, 2017	637	570	669	702	637	607

Fuentes: Cálculo en base a datos, Resolución. Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo (EPMT-SD). No.EPMT-SD-VQM-RSE-2015-001; EPMT-SD-VQB-R-SO-2016-06-29-03; Consultoría DL Nov.2016; EPMT-SD-GG-HVV-2017-072-RCT-URBANO).

Tabla 4: Cálculo tarifa promedio.

	%	valor \$
Tarifa completa	78	0,30
Tarifa reducida	22	0,15
Tarifa promedio		0,27

Fuentes: Cálculos en base a datos del Plan de mejoramiento del transporte urbano consultoría contratada por la Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo No. CCD-EPMT-SD-004-2015

de rutas en relación a los ingresos promedios no garantiza rentabilidad, es por eso que existen rutas rentables y rutas que no llegan al punto de equilibrio.

Las Tablas 6 y 7 muestran el comportamiento financiero de la ruta con menor y mayor ingreso.

La nueva redistribución de rutas ha establecido rutas que generan pérdida por lo cual es necesario establecer un nuevo estudio de necesidades de tipos de transporte y de rutas para beneficio de los transportistas y de los usuarios.

El sistema de Transporte Público de Pasajeros, representa uno de los sectores más importantes que permite la movilidad de las personas dinamizando la economía, en Ecuador este servicio es considerado estratégico y podrá ser prestado por el estado u otorgado mediante contrato de operación a operadoras legalmente constituidas.

El estado garantiza la prestación del servicio de

transporte público en forma colectiva y/o masiva, el ámbito de acción puedes ser interprovincial, intraprovincial e intracantonal, el primeros y el segundo es regulado por la Agencia Nacional de Tránsito, el segundo por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales [5].

El transporte intracantonal cubre el servicio dentro de los límites de cada cantón, por tanto áreas urbanas y rurales. Asimismo, cada Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal cuenta con una dirección, jefatura o empresa municipal para que planifique, regule y controle [5].

En el cantón Santo Domingo, la planificación y gestión del transporte de pasajeros se basa en un sistema colectivo sustentado en recorridos en rutas o líneas asignadas, con paradas y un sistema de tarifa no integrado a otras rutas, por lo que el usuario para trasladarse a un sitio diferente deberá utilizar otro bus y pagar un nuevo pasaje. Sin embargo el Plan de Movilidad recomienda avanzar a un sistema de transporte integrado con tarifa única, el mismo que aún no se lo ha ejecutado [6].

Los cambios en las rutas se han seguido dando debido a que la demanda en cada una de ellas no se ajusta a la realidad, la infraestructura vial en el área urbana se encuentra en buen estado en un 30 % asimismo, el 90 % de viajes se generan el centro de la ciudad y el 70 % del centro de la ciudad está invadido por comerciantes informales.

Tabla 5: Ingresos promedios diarios por bus y operadora.

Fecha	Ingreso					
	Promedio por bus	Operadora Río Toachi	Operadora Río Toachi	Operadora Río Toachi	Operadora Río Toachi	Operadora Río Toachi
Junio-Noviembre 2016	178 \$	141 \$	140 \$	218 \$	176 \$	229 \$
Diciembre 2016-Julio 2017	166 \$	126 \$	154 \$	225 \$	159 \$	189 \$
Julio-Diciembre 2017	172 \$	154 \$	181 \$	190 \$	172 \$	164 \$

Fuentes: Cálculos en base a datos del Plan de mejoramiento del transporte urbano consultoría contratada por la Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo No. CCD-EPMT-SD-004-2015 y la consultoría Análisis del Transporte Urbano de Pasajeros en la ciudad de Santo Domingo de la Cooperativa de Transporte de pasajeros Río Toachi, realizada por el autor.

Tabla 6: Ruta con Menor Ingreso (Río Verde-EPACEM-Centro).

Fecha	Ingreso \$		Variación \$
	P_{D-B-P}	R_{D-B}	
Junio-Noviembre, 2016	178	78	-100
Diciembre 2016-Julio 2017	166	59	-107
Julio-Diciembre, 2017	172	51	-121

P_{D-B-P} : promedio diario por bus planificado.

R_{D-B} : recaudado diario por bus.

Fuentes: Cálculos en base a datos del Plan de mejoramiento del transporte urbano consultoría contratada por la Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo No. CCD-EPMT-SD-004-2015 y la consultoría Análisis del Transporte Urbano de Pasajeros en la ciudad de Santo Domingo de la Cooperativa de Transporte de pasajeros Río Toachi, realizada por el autor.

Tabla 7: Ruta con Mayor ingreso (Juan Eulógio-Santa Marta).

Fecha	Ingreso \$		Variación\$
	P_{D-B-P}	R_{D-B}	
Junio-Noviembre, 2016	178	1.545	1.367
Diciembre 2016-Julio 2017	166	878	712
Julio-Diciembre, 2017	172 \$	2.427	2.255

P_{D-B-P} : promedio diario por bus planificado.

R_{D-B} : recaudado diario por bus.

Fuentes: Cálculos en base a datos del Plan de mejoramiento del transporte urbano consultoría contratada por la Empresa Pública Municipal de Transporte Santo Domingo No. CCD-EPMT-SD-004-2015 y la consultoría Análisis del Transporte Urbano de Pasajeros en la ciudad de Santo Domingo de la Cooperativa de Transporte de pasajeros Río Toachi, realizada por el autor.

3. Metodología

Para el logro de la meta exploratoria fue analizado al sistema colectivo de transporte y el comercio de la ciudad.

3.1. Recopilación de datos

Aforos de vehículos, encuestas domiciliarias, de ascensos y descensos en buses, entrevistas, gerentes, autoridades del cantón, entre otros. Las encuestas fueron validadas por profesores de la carrera de Planificación y Gestión del Transporte Terrestre del Instituto Superior Tecnológico “Tsáchila” y profesionales expertos que trabajan en el área de tránsito en la Empresa Pública de Transporte Terrestre de Santo Domingo (EPMT-SD), con el propósito de evaluar el nivel de redacción y comprensión de la información solicitada, y complementar el diagnóstico para la investigación realizada, donde se considera: si el instrumento (encuesta) satisface el propósito de la investigación, si el número de ítems es adecuado, si están presentados de forma lógica y secuencial y si la presentación es la adecuada.

3.2. Procesamiento de datos

Manipulación de la información, TPDA, estadísticas referentes a necesidades, niveles de ingresos, económicos, educación, orígenes y destinos, entre otros.

4. Análisis y Discusión de Resultados

La investigación realizada en este estudio analizó el proceso de restructuración de un sector del sistema de transporte público en Santo Domingo de Los Tsáchilas por parte de la autoridad competente, impulsada por el desarrollo de nueva infraestructura vial hacia la periferia, esto produjo un cambio en el patrón de movilidad de los usuarios, ya que la nueva facilidad vial permitió el desplazamiento de las rutas, desde y hacia unas nuevas zonas en desarrollo de la periferia, trayendo impactos sobre la actividad urbana, comercial durante el periodo 2016-2017 y sobre una parte de los usuarios con el incremento de las tarifas.

Siendo el transporte público el catalizador en el proceso de encadenamiento en los desplazamientos de la población y no un obstáculo a ese desarrollo, como ocurrió, las nuevas rutas asignadas redujeron el número de viajes diarios en 11,96 % generando pérdidas para este sector. Asimismo los inversionistas privados invirtieron en la edificación de nuevos locales comerciales y los emprendedores al ver un desarrollo en estos sectores de la ciudad invirtieron en nuevos negocios como restaurantes y bodegas.

Este escenario pone en evidencia que el transporte público moviliza el flujo de personas en la ciudad para que estas realicen actividades económicas, por tanto un reajuste de rutas puede aumentar o disminuir las transacciones financieras y comerciales en los sectores de la ciudad.

Los sectores céntricos de la ciudad que son los generadores de viajes como mercados municipales, han sufrido una reducción de un 30,5 % en sus ventas, según datos obtenidos en encuesta realizada entre el 10 y 12 de julio del 2017 por los estudiantes de la Carrera de Planificación y Gestión del Transporte Terrestre del Instituto Superior Tecnológico Tsáchila de la ciudad de Santo Domingo por lo que ha hecho que muchos locales hayan cerrado, generándose una crisis social en este sector, a pesar que estos han sido remodelados.

Esta realidad ha ocasionado que los lugares residenciales o de origen de la ciudad hayan experimentado un importante crecimiento comercial en ciertos negocios sobre todo en los de consumo

masivo y servicio de comida rápida, por lo que las personas han dejado de movilizarse a los lugares que frecuentaban antes del cambio de rutas en junio del 2016 y de la construcción de nuevas vías asfaltas, tal es caso de la avenida la Lorena donde la construcción de nuevos locales se incrementó en un 52 %, los clientes de estos comercios que viven en este sector representan el 68 % [7], esto sin duda ha disminuido la posibilidad de generar un aumento en el encadenamiento por el desplazamiento de pasajeros, reduciendo la necesidad de movilizarse a los lugares de mayor atracción comercial de la ciudad a satisfacer sus necesidades, muchos de estos espacios están fuera de las rutas del transporte urbano de pasajeros.

El transporte público como el transporte privado permite el encadenamiento del desplazamiento, asumiendo formas distintas en cada uno de ellos. De esta manera, destaca que quienes poseen vehículos particulares pueden determinar las rutas y detenerse en todos aquellos puntos que les parezcan convenientes; el automóvil entrega flexibilidad [8].

Tabla 8: Datos comercio Santo Domingo año 2016.

DATOS	
Total Población	426.910
Población económicamente activa	196.156
Trabajadores (Sector formal)	25.954
Trabajadores (sector informal)	25.414
Total Trabajadores	51.368

Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de Santo Domingo, Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC). y Camara de Comercio de Santo Domingo

El comercio en Santo Domingo tuvo un crecimiento acelerado, en el año 1.965 los comerciantes se organizaron como Asociación de Comerciantes, luego en el año 1.967 con la provincialización de Santo Domingo, se jerarquizó como Cámara de Comercio con lo cual esta actividad se formalizó en la ciudad, pero a partir de 1980 el comercio informal ha ido creciendo en toda de la ciudad hasta la fecha actual (ver Tabla 8).

Con el desarrollo del comercio la necesidad de transporte aumenta ya que las personas lo requieren para movilizarse hacia los lugares de su interés y así satisfacer sus necesidades, es por ello que la demanda en el transporte público de pasajeros aumenta, de igual manera aumenta la demanda de infraestructura vial, señalización horizontal y vertical, sin embargo como aspecto negativo también ha surgido el aumento del comercio informal, la ocupación de vías y la congestión vehicular ha aumentado, con lo que se hace indispensable su reubicación de este tipo de comercio en lugares adecuados como centros comerciales populares. A diciembre del 2016 en la ciudad el número de locales comerciales registrados con Patente Municipal ascendió a 33.385 unidades según información de Avalúos y Catastros del Gobierno autónomo Municipal de Santo Domingo, 2016.

Este estudio se analiza el crecimiento comercial en cinco sectores donde el Gobierno Autónomo Municipal de Santo Domingo construye calles, avenidas, aceras, señalización, obras de agua potable, entre otros, lo cual sin duda mejoro el nivel de vida de los habitantes de esos sectores residenciales de alta densidad, situados fuera del centro de la ciudad, con ello la inversión privada en la construcción de nuevos locales comerciales y negocio creció (ver Tabla 9), cambiando los hábitos de movilidad de sus pobladores, que ahora tienen la alternativa de proveerse de estos bienes y servicio con mayor comodidad, en menor tiempo, sin pagar el costo de movilizarse al centro de la ciudad.

Los promedios de estos cinco sectores: locales abiertos, cerrados, en construcción, los clientes nos indican claramente que existe una sobre oferta de locales comerciales, sin embargo se siguen construyendo, la mayoría de clientes son del mismo sector, siendo esta la causa de porque han reducido el número de viajes en transporte público de pasajeros hacia el centro de la ciudad.

Los resultados de la encuesta muestran otro dato importante es el que los locales nuevos que se han abierto solo el 38 % de estos permanecen más de 12 meses, los demás sierran o se movilizan a otros sectores a iniciar de nuevo (ver Tabla 10). La encuesta fue realizada entre el 10 y 12 de

julio del 2017 por los estudiantes de la Carrera de Planificación y Gestión del Transporte Terrestre del Instituto Superior Tecnológico Tsáchila de la ciudad de Santo Domingo).

Además, el Servicio de rentas Internas registra de entre el 2016-2017 una disminución promedio en las ventas del sector comercial del 3,5 %.

Hay que recordar que la ciudad está zonificada de acuerdo al Plan de Desarrollo Orgánico y Territorial, en zonas Residenciales de densidad alta, Vivienda de interés social, Comercial y Residencial, Residencial de densidad alta y comercial, Comercial y servicios, residencial densidad media y Residencial densidad baja. Los sectores analizados en este estudio están calificados como zonas residenciales de densidad alta.

5. Conclusiones

La movilidad de las personas en el transporte público de pasajeros depende de la calidad del servicio, el costo y que estas estén al paso de los lugares de destino, estos factores son los que atraen o desestiman el desplazamiento y encadenan el servicio público de pasajeros ya que cuando los recorridos alejan a los usuarios de sus lugares de destino, las actividades comerciales bajan sus ventas y las personas demandan menos del servicio de transporte. Las personas se movilizan en respuesta a una necesidad y el servicio del transporte público corresponde un medio para hacerlo.

El crecimiento comercial de bienes de bajo valor en la ciudad se desconcentro de las zonas comerciales típicas, como producto de la inversión en infraestructura vial en zonas residenciales de alta densidad poblacional, razón por la que la demanda por el servicio de transporte de pasajeros se redujo.

Las zonas comerciales y el sistema de transporte de pasajeros requieren de una nueva planificación urbana.

Los centros de atracción de bienes de bajo valor como los mercados municipales ubicados en zonas comerciales del centro de la ciudad como víveres han disminuido sus ventas en un 35 %.

Tabla 9: Cantidad de locales comerciales en sectores de la ciudad año 2016.

Sectores	Locales Abiertos	Locales cerrados	Locales en construcción	Total	Longitud (km)	Clientes dentro del sector	Clientes fuera del sector
La Lorena	154	29	6	189	2,7	68 %	32 %
30 de Junio	65	60	10	135	2	58 %	42 %
Ciudad Nueva	57	44	1	102	1,2	66 %	34 %
Plan de Vivienda Municipal	159	81	5	245	3,9	68 %	32 %
Coop. El Proletariado	25	20	5	50	1,5	75 %	25 %

Fuente: Instituto Superior Tecnológico Tsáchila, cálculos del autor.

Tabla 10: Promedios determinados en los locales comerciales.

Sectores con nueva infraestructura	Locales abiertos	Locales cerrados	Locales en construcción	Total	Clientes del sector	Clientes fuera del sector	Total clientes
Promedio	63,8 %	32,5 %	3,7 %	100 %	67,0 %	33 %	100 %

Fuente: Cálculos de los autores.

Por otra parte, el valor está estrechamente relacionado con la distribución geográfica de los bienes: los bienes de poco valor usualmente poseen una distribución homogénea por la ciudad, no es necesario recorrer grandes distancias para obtenerlos, mientras que los bienes de alto valor son escasos y su obtención requiere desplazamientos mayores. La distribución geográfica hace que el valor de los bienes sea sensible a fenómenos como la congestión o el crecimiento en extensión de las ciudades, pues ambas condiciones distorsionan los tiempos necesarios para realizar los desplazamientos y obtenerlos. Estas últimas acotaciones indican que las personas son altamente sensibles al valor temporal de los desplazamientos, la sensibilidad es tal que en muchos casos prefieren no suplir la necesidad porque el tiempo requerido para ello es demasiado prolongado.

La reestructuración de rutas del transporte público redujo la demanda diaria de pasajeros en 11,96 % lo cual afectó a las empresas privadas de transporte y al comercio ubicado en el centro de la ciudad, como recomendación derivada de esta consecuencia los mercados populares deben reubicarse.

La nueva infraestructura vial en los últimos dos años se construyó en un 90 % las zonas periféricas residenciales de densidad alta, lo que ocasionó que los emprendedores invirtieran en estos sectores, sobre todo en la construcción de locales comerciales y en nuevos negocios de ventas de bienes de bajo valor como víveres, comida rápida entre otros.

El actual sistema colectivo de transporte de pasajeros no satisface las demandas actuales de sus usuarios y operativamente permite que las rutas y frecuencias de las cinco operadoras se crucen ocasionado enfrentamientos entre varias unidades en sus recorridos.

Los recorridos de las diferentes rutas requieren ahora de más tiempo, también el costo del pasaje se incrementó y los usuarios deben utilizar dos buses (hacer un transbordo) para dirigirse al mismo destino.

La congestión vehicular y peatonal en el centro de la ciudad ha ocasionado que las personas prefieran comprar en sitios cercanos a sus propios barrios o lugares de residencia.

Existen operadoras del Sistema de Transporte Público con problemas económicos por la dismi-

nución de la demanda de pasajeros, con algunas rutas que generan menores ingresos y otras rutas con mayores ingresos, se recomienda una reorganización de rutas para asignar demanda cruzada y evitar enfrentamientos entre conductores, por obtener mayor cantidad de pasajeros.

Es necesario, evaluar la reestructuración de rutas más operativas, calibrando la demanda de pasajeros y evaluando las tarifas con la aparición de los nuevos transbordos.

La Empresa Pública Municipal de Transporte como ente regulador y planificador del transporte en la ciudad debe establecer un sistema integral de transporte de pasajeros, de acuerdo a las nuevas demandas de movilidad de la ciudad que garantice rentabilidad a las empresas operadoras, disminuya los tiempos de viajes a los pasajeros y aumente la seguridad en el centro de la ciudad para que los peatones realicen sus compras con más tranquilidad, esto traerá consecuencias positivas, como: desconcentrar el casco central de la ciudad, disminuir la congestión vehicular en las Av. Quito y 29 de mayo, reducir la contaminación del aire y sónica, generar espacios peatonales, creación de espacios en otros sitios de la periferia de la ciudad, se debe concebir un plan municipal para la atracción hacia lugares de áreas comerciales, donde se incentive para el desarrollo de nuevas inversiones

6. Referencias

- [1] Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador. Constitución de la República del Ecuador. *Gaceta Nacional de Ecuador*, 2008.
- [2] Agencia Nacional de Tránsito. Resolución No 109-DIR-2013-ANT, Incremento de rutas y frecuencias a favor de la cooperativa de transporte interprovincial de pasajeros en buses “Santo Domingo”. *Gaceta Nacional de Ecuador*, 2013.
- [3] Asamblea Nacional de Ecuador. Ley orgánica de transporte tránsito y seguridad vial. *Gaceta Nacional de Ecuador*, agosto 2008.
- [4] Empresa Pública Municipal de Transporte de Santo Domingo de los Tsáchilas. Resolución No. EPMT - SD - 66-HVV - 2016 - 09 - RCT - Urbano. *Gaceta Nacional de Ecuador*, junio 2016.
- [5] Asamblea Nacional de Ecuador. Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, Título

III Los ámbitos del transporte. *Gaceta Nacional de Ecuador*, Agosto 2008.

- [6] R Torres. Plan de movilidad sustentable, transporte y tránsito para el Cantón Santo Domingo. Technical report, Gobierno Autonomo del Cantón Santo Domingo, Santo Domingo, Tsáchila, Ecuador, 2011. Braxton, Consultora.
- [7] K. V. Lucero. La movilidad en el ámbito urbano en el sector de la av. La Lorena. Santo Domingo. Trabajo de grado, Instituto Superior Tecnológico Tsáchila, Santo Domingo, Tsáchila, Ecuador, 2017.
- [8] Alejandro Cortés Salinas and Cristhian Figueroa Martinez. Encadenamiento de despalazamiento: el transporte público de Santiago como productor de actividad comercial. *Revista Transporte y Territorio*, (7):166–183, 2012.

Characterization spatio-temporal land use in watershed using geomatic techniques

Bettys Farias^a, Adriana Márquez^a, Demetrio Rey Lago^b y Edilberto Guevara^{*,c}

^aCentro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bInstituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^cTribunal Nacional de Resolución de Controversias Hídricas. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú.

Abstract.- This research deals with the characterization of the soil and land cover applications that have occurred in the basin of the Pao River between the years 1986 and 2016. The methodology includes: 1) acquisition of two images of satellites Landsat, L5TM and L8OLI. 2) preliminary processing of images. 3) application of the technique of postclasificación for the detection of cambios. 4) assessment of accuracy temática. 5) validation of the classification of images. The study shows that classes presenting increments are: urban: - 1.37 %, agriculture: - 22.99 %, declines occur in classes: agricultural: 1.12; water: 0.55 %; vegetation: 8.1 %; denuded soil: 9.66 %; shadow: 2.28 %. As a result in this research has been generated a map of land uses providing information that leads to the conclusion that the Pao River basin has undergone changes in the use and land cover, the increase in urban use is predominantly located north i. in the upper basin of the Pao River, between the towns of Naguanagua and Valencia.

Keywords: remote sensing; detection of changes; land uses; geomatics.

Caracterización espacio-temporal del uso de tierras en cuencas mediante técnicas geomáticas

Resumen.- Esta investigación aborda la caracterización de los usos del suelo y la cobertura terrestre que han ocurrido en la cuenca del río Pao entre los años 1986 y 2016. La metodología incluye: 1) Adquisición de dos imágenes de satélites Landsat, L5TM y L8OLI. 2) Procesamiento preliminar de imágenes. 3) Aplicación de la técnica de postclasificación para la detección de cambios. 4) Evaluación de la exactitud temática. 5) Validación de la clasificación de imágenes. El estudio muestra que las clases que presentan incrementos son: urbano: -1.37 %, agropecuario: -22.99 %, los descensos ocurren en las clases: agrícola: 1.12; agua: 0.55 %; vegetación: 8.1 %; suelo deforestado: 9.66 %; sombra: 2.28 %. Como resultado en esta investigación se ha generado un mapa de usos del suelo proporcionando información que permite concluir que la cuenca del río Pao ha sufrido cambios en el uso y cobertura de la tierra, el incremento de uso urbano se ubica predominantemente al norte, es decir en la cuenca alta del río Pao, entre los municipios Naguanagua y Valencia.

Palabras claves: teledetección; detección de cambios; usos de la tierra; geomática.

Recibido: octubre 2017

Aceptado: febrero 2018

1. Introducción

En la mayor parte de los territorios, las actividades humanas (agricultura, explotación forestal, urbanización, entre otros.) son los motores principales de la dinámica del paisaje.

La heterogeneidad percibida en un momento o en un lugar dado es el resultado de la heterogeneidad espacio-temporal producida por las restricciones ambientales, los procesos ecológicos y las perturbaciones de origen humano o natural. El ser humano modifica el territorio para llevar a cabo actividades productivas o construir viviendas. Estas modificaciones producen importantes cambios en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, afectando en última instancia la propia calidad de vida de las personas [1]. En las últimas décadas el cambio de cobertura del suelo

* Autor para correspondencia:

Correo-e: eguevara99@gmail.com (Edilberto Guevara)

se ha acelerado como resultado de la presión de la población y el desarrollo económico. Es necesario comprender y controlar el impacto humano sobre el ambiente biofísico, así como participar y responder a los impactos ambientales de la humanidad [2]. El motor de estas transformaciones sobre el medio han sido las fuerzas sociales y económicas que interactúan de una manera muy compleja sobre los sistemas naturales como fuerzas impulsoras en la mayor parte del mundo [3]. En la actualidad la teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta y determinante a la hora de establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, de manera especial en evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales. Un aporte destacado de la teledetección espacial al estudio medioambiental es su capacidad de seguir procesos dinámicos ya que las imágenes se captan por un sensor que observa la tierra desde una órbita estable y repetitiva [4]. La aplicación de técnicas de teledetección en conjunción con los sistemas de información geográfica (SIG) para la identificación, estudio y análisis de los cambios de las coberturas de suelo han supuesto un importante avance en cuanto al detalle y extracción de clases espectrales e informacionales en un determinado área de estudio [5].

Este estudio tiene como objetivo realizar una caracterización del uso de la tierra en la cuenca del río Pao durante los años 1986 y 2016, para determinar la zona de la cuenca que posea más densidad demográfica para la implementación de un plan de gestión de riesgos, en este estudio se utiliza información proveniente de satélites, así como las técnicas geomáticas que son un conjunto de tecnologías geoespaciales y programas informáticos especializados para el análisis de los datos y su representación espacial [6], se utilizó el proceso de clasificación supervisada, fundamentada en el previo conocimiento de las clases y de estadísticos que se relacionan a cada clase espectral de la imagen [7].

2. Área de estudio

Para este estudio se ha seleccionado la cuenca del río Pao, cubre una superficie de 3019 km², distribuida entre los estados Carabobo (34.96 %), Cojedes (9.48 %) y Guárico (0.0018 %).

Se extiende entre las latitudes norte 9°33'38.991", 10°20'29.963", longitudes oeste 68°17'35.54", 67°48'319.348". Las elevaciones de la cuenca del río Pao varían desde 1788 hasta 119 msnm.

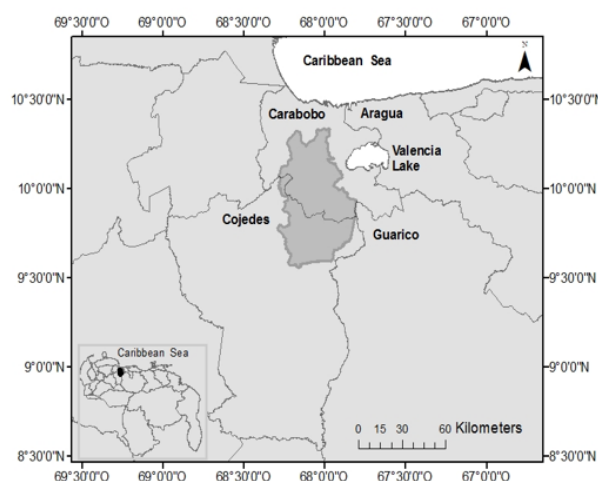


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Pao en la región Centro-Norte de la República de Venezuela.

Las elevaciones clasificadas con respecto al área ocupada en la cuenca del río Pao son: 119–339 msnm (777.08 km²; 25.74 %), 339.01–599 msnm (1483.57 km²; 49.14 %), 599.01–962 msnm (597.44 km², 19.79 % y 962.01 - 1 788 msnm (160.43 km², 5.31 %). La Figura 1 presenta la ubicación geográfica del área de estudio.

3. Materiales y métodos

Las fases que se desarrollan en esta investigación están dadas en los siguientes apartados

3.1. Selección, descarga de imágenes y pre-procesamiento

Las imágenes de satélites para el área de estudio correspondiente a los años 1986 y 2016 fueron

descargadas a través de la fuente de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La imagen del año 1986 seleccionada del programa Landsat 7ETM, y la del año 2016 del programa Landsat L8OLI. Estas imágenes fueron tomadas en el periodo seco que en Venezuela corresponde a los meses de diciembre a marzo, para que estén lo más libre de coberturas de nubes.

Con respecto al pre-procesamiento esta fase incluye la selección de series de tiempo y compuestos de imágenes. Para la construcción de la serie de tiempo y los compuestos de imágenes es indispensable tener un co-registro exacto a nivel de pixel entre todas las imágenes adquiridas para cada escena. Una serie de tiempo puede definirse como una colección de observaciones ordenadas a través del tiempo [8], en el caso de las imágenes satelitales dichas observaciones corresponden a valores de reflectancia de las bandas espectrales o valores derivados. De esta forma para cada pixel se tienen los datos de todas las imágenes multi espectrales disponibles en el intervalo de tiempo de la serie. Este ajuste puede hacerse midiendo la diferencia entre los pixeles y re-proyectando las coordenadas de los extremos de la imagen desplazada en esta misma magnitud (teniendo en cuenta que las imágenes descargadas están en un sistema de proyección con unidades métricas). Resulta útil mantener el sistema de referencia geográfico UTM con el que se adquieren las imágenes durante todo el proceso hasta llegar al producto final, con el fin de evitar la pérdida del co-registro entre pixeles al aplicar los ajustes geométricos de los modelos de re-proyección cartográfica.

La imagen seleccionada para la cuenca del río Pao está bajo el Sistema de Referencia Mundial (WRS: World Reference System), Proyección UTM Zona 19.

3.2. *Corrección geométrica, radiométrica y normalización de los datos*

Antes de comenzar cualquier análisis sobre la información recogida desde un sensor remoto es necesario un tratamiento previo de los datos en cuestión. Esto típicamente involucra el procesamiento inicial de datos crudos de las imágenes a corregir para distorsiones geométricas,

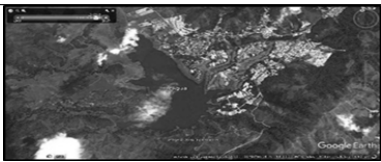
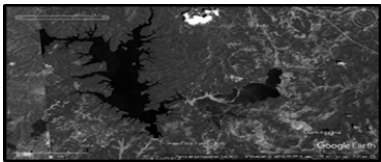
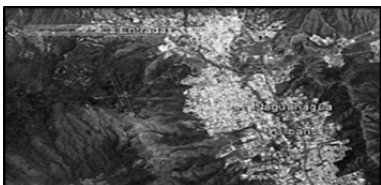

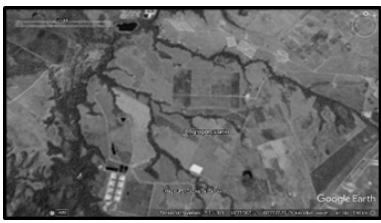

calibración radiométrica, y correcciones atmosféricas presentes en los datos [9]. Los valores de los pixeles de las imágenes se encuentran generalmente en unidades de niveles digitales y se deben transformar en unidades de energía reflejada, lo que se conoce como calibración radiométrica[10]. Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información tanto de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice los efectos atmosféricos en los valores de cada pixel, obteniendo una imagen de superficie de reflectancia, también conocido como normalización de los datos. En cuanto a la corrección radiométrica [11], señala que idealmente, el flujo de radiación recogido por un sensor remoto, en varias bandas, es una representación precisa del flujo de radiación de las características de la superficie terrestre. Las correcciones atmosféricas se realizan a causa de que no todos los componentes se ven afectados de igual forma. El espesor de la atmósfera puede variar y las nubes pueden afectar la percepción del sensor producto que no recibe la radiancia que efectivamente sale desde el suelo [4].

En este estudio la composición de las bandas espectrales de las dos imágenes se lleva a cabo utilizando como herramienta computacional ArGISv10.0, y las correcciones radiométricas, topográficas y atmosféricas absolutas aplicadas a cada imagen son ejecutadas en el entorno de la herramienta computacional de procesamiento de imágenes satelitales ENVI 4.7.

3.3. *Análisis de detección de cambios*

La detección de cambios consiste en identificar diferencias en el estado de una característica o fenómeno por observaciones que se hacen en diferentes épocas [12]. En esta fase se realiza el procesamiento de las imágenes que es el proceso mediante el cual los píxeles de una imagen satelital multibanda son etiquetados según la categoría a la que pertenecen. A partir de esta imagen puede generarse una cartografía temática y el inventario estadístico de la superficie involucrada en cada categoría. Existen dos métodos de clasificación: supervisado y no supervisado.

Tabla 1: Muestra de las imágenes de referencia extraídas desde Google Earth correspondientes a las coberturas / usos de la tierra clasificados en la cuenca del río Pao

ID	IMAGEN	LATITUD	LONGITUD	USO / COBERTURA
1		10°10'45.81"N	68°03'54"O	Agua (Embalse Guataparó)
2		9°53'49.06"N	68°06'55.77"O	Agua (Embalse Pao – La Balza)
3		10°14'17.89"N	68°0'35.26"O	Urbano
4		10°13'47.08"N	68°11'28.18"O	Agrícola
5		10°02'16.99"N	68°2'4.26"O	Agropecuario
6		10°16'0.01"N	68°12'7.29"O	Suelo Degradado

En esta investigación se utilizó el proceso de clasificación supervisada, este tipo de clasificación se fundamenta en el previo conocimiento de las clases y de estadísticos que se relacionan a cada clase espectral de la imagen [6]. Con la clasificación supervisada, un analista asigna píxeles que representan una cobertura terrestre, a una clase en la leyenda dependiendo del conocimiento que tenga el analista de la unidad

de superficie de estudio. Para [12], consta de dos (2) fases: entrenamiento y asignación. En la fase 1, el investigador, realiza un reconocimiento general de las áreas a estudiar, determinando patrones de formas y colores relacionadas a una clase, entrenando el conjunto de píxeles a cada clase encontrada, desarrolla una descripción numérica de las características espectrales de las bandas que discriminan los grupos de píxeles que pertenecen

a una misma clase mediante la generación de sus firmas espectrales [13]. En la fase 2, se asigna una lista de clases o nombres a cada patrón observado, generando mediante algoritmos una clasificación general de la imagen.

3.4. Evaluación de la exactitud temática

Una vez realizada la clasificación se recomienda comprobar que tan bien fue realizada ésta. Para ello, se utiliza como herramienta de medición una matriz de confusión la cual contempla tanto los píxeles clasificados, como los que no lo fueron. Con la matriz de confusión se generan tres tipos de exactitud: exactitud global, exactitud del usuario, exactitud del productor [14], además del índice de Kappa [15, 16].

3.5. Validación de la clasificación de imágenes

Para la validación de métodos de clasificación, se sugiere realizar el análisis de la exactitud o aciertos de las clasificaciones, comparándola con otra que el investigador declare como absoluta, proceso realizado utilizando una Matriz de Confusión y el Coeficiente Kappa [17, 18, 19].

La validación requiere información sobre la “condición real” del uso de la tierra en todo el área de estudio. La información puede provenir de dos fuentes

1. datos de referencia,
2. verificación de campos.

Los datos de referencia más comunes son las imágenes, que permita la validación contra la clasificación de la cobertura terrestre y de los usos de la tierra. Para algunas unidades de superficie, son utilizados con frecuencia los mapas mundis virtuales como Google Earth.

La Tabla 2 presenta las imágenes correspondientes a los *datos de referencia* utilizadas en esta investigación extraída de Google Earth.

Para realizar la validación en las áreas de entrenamiento seleccionadas, se ha visitado la zona de estudio identificando el tipo de material en las cubiertas de interés. La Tabla 3 presenta fotografías con las coordenadas geográficas respectivas y descripción de las características de la cobertura del sitio para validar la clasificación digital realizada.

Se hizo un recorrido de la zona, en el mes de marzo de 2017 tomando datos de las diferentes zonas de interés, en las fotos se captan imágenes de los diferentes usos y coberturas de la tierra en la cuenca del río Pao.

4. Presentación y discusión de resultados

Los resultados de la aplicación del método post-clasificación para las imágenes seleccionadas de los años 1986 y 2016 se ilustran en las Figuras 4 y 5 respectivamente. En ambas imágenes se reflejan las diferentes clasificaciones de las coberturas y usos de la tierra para la cuenca del río Pao son






1. no clasificado;
2. urbano;
3. agropecuario
4. agrícola;
5. agua;
6. vegetación;
7. suelo deforestado;
8. nubes
9. sombras.

El cubrimiento de tierra es principalmente: matriz de vegetación, agricultura y suelo degradado. Las áreas urbanas tienen su máxima representación en la zona norte de la cuenca.

La Tabla 3 presenta los resultados del método de postclasificación expresados mediante la matriz de error correspondiente a los mapas de clasificación de los usos y las coberturas de la tierra obtenidos basados en las imágenes de la reflectancia en la cuenca del río Pao para 1986. Los resultados de la matriz de error incluyen la comparación de 256 píxeles seleccionados al azar sobre la imagen de estudio –columna izquierda– con respecto a los usos observados en la imagen de referencia de Google Earth 1986 –fila superior–. Las clases son

1. No Clasificado;
2. Urbano;
3. Agropecuario;
4. Agrícola;
5. Agua;
6. Vegetación;
7. Suelo degradado;
8. Nubes;

Tabla 2: Muestra de las fotografías de verificación de campo correspondientes a las coberturas / usos de la tierra clasificados en la cuenca del río Pao

ID	IMAGEN	LATITUD	LONGITUD	USO / COBERTURA
1		10°11'13,8"N	68°03'38"O	Agua (Embalse Guataparo)
2		10°14'26,6"N	67°59'47,8"O	Urbano
3		10°12'20,2"N	68°11'20,7"O	Agropecuario
4		10°13'02,7"N	68°11'35,7"O	Agrícola
5		10°12'27,0"N	68°11'53,3"O	Vegetación

9. Sombras.

La diagonal principal resaltada en negritas muestra las celdas dentro de la imagen clasificada sin modificaciones, es decir que no sufrieron cambios. Por el contrario las clases que se encuentran fuera de la diagonal principal indican las áreas que han sufrido cambios durante dicho periodo de tiempo.

Los pixeles en el mapa clasificado, la exactitud de usuario y el índice Kappa son

1. Urbano: 8, 87.5 %, 0.8715;
2. Agropecuario: 10, 90 %, 0.8694;

3. Agrícola: 4,100 %, 1;
4. Agua: 3, 100 %, 1;
5. Vegetación: 103, 98.5 %, 1;
6. Suelo degradado: 56, 96.43 %, 0.9543;
7. Nubes: 5, 80 %, 0.7968;
8. Sombras: 1, 100 %, 1.

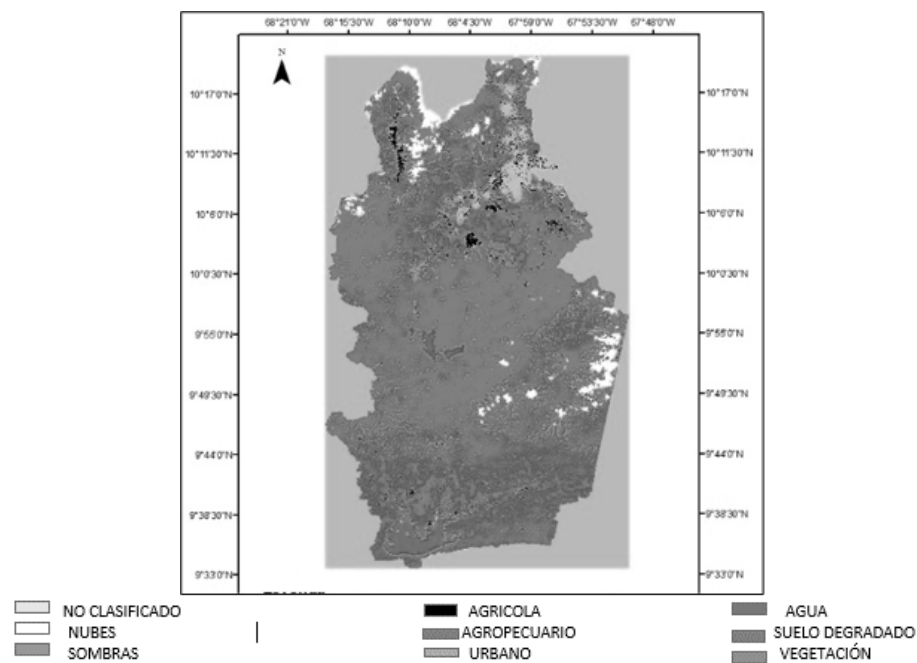


Figura 2: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante los mapas de los usos y coberturas terrestres de la cuenca del río Pao aplicado sobre imágenes de la reflectancia del satélite Landsat desde 1986

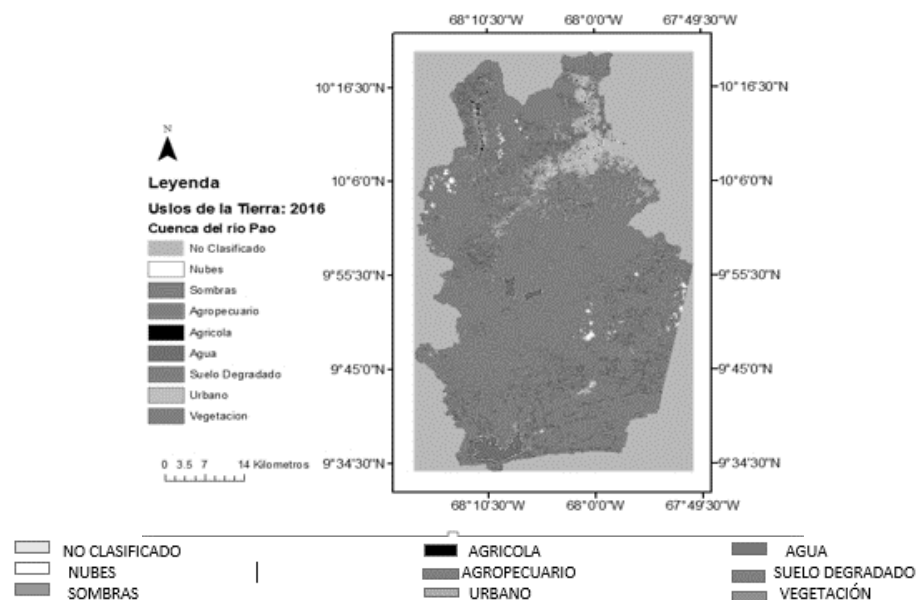


Figura 3: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante los mapas de los usos y coberturas terrestres de la cuenca del río Pao aplicado sobre imágenes de la reflectancia del satélite Landsat desde 2016

Los pixeles en la imagen de referencia y la exactitud de productor son

1. Urbano: 7, 100 %;
2. Agropecuario: 9, 100 %;
3. Agrícola: 5,80 %;

Tabla 3: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante la matriz de error correspondiente al mapa de clasificación de los usos y las coberturas de la tierra obtenidos basados en las imágenes de la reflectancia en la cuenca del río Pao para el año 1986

Datos de referencia, 1986														
	Uso de la tierra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total en filas	Exactitud de usuario (%)	Kappa Total	
Mapa clasificado	1	66									66	100	1	
	2		7					1			8	87.5	0.8715	
	3			9				1			10	90	0.8694	
	4				4						4	100	1	
	5					3					3	100	1	
	6						103				103	98.5	1	
	7						2	54			56	96.43	0.8543	
	8				1				4		5	80	0.7869	
	9									1	1	100	1	
Total en Columna		66	7	9	5	3	105	56	4	1	256			
Exactitud del productor (%)		100	100	100	80	100	98.1	96.43	100	100		98.05		
Índice Kappa total														0.9728

Tabla 4: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante la matriz de error correspondiente al mapa de clasificación de los usos y las coberturas de la tierra obtenidos basados en las imágenes de la reflectancia en la cuenca del río Pao para 2016

Datos de referencia, 2016													
	Uso de la tierra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total en filas	Exactitud de usuario (%)	Kappa Total
Mapa clasificado	1	164									164	100	1
	2		16	1				1			18	88.89	0.8853
	3			99			1				100	99	0.8875
	4				1						1	100	1
	5					4					4	100	1
	6						165				165	100	1
	7			1				56			57	98.25	0.9803
	8								2		2	100	1
	9									1	1	100	1
Total en Columna		164	16	101	1	4	165	57	2	1	512		
Exactitud del productor (%)		100	100	98.2	100	100	99.4	98.25	100	100		99.22	
Índice Kappa total													0.9895

4. Agua: 3, 100 %,1;
5. Vegetación: 105, 98.1 %;
6. Suelo degradado: 56, 96.43 %;
7. Nubes: 4, 100 %, 1;
8. Sombras: 1, 100 %.

El índice de exactitud global es a 98.04 % y el índice de Kappa Total es 0.9728.

La Tabla 4 presenta los resultados del método de

postclasificación expresados mediante la matriz de error correspondiente a los mapas de clasificación de los usos y las coberturas de la tierra obtenidos basados en las imágenes de la reflectancia en la cuenca del río Pao para 2016. Los resultados de la matriz de error incluyen la comparación de 512 pixeles seleccionados al azar sobre la imagen de estudio –columna izquierda– con respecto a los

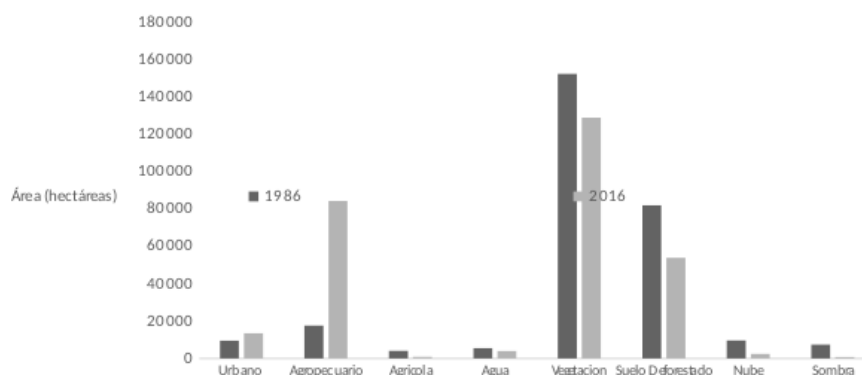


Figura 4: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante el área de las clasificaciones de uso y cobertura de la tierra tanto en Ha

usos observados en la imagen de referencia de Google Earth 1986 –fila superior–. Las clases son

1. No Clasificado;
2. Urbano;
3. Agropecuario;
4. Agrícola;
5. Agua;
6. Vegetación;
7. Suelo degradado;
8. Nubes;
9. Sombras.

La diagonal principal muestra las celdas dentro de la imagen clasificada sin modificaciones, es decir que no sufrieron cambios. Por el contrario las clases que se encuentran fuera de la diagonal principal indican las áreas que han sufrido cambios durante dicho periodo.

Los píxeles en el mapa clasificado, la exactitud de usuario y el índice Kappa son

1. Urbano: 18, 88.9 %, 0.8853;
2. Agropecuario: 100, 99 %, 0.9875;
3. Agrícola: 1, 100 %, 1;
4. Agua: 4, 100 %, 1;
5. Vegetación: 165, 100 %, 1;
6. Suelo degradado: 57, 98.25 %, 0.9803;
7. Nubes: 2, 100 %, 1;
8. Sombras: 1, 100 %, 1.

Los píxeles en la imagen de referencia y la exactitud de productor son

1. Urbano: 16, 100 %;

2. Agropecuario: 101, 98.02 %;
3. Agrícola: 1, 100 %;
4. Agua: 4, 100 %, 1;
5. Vegetación: 165, 99.4 %, e) Suelo degradado: 57, 98.25 %, g) Nubes: 2, 100 %;
6. Sombras: 1, 100 %.

El índice de exactitud global es igual a 99.22 % y el índice de Kappa Total es 0.9895.

La Figura 6 presenta las áreas de cada clasificación realizada a las diferentes coberturas usos de la tierra en la cuenca expresadas en Ha, estos resultados permiten determinar cuáles son los usos o coberturas que han sufrido cambios durante el lapso de tiempo que cubre el estudio.

La Figura 7 presenta la relación porcentual con respecto al área total de la cuenca del río Pao.

La clase urbana y la clase agropecuaria han mostrado incrementos. Las zonas de usos vegetación y suelo deforestado presentaron disminución a lo largo del periodo de estudio.

La Tabla 5 muestra la diferencia bi-temporal de las áreas ocupadas según la clase expresada en proporción porcentual correspondiente a la cuenca del río Pao de los años 1986 y 2016. Se observan las clases que presentan los incrementos y aquellas dónde ocurren los descensos.

4.1. Validación

Para la validación de estos resultados se realizan visitas de campo en la parte alta de la cuenca del río Pao, con el fin de comparar los resultados obtenidos de la clasificación con respecto a uso o cobertura real del terreno.

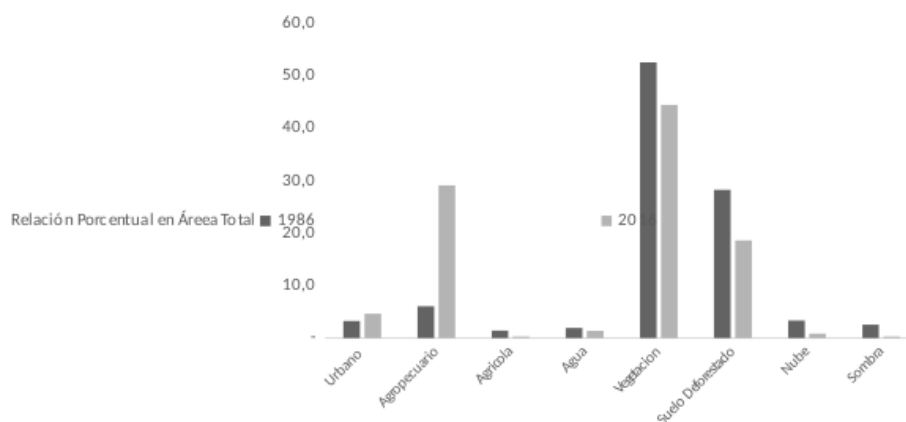


Figura 5: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante el área de las clasificaciones de uso y cobertura de la tierra como en relación porcentual con respecto al área de la cuenca del río Pao

Tabla 5: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante la diferencia en proporción porcentual bi-temporal de las áreas de cobertura y usos terrestres en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Imágenes bitemporales	Urbano (1)	Agropecuario (2)	Agrícola (3)	Agua (4)	Vegetación (5)	Suelo deforestado (6)	Nube (7)	Sombra (8)
1986 – 2016	-1.37	-22.99	1.12	0.55	8.10	9.66	2.49	2.28

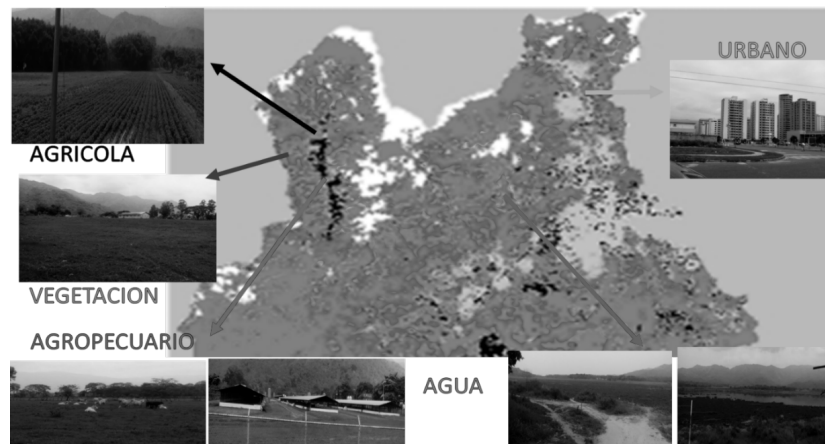


Figura 6: Resultado de las visitas de campo para la verificación de las clasificaciones de usos y coberturas de la cuenca del río Pao

La Figura 8 muestra diferentes fotografías que validan la clasificación obtenida con el método de postclasificación empleado en este estudio, reporta como usos de la tierra los siguientes

1. urbano;
2. agrícola;
3. agropecuario;
4. agua;

5. suelo degradado;
6. vegetación;
7. nubes;
8. sombra y;
9. no clasificado.

Las fotografías corresponden a imágenes del embalse Guataparo como muestra de uso de

cobertura *agua*, fotografías de la zona urbana del municipio Naguanagua, zonas agrícolas, agropecuarias del municipio Bejuma.

Al comparar los resultados obtenidos para los índices de validación, kappa y exactitud del productor con datos bibliográficos, los valores promedios obtenidos durante todo el periodo de estudio para el índice de exactitud del productor es 98.48 % y el resultado del índice kappa es de 0.9845. Para el resultado obtenido del índice kappa el resultado de la clasificación realizada está en la categoría de casi perfecta comparándola con el nivel de concordancia de [18]. Para otros autores Kappa representa el valor de K o fuerza de concordancia, el valor obtenido cae en el rango de 0.81 a 1 que está catalogado como *muy buena*.

De los resultados arrojados de la diferencia de las áreas ocupadas según cada clasificación de uso y cobertura de la cuenca se pudo observar que hay dos clases que muestran un aumento entre los años 1986 y 2016. La clase urbana con un incremento de 1.37 % y la clase agropecuaria con 23 %. El resto de las zonas clasificadas en esta cuenca presentaron disminución a lo largo del periodo de estudio.

En la Figura 5 señalada con un círculo se puede apreciar la disminución del área correspondiente a los tres embalses de la cuenca. Se puede observar que la clase urbana está alojada en mayor proporción en la zona norte de la misma, en la cuenca alta del río Pao, específicamente en el municipio Naguanagua.

En el folleto del Instituto Nacional de Estadísticas 2012 se establece que la población del municipio Naguanagua para el año 1986 estaba estimada en 94.408 habitantes, el censo del año 1990 reportó 97.572 habitantes, en el censo del año 2001 se reportaron 132.368 habitantes, en el último censo del año 2011 la población era de 157.437 habitantes lo que reportó un incremento en la densidad poblacional y la ubica en 837,43 Hab./Km², en comparación con los censos de los años anteriores.

En fuentes más recientes como la generada por el Instituto Nacional de Estadística de Venezuela. Proyección de la población al 30 de junio con base al censo 2011, según entidad federal y municipios, 2000–2050 no publicada; se establece que para el

año 2016 la población del Municipio Naguanagua es de 183.804 habitantes con una proyección de 225.123 habitantes para el año 2050.

5. Conclusión

La técnica de detección de cambios postclasificación se adapta al logro del objetivo de este estudio que aborda la caracterización espacio- temporal de los procesos dinámicos de cambios en el uso del suelo y la cobertura terrestre de la cuenca del río Pao entre 1986 y 2016. La evaluación de exactitud o aciertos de las clasificaciones realizadas mediante las matrices de confusión y el índice Kappa permitió calificar los resultados como muy buenos, los mismos a su vez fueron verificados en campo.

Los resultados de esta investigación permiten concluir que el Municipio Naguanagua es el sitio adecuado para aplicar un plan de gestión de riesgos de desastres por poseer la mayor densidad demográfica.

Reconocimiento

El trabajo se ha llevado a cabo dentro de las líneas de investigación del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAMUC), por lo cual los autores expresan su especial reconocimiento por el apoyo recibido.

6. Referencias

- [1] J.M. Paruelo, J.P. Guerschman, G. Piñeiro, E.G. Jobbágy, S.R. Verón, G. Y. Baldi, and S Baeza. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, X(2):47–61, 2006.
- [2] Ronald Rindfuss and Paul Stern. *People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science*, chapter The Need and the Challenges, pages 1–27. The National Academies Press, 1998.
- [3] R. T. T. Forman and S. K Collinge. Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning. *Landscape and Urban Planning*, 37(1–2):129–135, 1997.
- [4] Emilio S. Chuvieco. *Teledetección Ambiental La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel Ciencia, Barcelona, España, 2002.

- [5] J. Rejas and A. Cárcamo. Análisis multitemporal mediante teledetección espacial y SIG del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Danlí, El Paraíso, en los años 1987–2011. *Revista Ciencias Espaciales*, 8(2):259–271, 2015.
- [6] D. Ponver, F. Samuel, and I. Reyes. Las técnicas geomáticas aplicadas en la agricultura al catastro agrícola en Cuba. *Revista Ciencias Espaciales*, 8(2):12–28, 2015.
- [7] E.G. Rojas and I.O. Ortiz. Identificación del cilindro nudoso en imágenes tc de trozas podadas de pinus radiata utilizando el clasificador de máxima verosimilitud. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 11(2):117–127, 2009.
- [8] C. Chatfield. *The Analysis of Time Series: An Introduction*. Chapman & Hall/CRC Press, Florida, E.E.U.U., 2003.
- [9] T.M. Lillesand, R.W. Kiefer, and J.W. Chipman. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ., 2008.
- [10] G. Asner, E. Tasar, S. Sousan, and D. Knapp. Claslite forest monitoring technology. Use Guide Version 3.0, institution, Standford: Carnegie Institution for Science, 2013.
- [11] J.R. Jensen. *Remote Sensing of the Environment an Earth Resource Perspective*. Pearson New Delhi, 2014.
- [12] B. Sánchez and A. Reyes. Estudio de la expansión urbana de las principales ciudades de Venezuela utilizando técnicas de geomatica. In *Memorias de las VI Jornadas Nacionales de Geomática y 1er Congreso Nacional de Geomática*, Caracas, Venezuela, Agosto 2016.
- [13] R. Lang, G. Shao, B.C. Pijanowski, and R.L. Farnsworth. Optimizing unsupervised classifications of remotely sensed imagery with a data – assisted labeling approach. *Computers and Geosciences*, 34(12):1877–1885, 2008.
- [14] G.M. Arango, B.J.W. Branch, and F.V. Botero. Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: — landsat - etm+ii. *Revista Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 58(1):2611–2634, 2005.
- [15] M. Li, Y. Wu, and Q Zhang. SAR image segmentation based on mixture context and wavelet hidden – class – label Markov random field. *Computers and Mathematics with Applications*, 57(6):961–969, 2009.
- [16] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. United Nations. Office for Outer Space Affairs. *Manual Erdas Imagine*, 2011.
- [17] J.C. Santos. Extracao de atributos de forma e selecao de atributos usando algoritmos genéticos. Tesis de maestría, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil, 2007.
- [18] J. Cerda and L. Villarroel. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1):54–58, 2008.
- [19] J. Borràs, J. Delegido, A. Pezzola, M. Pereira, G. Morassi, and G. Camps-Valls. Land use classification from sentinel-2 imagery. *Revista de Teledetección*, 48:55–66, 2017.

The alternative method of the estimate of the quality of gas-exchange processes in the internal-combustion engine

L. M. Matyukhin*

Departamento de Termotecnia y Motores de Combustión Interna, Facultad de Ecología y Energía, Universidad Estatal Automotriz y Vial de Moscú (MADI), Moscú, Rusia.

Abstract.- The work presents the advantages of the utilization of the volumetric ratios of the components in the air-fuel-residual gases-mixture for the thermal calculation of internal-combustion engine. The principal characteristic of the loading of the engines of IC –the volumetric efficiency η_v – describes not the loading proper, but its reduction as a result of the hydraulic resistance and heating of the fresh charge. The volumetric efficiency η_v ignores the influence on the loading of the used combustibles type, excess-air coefficient and level of recirculation. In addition, it is in principle impossible to determine a numerical value of the volumetric efficiency corresponding with the full filling of cylinders by fresh charge. Volumetric fraction of fresh charge offers scope for the judgment about the state of filling by it of the total cylinder's volume. The use as a base of the component's fractions of the working mixture in modern application programs of engine's calculation could reduce the calculation's time by reducing of the number of variables.

Keywords: gas-exchange process; volumetric efficiency; coefficient of residual gases; fresh charge; fuel mode; composition of the air-fuel-residual gases-mixture.

El método alternativo de la evaluación de calidad de los resultados del intercambio de gases en los motores de combustión interna

Resumen.- El trabajo está dedicado a las ventajas de la evaluación de la calidad de los resultados del intercambio de gases por medio de fracciones en volumen de los componentes de la mezcla de servicio que se compone del aire, combustible, gases residuales y los de recirculación. La característica principal de llenado de los cilindros de un motor de pistón –el coeficiente de llenado η_v – describe no el relleno mismo, sino su reducción por la causa de resistencia hidráulica y el calentamiento de los gases. El coeficiente de llenado η_v ignora la influencia sobre el llenado del tipo de combustible usado, coeficiente del exceso del aire y grado de recirculación. Además, es principalmente imposible determinar el valor numérico del coeficiente η_v que corresponde al relleno completo del volumen total del cilindro con la mezcla fresca. La fracción de la mezcla fresca da una indicación del grado de relleno del volumen total del cilindro. El uso de las fracciones de la mezcla de servicio en los programas aplicados modernos para el cálculo de los motores de CI de pistón puede reducir el tiempo del cálculo por causa de disminución de la cantidad de variables.

Palabras claves: proceso de admisión, coeficiente de llenado; coeficiente de los gases residuales; carga fresca; tipo del combustible; composición de la mezcla de servicio.

Recibido: noviembre 2017

Aceptado: marzo 2018

1. Introducción

Unas de las nociones más importantes de la Teoría de los Motores de Combustión Interna (MCI) son el coeficiente de llenado o rendimiento

volumétrico (η_v) y el de los gases residuales (γ^r) [1, 2, 3]. Esos coeficientes se utilizan exclusivamente para la evaluación de los procesos del intercambio de gases en los MCI, pero procesos mencionados pueden ser evaluados más fácil y claramente mediante a la noción termodinámica de volumen parcial o reducido. Así, el coeficiente de llenado η_v se distingue, por ejemplo, por insuficiencias siguientes [4]:

* Autor para correspondencia:

Correo-e: dvs@madi.ru (Leonid M. Matyukhin)

■ Su valor puede ser diferente dependiendo de

los parámetros de la carga fresca en la entrada en el cilindro, cuando la masa de la carga fresca es constante.

- En el caso de un volumen de trabajo de cilindro V_h (el volumen circunscrito por el pistón durante su desplazamiento entre el punto muerto superior y el inferior) idéntico y con relaciones de compresión ε diferentes (por causa de volumen de la cámara de combustión V_c diferente) al mismo valor de η_v le corresponde una composición diferente de la mezcla de servicio que consta del aire, combustible, gases residuales y los de recirculación.
- no existen ecuaciones universales de η_v que se tomen en cuenta el tipo del combustible utilizado o el uso de recirculación de los gases de escape.
- En el caso de iguales volúmenes de trabajo de cilindro V_h y de masas de la carga fresca, la presión media indicada (p_i) del ciclo tiene que depender de la relación de compresión ε (pero en las fórmulas que se utilizan actualmente para evaluar la presión media indicada p_i la relación de compresión ε está presente solamente en una forma indirecta). Tal dependencia es sobre todo importante del punto de vista de didáctica para el examen del funcionamiento de los motores con la relación de compresión ε variable. Se sabe también que la magnitud de la presión media p_i depende del tipo de combustible utilizado, lo que no se toma en consideración en las ecuaciones existentes.
- A pesar de que el proceso de admisión resulta a causa del desplazamiento del pistón desde el punto muerto superior (PMS) hacía el inferior (PMI), no sería oportuno evaluar el llenado basándose solo en el volumen de trabajo V_h , pues que al final de la fase de admisión la carga fresca llena el volumen total V_a . Por lo tanto, la potencia del MCI se determina por el grado de llenado por la carga fresca del volumen total (no el de trabajo) en el final de la fase de admisión.

- No se puede indicar el valor máximo del coeficiente η_v , que hay que tratar de alcanzar para el logro del llenado “ideal” y de la potencia máxima; es imposible evaluar por η_v las reservas del relleno.

Es notorio que la dosificación del combustible hay que realizarla partiendo del grado de turbulencia, de la composición de la mezcla de servicio y de la cantidad del oxidante que se encuentra en el cilindro. Con este motivo es más conveniente evaluar el llenado por las magnitudes asociadas con el llenado másico y con la composición de mezcla de servicio – no por medio del coeficiente η_v .

En base a lo anterior, tiene sentido encontrar un cierto coeficiente o una magnitud adimensional, la que estima adecuadamente el llenado másico y la composición de la mezcla de servicio y también permite reflejar la dependencia de la presión p_i respecto a la relación de compresión ε .

2. La parte principal

Para la evaluación de la calidad del proceso de admisión es razonable comparar la cantidad de los kmoles de la carga fresca que entra en el cilindro con la cantidad de los kmoles de la mezcla de servicio que se encuentra en el volumen total V_a . Es decir, es más apropiado evaluar los resultados del intercambio de gases por la composición de la mezcla que se constituye en el transcurso del proceso de admisión.

Esto es especialmente útil en relación con el hecho de que las fracciones molares son iguales a las en volumen. Por esa causa es más claramente y fácil ilustrar visual y gráficamente todas las conclusiones teóricas y deducciones matemáticas. Así mismo es más apropiado juzgar la calidad de barrido del cilindro de los gases residuales por la fracción de gases residuales (GR) en la mezcla de servicio, no utilizando en este caso el coeficiente de gases residuales γ_r (que representa la relación entre número de kmoles de los gases residuales (GR) y de carga fresca).

El uso de las fracciones con el fin de evaluar la calidad de los procesos de intercambio de gases facilita también el cálculo de tales magnitudes

como masa molecular aparente μ y la constante específica R de la mezcla de servicio que se constituye en el cilindro. Eso facilita la realización de los cálculos que se basen en la ecuación de estado (de Clapeyron).

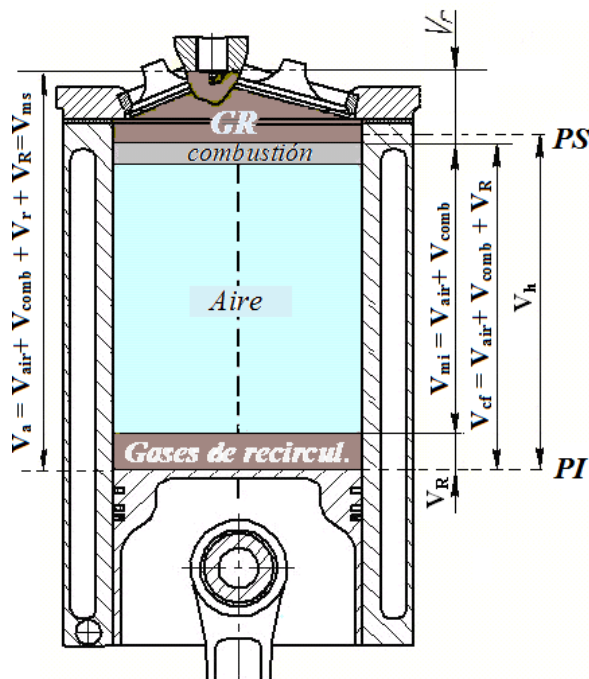


Figura 1: La composición de la mezcla como la suma de volúmenes parciales de sus componentes

Se puede imaginar el volumen de la mezcla de servicio ubicado por encima del pistón que se encuentra en el punto muerto inferior (PMI) como la suma de los volúmenes de la carga fresca (CF) y de los GR (Figura1).

En la Figura1 se utilizan siguientes notaciones de volúmenes:

V_{air} – del aire;

V_{comb} – de combustible;

V_r – de los gases residuales;

V_R – de los gases de recirculación;

$V_{ms} = V_{air} + V_{comb}$ – de la mezcla inflamable;

$V_{cf} = V_{air} + V_{comb} + V_R$ – de la carga fresca;

$V_{ms} = V_{air} + V_{comb} + V_r + V_R$ – de la mezcla de servicio;

V_h es la cilindrada de trabajo.

El volumen total del cilindro es igual al volumen de la mezcla de servicio, es decir $V_a = V_{ms}$.

Suponiendo que en el volumen total del cilindro V_a es igual a la unidad, la fracción de cada componente de la mezcla de servicio será numéricamente igual a su volumen parcial, lo que permite visualizar muy fácil los resultados de intercambio. De hecho, la fracción en volumen de los GR en este caso será igual a V_r . Así, permite analizar e ilustrar claramente la calidad de los procesos de intercambio de gases, ya que – como se puede ver en la Figura 1 – la disminución de la fracción de los GR σ_r en la mezcla de servicio significa unívocamente el crecimiento correspondiente de la fracción σ_{cf} de la carga fresca, y viceversa. Por lo tanto, perfecto sería tal intercambio de gases, en el resultado de cual al comienzo de la fase de compresión la carga fresca llene enteramente como el volumen de trabajo V_h , tanto el volumen de la cámara de combustión V_c , es decir – cuando $\sigma_{cf} = 1$, y en el volumen total del cilindro V_a no se queden los gases residuales.

Las ecuaciones de cálculo puedan ser deducidas, si se utilizan las expresiones de termodinámica conocidas. Como se deduce de la Figura 1, el volumen de la mezcla de servicio (el volumen total V_a) es igual a la suma de los volúmenes parciales de CF y GR [5, 6, 7, 8]

$$V_a = V_r + V_{cf},$$

donde V_{cf} es el volumen parcial de la mezcla fresca que se compone del aire, combustible y de los gases de recirculación. Por lo tanto, en el caso general (cuando se utilizaran combustibles gaseosos y la recirculación de los gases de escape) la última ecuación se escribe por la Ecuación (1) (ver [8, 9])

$$V_a = V_{air} + V_{comp} + V_r + V_R, \quad (1)$$

donde V_{air} es el volumen parcial del aire,

V_{comb} – el de combustible y

V_R – el de los gases de recirculación, cuyo valor relativo en la carga fresca se determina por el grado de recirculación $R'_c R_c$.

Ese último es igual a la razón de la cantidad de los kmoles de los gases de recirculación M_R y la

cantidad de kmoles de la mezcla fresca, es decir

$$R'_c = \frac{N_R}{N_B + N_T + N_R},$$

$$R_c = \frac{M_R}{M_R + M_{air} + M_{comb}}.$$

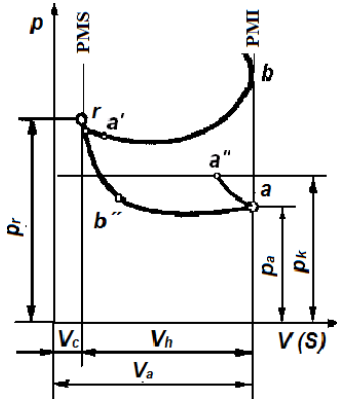


Figura 2: Los procesos de intercambio de gases en un motor de pistón de combustión interna

El volumen de los GR a parámetros del punto “a” del diagrama indicado en la Figura 2 puede ser determinado de la proporción

$$\frac{V_c \cdot p_r}{T_r} = \frac{V_r \cdot p_a}{T_a},$$

y de ahí podemos escribir

$$V_r = V_c \cdot \frac{p_r}{p_a} \cdot \frac{T_a}{T_r}.$$

Al tomar en consideración la diferencia entre la cantidad real de gases residuales y la calculada, tenemos

$$V_r = \phi_b V_c \cdot \frac{p_r}{p_a} \cdot \frac{T_a}{T_r},$$

donde ϕ_b es coeficiente de barrido que es igual a la razón de la cantidad de los GR verdadera y la calculada, es decir

$$\phi_b = \frac{V_r^v}{V_r},$$

Aquí p_r y T_r son, respectivamente, la presión y temperatura dentro del cilindro al final del tiempo del escape y V_c el volumen de la cámara de combustión.

En este caso el volumen de la carga fresca está determinada como

$$V_{cf} = V_a - V_r = V_a - V_c \cdot \frac{p_r}{p_a} \cdot \frac{T_a}{T_r},$$

de donde queda deducida la Ecuación (2)

$$V_{cf} = V_c \cdot \frac{(\epsilon p_a T_r - p_r T_a)}{p_a T_r}. \quad (2)$$

Para determinar las fracciones del aire, combustible y de los gases de recirculación encontremos los volúmenes parciales de todos los componentes de la mezcla de servicio.

El volumen parcial del combustible puede ser expresado a través de V_{aire} como

$$V_{comb} = \frac{V_{air}}{\alpha L_0 \mu_{comb}},$$

donde

$\alpha = \frac{G_{air}}{l_0 G_{comb}}$ es el coeficiente de exceso de aire, G_{comb} los gastos por hora de combustible, G_{air} los gastos por hora del aire, l_0 la relación estequiométrica en [kg del aire/kg del combustible] y $L_0 = \frac{l_0}{\mu_{air}}$ la relación estequiométrica en [kmol del aire/kg del combustible].

Donde,

$$\alpha = \frac{\mu_{air} M_{air}}{\mu_{comb} M_m l_0} = \frac{M_{air}}{\mu_{air} M_{air} L_0}$$

y

$$R_c = \frac{M_R}{M_{air} + M_{comb} + M_R},$$

después de las transformaciones correspondientes obtendremos la Ecuación (3)

$$R_c = \frac{M_R}{M_{air} \left(\frac{\alpha L_0 \mu_{comb} + 1}{\alpha L_0 \mu_{comb}} \right) + M_R}. \quad (3)$$

El valor inverso del paréntesis de la Ecuación (3) es denominado como “el coeficiente de desplazamiento” (del aire)[8, 9] y designado por A en la Ecuación (4)

$$A = \frac{\mu_{comb} \alpha L_0}{\mu_{comb} \alpha L_0 + 1}. \quad (4)$$

Al representar la Ecuación (4) como

$$A = \frac{\alpha L_0}{\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_{com}}},$$

podemos deducir que *el coeficiente de desplazamiento es igual a la razón de la cantidad de kmoles del aire y la de la mezcla inflamable que se compone del aire y combustible.*

Mediante la noción del coeficiente A , dada en [9, 10], puede volver a escribirse R_c

$$R_c = \frac{\alpha L_0}{\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_{comb}}}$$

De aquí se desprende que a la cantidad de los kmoles M_R iguales la magnitud del grado R_c depende del tipo de combustible (de su masa molecular μ_{comb} y del valor L_0).

Al multiplicar el numerador y denominador de esa ecuación por el volumen de un kmol a los parámetros del punto “a” del diagrama indicado, obtendremos la fórmula que determina el grado de recirculación a través de correspondientes volúmenes parciales

$$R_c = \frac{AV_R}{V_{air} + AV_R},$$

de ahí

$$V_R = \frac{V_{air} R_c}{A(1 - R_c)}.$$

Al introducir en la Ecuación (1) los valores correspondientes, expresados a través de V_{air} , obtendremos

$$V_a = V_c \frac{p_r T_a}{p_a T_r} + V_{air} \left(1 + \frac{1}{\alpha L_0 \mu_m} + \frac{R_c}{A(1 + R_c)} \right)$$

o

$$V_{air} = \left(V_a - V_c \frac{p_r T_a}{p_a T_r} \phi_b \right) A(1 + R_c).$$

y finalmente por los resultados en [8] se obtiene la Ecuación (5)

$$V_{air} = V_c \frac{(\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \phi_b)}{p_a T_r} A(1 + R_c). \quad (5)$$

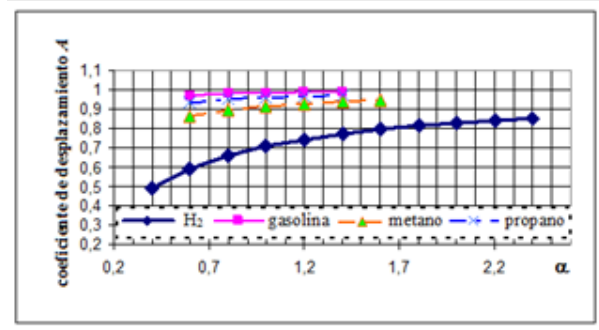


Figura 3: Influencia del coeficiente de exceso α y del tipo de combustible en la magnitud del coeficiente de desplazamiento A

De ahí se deduce que hacia el cilindro fluye menos aire, cuando se utiliza recirculación ($R_c \neq 0$) y cuando se utilizan los combustibles “ligeros” gaseosos con la masa molecular pequeña y los valores numéricos del coeficiente A considerablemente distintos del uno. La Figura 3 ilustra la relación entre el coeficiente de exceso del aire α , el tipo de combustible y el coeficiente de desplazamiento A . Se puede ver, que cuando se utiliza un combustible gaseoso ligero, el coeficiente de desplazamiento A y, por consiguiente, el volumen parcial del aire en la mezcla de servicio que rellena el cilindro, se reducen. Lo mismo pasa también en el caso de enriquecimiento de la mezcla inflamable, cuando el coeficiente de exceso del aire α se disminuye. Empeoramiento mencionado del relleno es bien conocido de la experiencia cotidiana [11, 12, 13].

A partir de la definición que el coeficiente de los gases residuales γ_r es la razón de cantidades de kmoles de la GR en las de la carga fresca, tendremos

$$\gamma_r = \frac{M_r}{M_a - M_r} = \frac{V_r}{V_a - V_r},$$

y por lo tanto,

$$\gamma_r = \frac{p_r T_a \phi_b}{\varepsilon T_r p_a - p_r T_a \phi_b}.$$

El grado de perfección del proceso de admisión tradicionalmente se evalúa por el coeficiente de llenado o rendimiento volumétrico η_v que es la razón entre la cantidad de CF que se encuentra

en el cilindro al inicio de la compresión real (cuando se cierran las válvulas de admisión) y la cantidad virtual de carga fresca que teóricamente podría llenar la cilindrada V_h a las condiciones de admisión. Pero a parámetros del punto “a” del diagrama indicado la cilindrada V_h sería igual a

$$V_{air}^{teor} = V_h \frac{p_k T_a}{p_a T_k} \sigma_B.$$

Por eso, a partir de la Ecuación (5), obtendremos

$$\begin{aligned} \eta_v &= \frac{V_{air}}{V_{air}^{teor}} \\ &= \frac{V_c T_k p_a}{V_h T_a p_k} \\ &\quad \times \frac{(\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \phi_b)}{p_a T_r} A (1 - R_c), \end{aligned}$$

finalmente de los resultados en [9, 14] da la Ecuación (6)

$$\eta_v = \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{(\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \phi_b) T_k}{p_k T_r} A (1 - R_c). \quad (6)$$

Aquí p_k y T_k son parámetros de la CF a condiciones de admisión.

Utilizando el concepto de “volumen parcial” para analizar los resultados de intercambio de gases en un motor de pistón de gas dedujéramos *ecuaciones universales* para determinar el coeficiente de llenado y el de gases residuales. El uso de ellos permite evaluar la calidad de los procesos de intercambio de gases en *cualquier motor de combustión interna de cuatro tiempos – los de Diesel, de gasolina o gas, con o sin recirculación*. Además, las fórmulas son útiles para analizar la influencia de factores diferentes en los resultados del intercambio de gases.

Para motores que funcionan con combustible líquido en ausencia de recirculación el coeficiente de llenado se determina por

$$\eta_v = \frac{1}{\varepsilon - 1} \frac{T_k (\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \phi_b)}{p_k T_r}.$$

La misma fórmula se puede ser deducida a partir de la Ecuación (2). Distinguiéndose

estructuralmente, esta fórmula da al calcular los mismos resultados que las dependencias que se muestran en [1, 2].

Dividiendo las magnitudes de los volúmenes parciales de los componentes de la mezcla de servicio en el volumen total V_a (que es igual al volumen de la mezcla de servicio) hallemos las fracciones correspondientes en volumen de los GR y de la CF [9, 15] se obtienen las ecuaciones (7) y (8)

$$\sigma_r = \frac{V_r}{V_a} = \frac{p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r} \quad (7)$$

y

$$\sigma_{cf} = \frac{V_{cf}}{V_a} = \frac{(\varepsilon p_a T_r - p_r T_a)}{\varepsilon p_a T_r}. \quad (8)$$

Tomando en cuenta el barrido del cilindro y un llenado adicional obtendremos las Ecuaciones (9), (10) y (11) para la determinación de las fracciones de los GR y de la CF

$$\sigma_r = \frac{p_r T_a \phi_b}{\varepsilon p_a T_r}, \quad (9)$$

$$\sigma_{cf} = \frac{\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \phi_b}{\varepsilon p_a T_r}, \quad (10)$$

o

$$\sigma_{cf} = \frac{\varepsilon \phi_1 p_a T_r - p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r}. \quad (11)$$

Mediante la Ecuación (5), la fracción del aire puede ser determinada mediante la Ecuación (9)

$$\sigma_{air} = \frac{\varepsilon \phi_1 p_a T_r - p_r T_a}{\varepsilon p_a T_r} \cdot A (1 - R_c), \quad (12)$$

aquí ϕ_1 y ϕ_s son, respectivamente, los coeficientes de recarga y de barrido [2], que compensan la ignorancia de los verdaderos valores de las temperaturas y presiones de la CF y los GR en los puntos “a” y “r” del diagrama indicado.

En diferencia a los coeficientes η_v y γ_r , la noción de fracciones de componentes se utiliza no solamente en la teoría de los motores de CI, sino en todas las esferas de ciencia y técnica.

Como puede verse en la Figura 1, la caída de la fracción de GR como resultado de la purga de los gases de escape conduce a un aumento de la fracción σ_{cf} de carga fresca, o, viceversa, un aumento de la fracción de la CF como resultado

de una recarga (relleno adicional) en el periodo de demora en cerrar la válvula de admisión tiene el efecto de reducción de la fracción de GR.

En realidad, el coeficiente φ_1 caracteriza no el mismo proceso de relleno adicional en el periodo de demora en cerrar la válvula de admisión, sino una variación común de relleno como resultado de procesos en el período de traslape de válvulas (apertura simultánea de las válvulas de admisión y de escape) y durante el movimiento del pistón desde el PMI y hasta el instante de cierre de las válvulas de admisión.

El coeficiente φ_1 no distingue la influencia sobre el llenado de los efectos de admisión adicional y soplado, pero sólo evalúa el cambio en la cantidad de la CF que entró en el cilindro en comparación con la cantidad calculada. En este caso,

$$\phi_1 = \frac{M_1^v}{M_1} = \frac{V_{cf}^v}{V_{cf}} = \frac{V_a - \phi_b V_r}{V_a - V_r},$$

donde M_1 y M_1^v son conformemente las cantidades de kmoles de la carga fresca calculada y la real. El coeficiente de barrido ϕ_b es igual a razón

$$\phi_b = \frac{M_r^v}{M_r} = \frac{V_r^v}{V_r}.$$

Después de división en V_a obtendremos

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{1 - \varphi_s \sigma_r}{1 - \sigma_r}, \\ \phi_1 &= \frac{1 - \phi_b \sigma_r}{1 - \sigma_r}, \\ \phi_1 &= \frac{1 - \phi_b \sigma_r}{\sigma_{c3}}.\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que $\sigma_r^v = \phi_b \sigma_r$, se puede escribir

$$\begin{aligned}\phi_b &= \frac{\sigma_r^v}{\sigma_r} = \frac{1 - \phi_1 \sigma_{cf}}{\sigma_r} \\ 0 \\ \varphi_s &= \frac{1 - \varphi_1 (1 - \sigma_r)}{\sigma_r}, \\ \phi_b &= \frac{1 - \phi_1 (1 - \sigma_r)}{\sigma_r}.\end{aligned}$$

Esta fórmula también puede ser presente en la forma siguiente

$$\phi_b = \frac{1 - \phi_1 \sigma_{cf}}{1 - \sigma_{cf}}.$$

Por lo tanto, podremos concluir que *estos coeficientes están interrelacionados y por eso no pueden ser fijados arbitrariamente* [9].

A diferencia del coeficiente de llenado η_v la fracción de la carga fresca σ_{cf} no depende de los parámetros del aire en la entrada en el motor y por lo tanto es vinculada unívocamente con el llenado de masa (mientras que el coeficiente de llenado según las magnitudes de p_k y T_k puede tener valores diferentes a la misma cantidad de la carga fresca que entra en el cilindro). Con todo eso para la determinación analítica de la fracción de la carga fresca es suficiente saber solamente el grado de compresión del motor y los parámetros termodinámicos del cuerpo de trabajo a los puntos “a” y “r” del diagrama indicador.

Por lo visto la tradición del uso del coeficiente de llenado se explica en esencia con la simplicidad de su determinación por los datos experimentales y con la comodidad de representación por ese coeficiente de la presión media indicada y la efectiva. Pero hay que tener en cuenta que la mezcla de la carga fresca y de los gases residuales que se compone en el cilindro ocupa el volumen total V_a del cilindro (a pesar de que el pistón durante su marcha desde el PMS hacia el PMI desocupa y circunscribe el volumen de trabajo V_h). En ese caso el valor de la presión media indicada se determina solamente por la fracción de la carga fresca o del aire que se encuentra en el volumen total.

El valor de la presión media p_i indicada puede ser expresada fácilmente por la fracción σ_{air} en la CF. En efecto:

$$\begin{aligned}p_i &= \frac{L_i}{V_h} \\ &= \frac{G_{comb}^{ciclo} H_u \eta_i}{V - h} \\ &= \frac{\sigma_{air} V_a \rho_a H_u \eta_i}{\alpha l_0 (V_a - V_c)},\end{aligned}$$

donde

G_{comb}^{ciclo} es la cantidad de combustible que se consume en el cilindro durante un ciclo,

H_u es el poder calorífico del combustible,

η_i es rendimiento indicado y

ρ_a es la densidad del aire a parámetros del punto “a” del diagrama indicado.

En conclusión, la ecuación toma el aspecto de la Ecuación (10) [9, 16]

$$p_i = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \sigma_{air} \rho_a. \quad (13)$$

Mediante la ecuación de reducción

$$\rho_a = \rho_k \frac{p_a T_k}{p_k T_a},$$

obtenemos la Ecuación (11)

$$p_i = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \frac{p_a T_k}{p_k T_a} \sigma_{air} \rho_k. \quad (14)$$

La Ecuación (11) da posibilidad de analizar también la dependencia de los datos de potencia de motor de los parámetros de la carga a la entrada en el cilindro, lo mismo que la dependencia de esos datos de la relación de compresión ε .

Al sustituir σ_{air} por su valor en la Ecuación (9) obtenemos finalmente la Ecuación (15) [16]

$$p_i = \frac{\rho_k}{1 - \varepsilon} \frac{H_u}{l_0} \eta_i \frac{\varepsilon p_a T_r - p_r T_a \phi_b}{p_k T_r} \frac{T_k}{T_a} \frac{A}{\alpha} (1 - R_c). \quad (15)$$

Esa ecuación permite tomar en consideración la dependencia de la presión media indicador del tipo de combustible (a través de factor A) y del grado de recirculación R_c . Como el uso de combustibles gaseosos tanto el de la recirculación de los gases de escape llevan a disminución de presión media indicador p_i . De eso modo la Ecuación (15) es muy cómoda para tareas didácticas.

De la Ecuación (15) se deduce también que el valor de p_i depende de la razón A/α , que caracteriza el grado de efectividad de la regulación cuantitativa. El significado físico de esta relación puede determinarse de la igualdad

$$\frac{A}{\alpha} = \frac{\mu_{comb} L_0}{\mu_{comb} \alpha L_0 + 1} = \frac{L_0}{\left(\frac{1}{\mu_{comb}} + \alpha L_0\right)}.$$

Por lo tanto, la razón A/α es equivalente a relación del número de kmoles de aire teóricamente necesaria para la combustión completa de 1 kg de combustible, en el número de kmoles de una mezcla combustible que se compone de 1 kg de

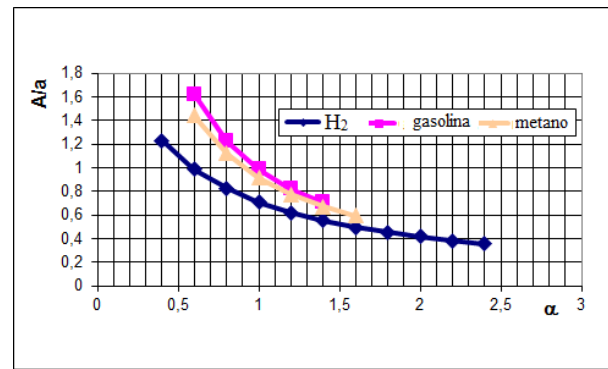


Figura 4: Influencia del coeficiente de exceso y tipo de combustible sobre la magnitud de la razón A/α .

combustible y del aire que se utiliza realmente para su combustión.

El numerador y el denominador de última ecuación se distinguen más, cuando se utiliza un combustible “ligero” y el coeficiente de exceso de aire α se disminuye. Pero, como puede verse en la Figura 3, cuando se usan combustibles gaseosos, coeficiente de desplazamiento A es mucho menos de uno, que es la consecuencia del aumento del número de kmoles de combustible $1/\mu_{comb}$ en mezcla combustible. Por eso cambio de la razón A/α en el caso de enriquecimiento (cuando se disminuye también el coeficiente α) no está tan grande (véase la Figura 4), como en caso del uso de gasolina.

En concordancia con la Ecuación (15) eso significa la influencia no tan considerable del enriquecimiento de mezcla sobre los datos de poder de un motor de gas.

A diferencia de la ecuación que se cita habitualmente en los manuales [1, 2]

$$p_i = \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \rho_k,$$

las Ecuaciones (10), (11) y (15) en forma explícita demuestran dependencia de los datos de potencia de un motor de la relación de compresión ε y de la fracción del aire en la mezcla de servicio (que depende a su vez del tipo del combustible usado).

Al tomar en consideración la ecuación

$$N_i = \frac{p_i V_h n}{30 \tau}$$

para determinación de la potencia indicador, podemos escribir

$$N_i = \frac{iV_h n}{30\tau} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{H_u \eta_i}{l_0 \alpha} \sigma_{\beta} \rho_a.$$

Como el gasto específico indicado de combustible es la razón

$$g_i = \frac{G_{comb}}{N_i}$$

para un solo ciclo, esa ecuación puede ser escrita como

$$g_i = \frac{G_{ciclo}^{comb}}{L_i},$$

donde L_i es el trabajo indicado de un ciclo. Pero

$$\begin{aligned} G_{comb}^{ciclo} &= \frac{G_{air}^{ciclo}}{\alpha l_0} \\ &= \frac{V_a \sigma_{air} \rho_a}{\alpha l_0}, \end{aligned}$$

y en ese caso

$$g_i = \frac{V_a \sigma_{air} \rho_a}{\alpha l_0 L_i},$$

de donde

$$\begin{aligned} g_i &= \frac{V_a \sigma_{air} \rho_a}{\alpha l_0 p_i V_h} \\ &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{\sigma_{air} \rho_a}{\alpha l_0 p_i} \quad [kg/J]. \end{aligned}$$

Al sustituir p_i [Pa] su valor en [MPa]

$$g_i = 3600 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{\sigma_{air} \rho_a}{\alpha l_0 p_i} \quad [g/kWt \cdot h]. \quad (16)$$

De la Ecuación 11 se desprende que la magnitud de g_i depende de la relación de compresión ε . Además, como la fracción del aire σ_{air} es directamente proporcional al producto $A(1 - R_c)$, se puede deducir que el gasto específico indicado de combustible debe bajarse cuando se disminuya ese producto. Es decir, en el caso de mantener sin cambios el valor de p_i el uso del combustible más “ligero” y el grado de recirculación más grande tienen la consecuencia de aumentar la eficiencia del motor.

De la Ecuación 10 obtendremos

$$\eta_i = \frac{l_0}{H_u} \frac{\alpha}{\sigma_{air}} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \frac{p_i}{\rho_a}.$$

Mediante la ecuación

$$\frac{\sigma_{air}}{\alpha} = \sigma_{comb} \mu_{comb} L_0,$$

puede ser reescrita

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{l_0}{H_u} \frac{1}{\sigma_{comb} \mu_{comb} L_0} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \frac{p_i}{\rho_a} \\ &= \frac{L_0 \mu_{air}}{H_u} \frac{1}{\sigma_{comb} \mu_{comb} L_0} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \frac{p_i}{\rho_a}. \end{aligned}$$

finalmente

$$\eta_i = \frac{\mu_{air}}{H_u} \frac{1}{\sigma_{comb} \mu_{comb}} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \frac{p_i}{\rho_a}, \quad (17)$$

De la Ecuación 17 se desprende que el rendimiento indicado depende del tipo de combustible (de la magnitud de su masa molecular μ_{comb}) y se aumenta en caso del uso de combustibles gaseosos más ligeros.

El interés en motores de CI con expansión continuada se determina por su mayor eficiencia en comparación con la de los motores convencionales [11, 12, 13, 17, 18]. Como muestra [17], el uso de fracciones de componentes de la mezcla de servicio simplifica el análisis de índices y del cálculo de los motores que funcionan, en particular, según el ciclo de Miller/Atkinson. De esta manera, por ejemplo, el rendimiento indicado del ciclo de un motor con la expansión continuada está determinado por la ecuación [16]

$$\eta_i = \frac{l_0}{H_u} \frac{\alpha}{\sigma_{\beta} \phi_1} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon} \frac{p_i}{\rho_a}.$$

Esta ecuación demuestra que rendimiento indicado crece, cuando disminuye el producto $\sigma_{air} \phi_1 \sigma_{air} \phi_1 \sigma_{air} \phi_1 \sigma_{air} \phi_1$ como el resultado $\sigma_{air} \phi_1$ de demora en cerrar la válvula de admisión.

La relación entre las magnitudes de η_v y σ_{cf} se puede ser determinada desde la ecuación

$$\eta_v = \frac{V_{air}}{V_{air}^{teor}}$$

donde en el denominador se halla el volumen de la carga fresca que podría encontrarse teóricamente en el volumen de trabajo a parámetros de medio

ambiente, pero reducido a los parámetros del punto “a” del diagrama indicador. Por eso

$$\eta_v = \sigma_{air} \frac{V_a p_a T_k}{V_h p_k T_a},$$

de donde son deducidas las Ecuaciones (18) y (19)

$$\eta_v = \sigma_{air} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{p_a T_k}{p_k T_a}, \quad (18)$$

$$\sigma_{air} = \eta_v \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \frac{p_k T_a}{p_a T_k}. \quad (19)$$

Las Ecuaciones (18) y (19) dan posibilidad expresar el coeficiente de llenado por medio de la fracción σ_{air} y viceversa – expresar σ_{air} por medio del η_v .

Las computaciones de la presión media indicada realizadas según la Ecuación (15) dieron los mismos resultados que las efectuadas por medio de la fórmula tradicional ($p_i = \frac{H_u}{l_0} \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \rho_k$), en la cual la presión p_i se determina como una función del coeficiente de llenado que toma en cuenta las magnitudes de A y R'_c .

El cálculo de la fracción del aire por medio de los valores obtenidos experimentalmente del gasto real del aire también no debe de provocar algunas dificultades, pues que

$$\sigma_{air} = \frac{V_{air}}{V_{mezca}} = \frac{V_{air}}{V_a} = \frac{V_{air} \rho_k}{V_{mezca} \rho_k} = \frac{G_{air}}{G_{air}^a},$$

donde G_{air} es la masa auténtica del aire que fluye hacia el cilindro de un MCI, y la magnitud que está en el denominador es masa del aire que podría encontrarse en el volumen total del cilindro a parámetros de la entrada en el cilindro o – en ausencia de sobrealimentación – a los de medio ambiente.

De ese modo el cálculo de la fracción del aire puede ser efectuado por la ecuación

$$\sigma_{air} = \frac{G_{air} 10^3}{30n i V_a \rho_k},$$

donde

ρ_k es la densidad del aire a parámetros de la entrada en el cilindro,

G_{air} – el consumo verdadero del aire por hora,

n – frecuencia de rotación del cigüeñal y

$i V_a$ es el volumen total de todos los “ i ” cilindros de motor.

Tomando en consideración que

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1}$$

y la Ecuación (20)

$$\begin{aligned} V_a &= V_c + V_h \\ &= \frac{\varepsilon V_h}{\varepsilon - 1} \end{aligned} \quad (20)$$

se deduce finalmente

$$\sigma_{air} = \frac{(\varepsilon - 1) G_{air} 10^3}{30n \varepsilon i V_h \rho_k}.$$

Se puede constatar que la evaluación de los procesos de intercambio de gases por medio de fracciones en volumen de componentes de la mezcla de servicio simplifica considerablemente muchos cálculos termodinámicos. Así por medio de esas fracciones se puede determinar fácilmente la masa molecular aparente o media de la mezcla. En efecto

$$G = G_{cf} + G_r$$

o

$$\mu \cdot M = \sum_i \mu_{r_i} M_{r_i} + \mu_{cf_i} M_{cf_i}$$

Aquí μ_i y M_i son conformemente las masas moleculares y las cantidades de moles de componentes de la mezcla. Pero en el caso, cuando sea conocida, por ejemplo, la composición de los gases residuales (y los de recirculación), la cantidad de los kmoles de cualquier componente se determina como el producto de su fracción en volumen r_i por la cantidad total de moles de los productos de combustión, es decir

$$M_{r_i} = r_i M_r,$$

donde M_r es la cantidad total de los kmoles de gases residuales. En ese caso obtendremos [9, 15]

$$\mu \cdot M = \sum_i \mu_{r_i} r_i M_r + \sum_i \mu_{cf_i} r_{cf_i} M_{cf}.$$

Al tomar en cuenta que las fracciones molares son iguales a las en volumen, después de la división

por la cantidad de moles de la mezcla de servicio, es deducida la Ecuación (21)

$$\mu = \sigma_r \sum_i \mu_{r_i} r_{r_i} + \sum_i \mu_{c f_i} r_{c f_i}, \quad (21)$$

donde σ_r y σ_{cf} están determinados por las Ecuaciones (9) y (10).

En este caso la constante específica R de la mezcla de servicio puede ser determinada por la ecuación

$$R = \frac{8314}{\mu}.$$

3. Conclusiones

Como se deduce del análisis efectuado lo siguiente.

El uso de la metodología propuesta da posibilidad de tomar en consideración la influencia del tipo del combustible y de recirculación de los gases de escape en resultados de procesos del intercambio de gases y – respectivamente – en los datos de potencia de motor, los económicos y ecológicos (conforme a los resultados en [9, 10, 19].

En diferencia a los coeficientes η_v y γ_r la noción de fracciones de componentes se utiliza no solamente en la teoría de los motores de CI de pistón, sino en todas las esferas de ciencia y técnica

Las fracciones en volumen no solamente evalúan los resultados de intercambio de gases, sino también caracterizan la composición de la mezcla de servicio, lo que simplifica la determinación de todos sus parámetros termodinámicos.

Los valores de las fracciones de los componentes son directamente proporcionales al llenado en masa

$$G_i = \rho_i V_a \sigma_i,$$

donde ρ_i es la densidad de componente correspondiente a parámetros del punto “a” del diagrama.

Como la mayoría de los coeficientes adimensionales, incluso los de rendimiento, cualquiera fracción en volumen es limitada por la magnitud máxima que es igual a uno. El caso de la $\sigma_{cf}^{max} = 1$ corresponde al llenado ideal, cuando la mezcla de servicio no contenga los gases remanentes y se compone solamente de la carga fresca. (En el caso

de $\eta_v = 1$ no se toma en consideración el volumen de la cámara de combustión que puede contener alguna cantidad de los gases residuales. Es posible también que en el caso de $\eta_v = 1$ una parte de carga fresca se pierda en el transcurso del periodo de traslapo de válvulas (durante apertura simultánea de las válvulas de admisión y de escape).

Las ecuaciones deducidas demuestran la dependencia de características indicadas de motor del tipo del combustible usado y del grado de recirculación.

La evaluación de la calidad de llenado por medio de las fracciones de la mezcla fresca y los gases remanentes es clara y cómoda didácticamente, pues que entre las fracciones y cantidades de la CF y los GR en el cilindro existe la dependencia univoca (la que ausente entre η_v y η_r)

$$\begin{aligned} V_a = V_{PC} &= V_B + V_T + V_r + V_R \\ &y \\ V_a = V_r + V_{cf}, &\quad \sigma_{cf} = 1 - \sigma_r. \end{aligned}$$

El uso en los cálculos de los procesos de llenado de las fracciones en volumen de la carga fresca y de los gases residuales da posibilidad de determinar la masa molecular aparente y constante específica de la mezcla de servicio incluso en el caso de la utilización de la recirculación de los gases de escape.

El uso de las fracciones de la mezcla de servicio en los programas aplicados modernos para el cálculo de los motores de CI de pistón puede reducir el tiempo del cálculo por causa de disminución de la cantidad de variables.

4. Referencias

- [1] V. N. Lukanin. *Internal Combustion engines*. MIR Publishers, 2 edition, 1990.
- [2] M.S Jóvaj. *Motores de automóvil*. Editorial MIR, 1982.
- [3] Volkmar Küntscher. *Kraftfahrzeugmotoren*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1989.
- [4] B.A. Sharoglasov and V.A. Povaljaev. Calculated estimate of the admission quality with the incoming charge of the piston engine cylinders at the designing stage. *Bulletin Of The South Ural State University. Series Mechanical engineering*, (23):20–24, 2008.
- [5] A.P. Baskakov. *Termotecnica*. Editorial MIR, 1985.

- [6] Leonid M. Matyukhin and Benigno Vargas. El análisis termodinámico de los procesos de intercambio de los gases en los motores de combustión interna. *Revista Tecnología-hoy: Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá*, 4:22–24, 2000.
- [7] Leonid M. Matyukhin. The alternative of the volumetric efficiency. In *Collected articles "Engine 2007"*, pages 80–85. Moscow, 2007.
- [8] Leonid M. Matyukhin. Evaluation of results for the gas exchange processes by the use of volumetric ratios of air-fuel-residual gases-mixture. In *Science and Education, Materials of the VIII international research and practice conference*, pages 337–345, Waldkraiburg–Munich–Germany, 2015. Vela–Verlag.
- [9] Leonid M. Matyukhin. *Analysis of filling and thermal calculation of the ICE on the basis of the working mixture*. LAP LAMBERT Academic, Saarbrücken, 2011.
- [10] Leonid M. Matyukhin. The estimation of an engine filling and indicator factors. *AutoGas Filling Complex + Alternative fuel*, 1(61):15–18, 2012.
- [11] G.G. Ter-mkrtichyan, A.M. Saikin, K.E. Karpukhin, A.S. Terenchenko, and Yu.G. Ter-mkrtichyan. Diesel-to-natural gas engine conversion with lower compression ratio. *Pollution Research. Enviro Media*, 36(3):678–683, 2017.
- [12] G.G. Ter-Mkrtichyan. Engine with quantitative throttles power regulation. *Avtomobil'naya promyshlennost' (Automotive industry)*, (3):4–12, 2014.
- [13] Ter-Mkrtichyan G.G. Engines featuring extended expansion phase. *Dvigatelstroyeniye (Engine building)*, (5):3–9, 2015.
- [14] Leonid M. Matyukhin. The universal formula of the delivery ratio for conventional four stroke engines calculation of internal-combustion engines for the 4-stroke internal combustion engine. *Bulletin of MADI (STU)*, 3(22):39–43, 2011.
- [15] Leonid M. Matyukhin. The utilization of the volumetric ratios of the components in the air-fuel-residual gases-mixture for the thermal calculation of internal-combustion engine. *Bulletin of MADI*, 1(8):46–51, 2007.
- [16] Leonid M. Matyukhin. Indicated measures of the -combustion engines. *Bulletin of MADI (STU)*, 4(27):26..29, 2011.
- [17] L. Matiukhin and G. Ter-Mkrtichyan. Thermodynamic fundamentals of the engine operational cycle with a shortened intake ore compression based on working mixture analysis. *Works of NAMI: Coll. of Sci. Art.*, (263):35–44, 2015.
- [18] G.G. Ter-Mkrtichyan. Engines with modified operating cycle and overexpansion. *Works of NAMI: Coll. of Sci. Art.*, (259):59–71, 2014.
- [19] Leonid M. Matyukhin. The analysis of the gas exchange and calculation of the composition of the air-fuel-residual gases-mixture in the gas engines. *Bulletin of MADI (STU)*, 4(11):5–7, 2007.

Analysis of the manning roughness coefficient variation in regard to the channel slope of 315 mm diameter PVC

Alejandro Araya I., Valentina González C. y Maryelvi Jiménez*

Laboratorio de Mecánica de los Fluidos, Departamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- The Manning roughness coefficient is an index which determines the resistance of a flow in a channel, because of this and the possibility of calculating this coefficient that this study intends to determine the influence of the slope of a channel on the Manning roughness coefficient. The study will be carried out in a PVC pipeline under an already constructed physical model that allows its estimation according to the most important parameters of the Manning equation. The tests were carried out on a 315 mm diameter pipe, manufactured by Tubrica, where 8 flows between 0.006 m³/s and 0.027 m³/s were flown and at the same time 11 types of slopes between 18.7500‰ and 12.8125‰ were calibrated for each flow. According the tests carried out in this research, a Manning coefficient value of 0.0098 was obtained with an efficiency of 82.16 %. With this value and the graphs made, it is demonstrated that the slope of the channel does not cause an influence on the Manning coefficient.

Keywords: Manning roughness coefficient; Manning equation; PVC.

Análisis de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con respecto a la pendiente del canal en tubería de PVC de 315 mm de diámetro

Resumen.- El coeficiente de rugosidad de Manning es un índice el cual determina la resistencia de un flujo en un canal, es por esto, y por la posibilidad de calcular este coeficiente que se pretende determinar la influencia de la pendiente de un canal en el coeficiente de rugosidad de Manning. Dicho estudio se realizará en una tubería de PVC bajo un modelo físico ya construido que permite su estimación en función de los parámetros más importantes de la ecuación de Manning. Se realizaron los ensayos en la una tubería de 315 mm de diámetro, fabricada por la empresa Tubrica en donde se hicieron circular 8 caudales entre 6 lt/s y 27 lt/s y a su vez se calibraron 11 tipos de pendientes entre 18,7500‰ y 12,8125‰ para cada caudal. Tomando en cuenta los ensayos realizados en la investigación, se obtuvo un valor de coeficiente Manning de 0,0098 con una eficiencia del 82,16 %. Con este valor obtenido y las gráficas realizadas queda demostrado que la pendiente del canal no ocasiona una influencia en el coeficiente de Manning.

Palabras claves: coeficiente de rugosidad de Manning; ecuación de Manning; PVC.

Recibido: diciembre 2017

Aceptado: febrero 2018

1. Introducción

Por razones de proyecto, se considera primordial el poder garantizar que los materiales utilizados en obra trabajen lo más eficientemente posible, que cumplan con la norma respectiva para cada país y a su vez que se garanticen menores costos en obra.

Para esto, se deben realizar una serie de ensayos con la ayuda de los avances tecnológicos en donde se estudien materiales innovadores, como lo son en la presente investigación las tuberías de PVC, las cuales brindan una serie de beneficios a nivel constructivo y logran una ventaja en obra por su rápida ejecución.

El propósito del estudio consistió en determinar si es necesario la adición de otros factores que se ven influenciados en la ecuación del coeficiente de Manning, aparte de los expuestos por Chow (2004) [1], debido a que estudios anteriores dejan como incertidumbre si la pendiente puede ser uno de estos

* Autor para correspondencia:

Correo-e:maryelvi@gmail.com (Marielvi Jiménez)

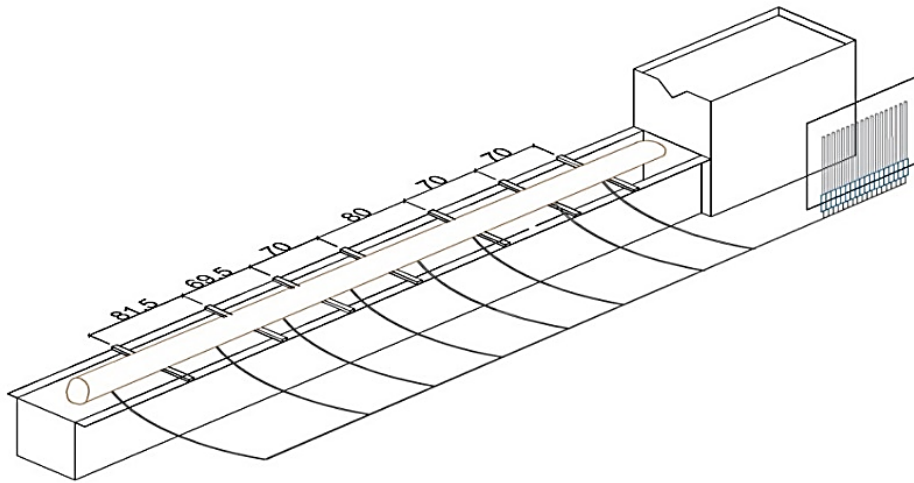


Figura 1: Modelo físico en 3D construido por Carrillo y Duque (2016).

factores que afecte al coeficiente de rugosidad de Manning.

Es un hecho que la Norma Venezolana [2] debe ser actualizada, para que de esta manera se pueda regir con valores de coeficiente de rugosidad de Manning cada vez más adaptados y actualizados a los ensayos realizados. Es por esto y por la razón planteada anteriormente que se desarrolla esta investigación la cual se encuentra constituida con la manera descrita a continuación.

2. Metodologia

2.1. Identificación de pendientes en las que se pueda ensayar la tubería

Esta fase consta de la identificación de pendientes a las que se pueda ensayar la tubería, por no poseer un sistema especializado para esto se decidió realizar en el modelo físico construido por Carrillo y Duque (2016) [3] ver Figura 1, dicho modelo se aplica al canal utilizado para la práctica de vertedero triangular del laboratorio Elías Sánchez Díaz de la Universidad de Carabobo y está constituido por: la tubería en estudio, un banco piezométrico de 20 mangueras, 7 listones de madera en el que se reposa la tubería para así regular su pendiente, una tolva que recoge todo el caudal saliente del vertedero y un pequeño gavión.

Para determinar el rango de pendientes se debe verificar la altura máxima que permite la tolva con el vertedero triangular.

2.2. Ensayos a la tubería de PVC

La segunda fase comprende el ensayo de la tubería de PVC de 315 mm de diámetro, utilizando el procedimiento descrito por Carillo y Duque (2016), en el que se recolectan los datos de alturas de agua tanto en el medidor de punta del vertedero triangular como en cada uno de los piezómetros del banco cuando circulaba agua o no en la tubería.

2.3. Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería de PVC

Una vez realizadas las mediciones en los ensayos, se inicia la tercera fase de la investigación, en la cual primero se calculan las variables caudal, pendiente y elementos geométricos para canal circular de cada ensayo, luego se procede a calcular los coeficientes utilizando la ecuación de Manning, en donde se utilizará la pendiente física para calcular los coeficientes teóricos y la pendiente de la línea de energía para calcular los coeficientes experimentales, y por último se procede a realizar el cálculo de los coeficientes de Manning óptimos para cada pendiente con el método del error cuadrático medio (ECM). Una vez obtenidos estos números de Manning óptimos se realizan dos promedios uno aritmético y otro ponderado, el valor obtenido será el coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería de PVC.

2.4. Determinación de la influencia de la pendiente del canal con el coeficiente de rugosidad de Manning en tubería de PVC

Por último, la cuarta fase comprenderá la determinación de la influencia de la pendiente del canal con el coeficiente de Manning obtenido en la fase anterior. Para ello se desarrollaran las siguientes actividades:

1. La elaboración de gráficas donde se evidencien los resultados de n óptimos obtenidos en los pasos anteriores con respecto a las pendientes, para así analizar cuál es el comportamiento del coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería de PVC de 315 mm.
2. Elaboración de gráficas de los valores de profundidad del flujo promedio con respecto al coeficiente de Manning promedio de cada caudal, y se analiza la influencia de la variación de la profundidad en el coeficiente.
3. Elaboración de gráficas de los valores de perímetro mojado promedio con respecto al coeficiente de Manning promedio de cada caudal, y se analiza la influencia de la variación del perímetro mojado en el coeficiente.

A su vez los resultados obtenidos pueden ser verificados o comparados con la normativa legal que este rigiendo los coeficientes de rugosidad de Manning de las tuberías de las características estudiadas.

3. Resultados de la investigación

3.1. Identificación de pendientes en las que se pueda ensayar la tubería

Se realiza el montaje del modelo construido por Carrillo y Duque, para verificar cuales son los valores de pendiente que se pueden analizar en el equipo existente, tomando en cuenta que se realizarán las mayores pendientes posibles.

La variación de la pendiente experimental será medida a partir de las alturas del banco piezométrico. Para este procedimiento se instalaron las mangueras del banco piezométrico en los puntos ya existentes por la parte inferior de la tubería y se asegura que no presente pérdidas.

La variación de la pendiente física del modelo se ajustará con listones de madera de pino acoplados al tope del canal con el uso de unas barras roscadas, arandelas y tuercas, que al ser graduadas se podrá ajustar el modelo a la pendiente que se quiera estudiar. La tolva nos dará el tope de pendiente máxima y el mínimo será la menor pendiente posible a estudiar.

Una vez realizado el correcto montaje del modelo y considerando que las perforaciones no presentan variaciones ya que es la misma tubería, se utilizaran las mismas distancias entre los piezómetros presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Espaciamiento y distancia acumulada entre los piezómetros.

Piezómetros	Δx (cm)	DA (cm)	Piezómetros	Δx (cm)	DA (cm)
1 - 2	40	40	10 - 11	20	220
2 - 3	20	60	11 - 12	40	260
3 - 4	20	80	12 - 13	20	280
4 - 5	20	100	13 - 14	20	300
5 - 6	20	120	14 - 15	20	320
6 - 7	20	140	15 - 16	20	340
7 - 8	20	160	16 - 17	20	360
8 - 9	20	180	17 - 18	20	380
9 - 10	20	200	18 - 19	20	400

Δx : Espaciamiento entre piezómetros.

DA: Distancia acumulada.

Una vez terminado el montaje del modelo físico se procedió a colocar los listones de madera apoyados lo más cerca posible del canal del vertedero rectangular para así obtener la altura mínima posible en el modelo antes mostrado.

Por otra parte, se midió la diferencia de altura entre la cresta y la boca de entrada de la tolva, en donde se obtuvo como valor de cuatro (4) cm de altura, es por esta razón que se decidió bajar a 0,25 cm en los primeros dos (2) cm tomando un total de nueve (9) pendientes y en el siguiente centímetro a cada 0.5 cm dando como resultado dos (2) pendientes más, obteniendo un total de once (11) pendientes a evaluar para ésta investigación.

3.2. Ensayos a la tubería de PVC

El ensayo de la tubería se realizó a distintas pendientes, para esto se tomó como referencia las

alturas a las que se subió la tubería explicadas en la sección 3.1 y en cada una de las pendientes se procedió a circular un total de ocho (8) caudales.

Una vez colocada la tubería en la altura respectiva se procedió a tomar las lecturas en cada uno de los diecinueve (19) puntos del banco piezométrico cuando no circulaba agua en la misma.

Para que los caudales fuesen prácticamente los mismos en cada pendiente a ensayar, se decidió controlarlos con las vueltas que se le daba a la válvula. Finalmente se tomó como máximo diez (10) vueltas y a partir de ahí reducir una (1) vuelta por cada medición, teniendo como caudal menor una apertura de tres (3) vueltas de la válvula del vertedero triangular, lo cual resulta el total previamente establecido de ocho (8) caudales por pendiente en estudio.

Al abrir la válvula se esperaba un tiempo de 5 minutos para que el flujo se estabilizara y una vez estabilizado el flujo, se tomó la altura de agua en el medidor de punta y se recolectaron los datos de las alturas piezométricas medidas en el banco piezométrico. Durante las mediciones se tomó la decisión de descartar los valores de los piezómetros 1, 2, 3 y 4, debido a que se encontraban en zonas donde se presume que el flujo se encontraba en un régimen turbulento, y los piezómetros 7 y 18 se descartaron debido a que las mangueras piezométricas estaban presentando posibles fallas por la presencia de burbujas o alguna suciedad interna. Todos los datos recolectados de alturas piezométricas fueron tabulados a medida que se realizó cada ensayo.

3.3. Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería de PVC

Esta fase comprende todo el procedimiento de cálculo que se llevó a cabo para la posterior determinación del coeficiente de rugosidad de Manning en la tubería de PVC de 315 mm de diámetro fabricada por la empresa TUBRICA.

3.3.1. Cálculo de pendiente, caudal y elementos geométricos

A partir de las lecturas tomadas en cada uno de los puntos del banco piezométrico cuando no

circulaba agua, se procede a calcular la pendiente con la ecuación (1) utilizando el primer piezómetro (5) y el último (19) con su separación respectiva, de esta manera se obtuvo así el valor de la pendiente física de la tubería.

$$\rho = \frac{h_i - h_f}{S} \quad (1)$$

Teniendo el valor del medidor de punta con el caudal estabilizado y las características geométricas del vertedero triangular se procede a calcular el caudal para vertederos con la ecuación (2).

$$Q = \frac{8}{15} C d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{2gH^5} \quad (2)$$

Por último se calculan los elementos geométricos y las velocidades de flujo con las ecuaciones para canales circulares en cada piezómetro.

$$\begin{aligned} \theta &= \pi - 2\text{ArcSen}\left(1 - \left(\frac{2y}{D}\right)\right) \\ A_m &= \frac{1}{8} D^2 \left(\theta - \text{Sen}\left(\frac{\theta 180}{\pi}\right)\right) \\ P_m &= \frac{1}{2} \theta D \\ Q &= VA = V_1 A_1 = V_2 A_2 \end{aligned}$$

3.3.2. Cálculo del coeficiente de Manning teórico

Este cálculo se realiza por cada sección de la tubería representada por cada piezómetro, donde se utiliza las condiciones experimentales (caudal y tirante de agua) y la pendiente física del ensayo. La Tabla 2 presenta los valores de n teóricos obtenidos para la condición de caudal y pendiente dada.

3.3.3. Cálculo del coeficiente n de Manning experimental

Este cálculo se realiza por cada tramo de la tubería limitada entre dos secciones, partiendo del análisis de un flujo gradualmente variado, donde se utiliza las condiciones experimentales (caudal y tirante de agua) y la pendiente de la línea de energía del flujo del tramo. Como se trata de un flujo gradualmente variado las pendientes de la línea de energía en cada tramo varían irregularmente a lo largo de la tubería, por lo que se procede a calcular

Tabla 2: Valores de n promedios teóricos.

Caudal (l/s)	Pendientes (‰)								
	18,75000	17,18750	16,87500	16,56250	16,25000	15,62500	13,750000	13,12500	12,81250
1	0,00531	0,00600	0,00651	0,00597	0,00571	0,00639	0,00574	0,00649	0,00602
2	0,00063	0,00645	0,00679	0,00656	0,00630	0,00685	0,00609	0,00682	0,00650
3	0,00690	0,00708	0,00681	0,00701	0,00665	0,00721	0,00656	0,00755	0,00670
4	0,00725	0,00755	0,00750	0,00705	0,00671	0,00732	0,00654	0,00734	0,00694
5	0,00724	0,00748	0,00756	0,00734	0,00710	0,00752	0,00682	0,00737	0,00701
6	0,00733	0,00733	0,00775	0,00729	0,00751	0,00766	0,00688	0,00757	0,00725
7	0,00736	0,00745	0,00753	0,00759	0,00720	0,00762	0,00729	0,00767	0,00714
8	0,00750	0,00748	0,00796	0,00753	0,00730	0,00762	0,00708	0,00774	0,00725

Tabla 3: Valores de n promedios experimentales.

Caudal (l/s)	Pendientes (‰)								
	18,75000	17,18750	16,87500	16,56250	16,25000	15,62500	13,750000	13,12500	12,81250
1	0,009	0,010	0,009	0,011	0,010	0,011	0,010	0,011	0,010
2	0,009	0,011	0,009	0,012	0,011	0,011	0,011	0,012	0,011
3	0,010	0,011	0,009	0,011	0,012	0,011	0,011	0,013	0,012
4	0,010	0,013	0,009	0,012	0,011	0,012	0,010	0,012	0,011
5	0,011	0,012	0,010	0,012	0,012	0,012	0,011	0,013	0,011
6	0,011	0,011	0,010	0,013	0,014	0,012	0,012	0,013	0,012
7	0,013	0,012	0,011	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
8	0,012	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

la línea de tendencia que se adapte mejor a los puntos de energía y la pendiente de esta línea de tendencia se toma como la pendiente para todos los tramos, tal como se presenta en la Figura 2.

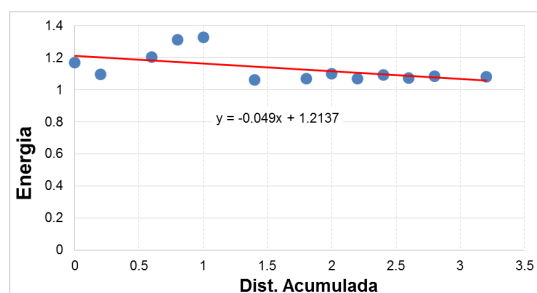


Figura 2: Energía vs Distancia acumulada entre secciones de la tubería para pendiente 18,7500‰ y caudal 25,1278 lt/s.

Una vez corregido este valor obtenemos así los valores promedios contenidos en la Tabla 3.

3.3.4. Cálculo de los coeficientes de Manning óptimos

Posteriormente, se calcularon los indicadores de ajuste para cada prueba y se realizó la generación de las curvas (n , ECM) y obtención del coeficiente n de Manning óptimo. Donde se graficó, para cada condición de caudal, el error cuadrático medio ECM y el coeficiente n de Manning promedio experimental, se trazó la curva más probable y el punto cuyo ECM sea menor, se tomará como el valor del coeficiente de rugosidad de Manning óptimo de la pendiente, dicho procedimiento se puede observar en la Figura 3 para la condición de pendiente 18,7500‰.

La Tabla 4 presenta los coeficientes de Manning óptimos de cada una de las pendientes en estudio.

A través de un promedio de los valores óptimos del coeficiente n de Manning de la tubería para cada condición de caudal determinamos el coeficiente de rugosidad de Manning final: $\eta = 0,0098$.

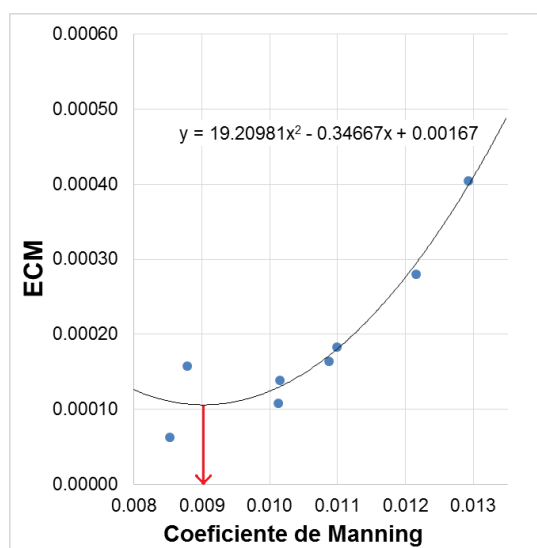


Figura 3: Variación del coeficiente de Manning óptimo con respecto a la pendiente de la tubería.

Tabla 4: Valores de n óptimo por prueba.

Pendiente ‰	N Optimo	Eficiencia ‰
18,75	0,009	85,92
17,1875	0,0106	81,22
16,875	0,0084	91,18
16,5625	0,0113	80,01
16,25	0,0094	78,8
15,625	0,0113	81,89
13,75	0,0083	80,57
13,125	0,0094	79,89
12,8125	0,0102	80,01
Sumatorias	0,08796	739,48
Promedios	0,00977	82,16
Promedio Ponderado	0,00975	

3.4. Análisis de los resultados obtenidos del coeficiente de rugosidad de Manning

Para determinar si la pendiente tiene una influencia directa en el coeficiente de Manning de la tubería procedemos a analizar los datos obtenidos en el objetivo anterior.

En primer lugar, debemos analizar como varían los coeficientes de Manning óptimos en las pendientes estudiadas, donde se puede observar que los valores nunca salen del rango entre 0,008 y 0,012, y no tienen una tendencia de aumentar o disminuir uniformemente. Por esto procedemos a presentar estos valores en la Figura 4, donde se decide calcular la línea de tendencia y se puede

apreciar así que su pendiente es muy cercana a 0‰ y al valor determinado en los promedios del objetivo anterior.

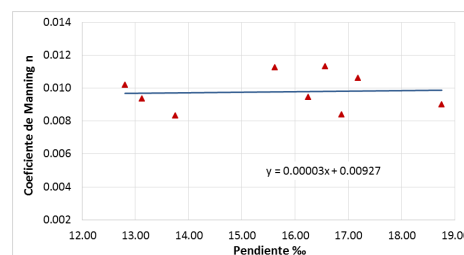


Figura 4: Variación del coeficiente de Manning óptimo con respecto a la pendiente de la tubería.

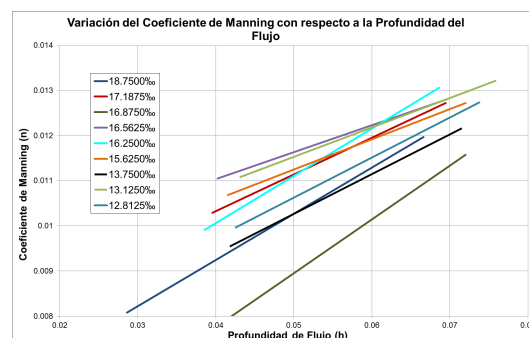


Figura 5: Variación del coeficiente de Manning con respecto a la profundidad del flujo con líneas de tendencia.

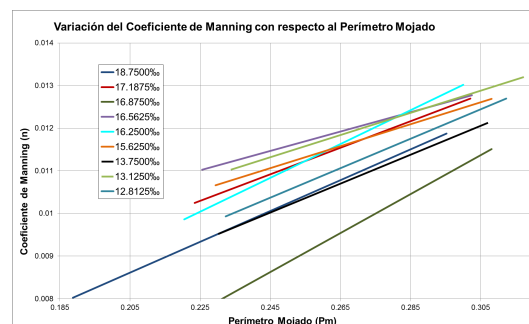


Figura 6: Variación del coeficiente de Manning con respecto al perímetro mojado con líneas de tendencia.

Las Figuras 5 y 6 reflejan una serie de rectas de tendencia para todos los valores de profundidad del flujo y perímetro mojado con respecto al coeficiente de rugosidad de Manning n para cada condición de pendiente. En dichas gráficas se

observa como a medida que el caudal aumenta, la profundidad del flujo y el perímetro mojado aumentan y por ende los valores del coeficiente de rugosidad de Manning también aumentan.

En ninguno de los libros consultados se observa que la pendiente del canal genere una variación en el coeficiente de Manning de la tubería, sin embargo la variación del caudal y por ende la profundidad del flujo y el perímetro mojado, si son factores que afectan al coeficiente de rugosidad de Manning, cosa que concuerda con las Figuras 5 y 6, y lo dicho por Bolinaga (2007) [4], en donde afirma que a medida que se ha ido ampliando la aplicación de la fórmula de Manning, se han incorporado un conjunto de factores que afectan el valor de n , como los mencionados por Chow (2004) que incluyen al caudal y otros factores; sin embargo dicho factor puede variar con la profundidad del flujo.

A modo de ejemplo y corroborando lo dicho anteriormente, se puede observar como en la Figura 5 para un valor de profundidad de flujo (h) de 0,05 metros, se nota como para la línea de tendencia de la pendiente 18,7500‰ (color lima) el valor de coeficiente de Manning es de 0,0103, en la pendiente 17,1875‰ (color rojo) el valor de coeficiente de Manning aumenta a 0,0111, y en la pendiente 16,8750‰ (color morado) el valor de coeficiente de Manning disminuye a 0,009.

4. Conclusiones

Realizado el montaje del modelo físico de Duque y Carrillo (2016) y una vez ensayada la tubería de PVC de 315 mm de diámetro de la empresa Tubrica bajo las condiciones de pendiente y caudal definidas se presentan las siguientes conclusiones:

En función de todos los datos recolectados y del procedimiento de cálculo descrito, se determinaron los coeficientes de rugosidad de Manning óptimos de la tubería y se obtuvo un coeficiente de rugosidad de Manning n promedio de 0,0098 para la tubería de PVC ensayada, calculado con una eficiencia del 82,16 %. De todos los ensayos realizados se puede definir que el rango de variación de los coeficientes va desde 0,00853 hasta 0,01361.

El número de Manning varía en relación al perímetro mojado y por ende a la profundidad del flujo, sin embargo, al determinar el valor del coeficiente de rugosidad de Manning bajo el patrón del error cuadrático medio para un determinado número de ensayos, se toma el valor de aquel que cometa, en promedio, el menor error en la estimación ya sea por defecto o por exceso. Con lo dicho anteriormente, y con los valores de coeficientes obtenidos para cada pendiente, se obtiene un valor con tendencia a una constante.

El presente estudio realizado para pendientes entre 18,7500‰ y 12,8125‰, pudo demostrar que la pendiente no es una variable que afecte al coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2017.

5. Referencias

- [1] Ven Te Chow. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill, Colombia, 2004.
- [2] República de Venezuela. Normas generales para el proyecto de alcantarillados. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, 5.318 Extraordinario, 1999.
- [3] Luis A. Carrillo G. and Sandra C. Duque L. Evaluación del coeficiente de rugosidad de Manning en tubería de PVC para drenaje urbano de 315mm de diámetro, fabricada por la empresa Tubrica. Trabajo Especial de Grado, Departamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad De Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2016.
- [4] J. J. Bolinaga. *Mecánica Elemental de los Fluidos*. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, 2007.

Design of Neural Networks on microcontrollers, applied in functional modules for an eco-park

David J. Steckler V.^a, Cesar Nava^a, Jonattan Duarte^a, José Jhoan Zambrano^a y Cecilia E. Sandoval-Ruiz^{*,b}

^a*Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

^b*Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- This paper presents a technique for implementing neural networks -RNA in hardware, from a prototype to scale to improve the management and production of self-generated electrical energy. The method consisted in the modular design of applications, using a micro-controller, for the control of the subsystems, which interact with each other, with the aim of providing efficient service to an ecological park, incorporating a pet food dispenser, conversion of hybrid electric power (solar and turbine for energy production from rainwater), a predictor of electricity consumption. This research consists of the configuration of the neural network models for each module, their training, tests of network behavior and validation, through the tool designed for the management and programming of subroutines in the micro-controller. The result is an integrated neural system, with monitoring of the target for each function and a didactic platform for modeling adaptive and multilayer neural networks. Its contribution is given by the design of neuronal applications, ideal for its flexibility, oriented to sustainable technology and intelligent control.

Keywords: neuro-control; adaptive network; multilayer network; microcontroller; ecological park; renewable sources.

Diseño de Redes Neuronales sobre microcontroladores, aplicadas en módulos funcionales para un eco-parque

Resumen.- Este trabajo presenta una técnica de implementación de redes neuronales -RNA en hardware, a partir de un prototipo a escala para mejorar la gestión y producción de energía eléctrica autogenerada. El método consistió en el diseño modular de aplicaciones, usando un micro-controlador, para el control de los subsistemas, que interactúan entre sí, con el objetivo de proveer servicio eficiente a un parque ecológico, incorpora un dispensador de alimento para mascotas, sistemas de conversión de energía eléctrica híbrida (solar y turbina para producción de energía a partir de agua de lluvia), un predictor de consumo eléctrico. Esta investigación consta de la configuración de los modelos de red neuronal para cada módulo, su entrenamiento, pruebas de comportamiento de la red y validación, a través de la herramienta diseñada para el manejo y programación de subrutinas en el micro-controlador. Se obtiene como resultado un sistema neuronal integrado, con seguimiento del target para cada función y una plataforma didáctica para modelado de redes neuronales adaptativas y multicapa. Su aporte está dado por el diseño de aplicaciones neuronales, idóneo por su flexibilidad, orientado a tecnología sostenible y control inteligente.

Palabras claves: neuro-control; red adaptativa; red multicapa; microcontrolador; parque ecológico; fuentes renovables.

Recibido: agosto 2017

Aceptado: marzo 2018

1. Introducción

Actualmente se plantean objetivos de desarrollo sostenible, que apuntan a la producción de una energía sin emisiones contaminantes, lo que ha

definido un área de investigación en la materia, como estrategia de solución a los efectos propios de problemas ambientales. En tal sentido, el grupo de investigación en Redes Neuronales Aplicadas al procesamiento de señales, se ha propuesto el desarrollo de un sistema de control neuronal, orientado a un parque ecológico (en las inmediaciones de la Universidad), como solución didáctica para promover los diseños sostenibles. Esto por tratarse de un punto estratégico que tendrá impacto positivo en la comunidad universitaria,

* Autor para correspondencia:

Correo-e: cecisandova@yahoo.com (Cecilia E. Sandoval-Ruiz)

sobre el cual se pueden formular nuevas propuestas. En trabajos previos se han desarrollado sistemas que integren módulos de conversión de energía renovable [1, 2], siendo relevante el diseño del sistema de control neuronal [3, 4, 5], para mejorar el tratamiento de las señales en sistemas de ingeniería sostenibles. Además, se ha considerado el parque como un sistema eco-adaptativo [6], incorporando un conjunto aplicaciones, como solución a la demanda de energía de éste, a la vez de presentar un desarrollo tecnológico.

Algunos conceptos como diseño sostenible, Smart Grid [7], aplicaciones inteligentes en urbotica, sistemas eco-adaptativos [6], neuro-control en microneces de conversión de energías alternativas, aportan los avances en tecnología de redes neuronales aplicadas a energías renovables. El propósito de esta investigación es desarrollar un sistemas de control neuronal, basado en programación de microcontroladores en lenguaje C (versión libre de prueba), partiendo de conceptos de inteligencia artificial, como lo son las redes neuronales artificiales. Esto bajo criterios de control orientado a eficiencia energética, dadas las tendencias en energía renovables [8]. Es así como se propone un conjunto de funciones para un parque ecológico, definidas como: seguimiento de máxima eficiencia [5, 9]; un gestor de fuentes de energía, incorporando energía hidroeléctrica a pequeña escala, energía solar [4], estimación del consumo de energía [10] y predicción adaptativa, así como la automatización de un módulo dispensador de alimentos para la fauna del parque [11]. Tales ideas agregan la independencia y autonomía necesarias para mayor optimización de un sistema integrado.

Una vez definido el sistema a diseñar, se seleccionó el hardware de soporte, tomando en consideración trabajos con implementación de redes neuronales en hardware [12, 13, 14], el estudio de las tecnologías disponibles, las ventajas de su diseño en aplicaciones de dispositivos electrónicos inteligentes [15] y estudiando la programación de las redes neuronales sobre micro-controladores [16], configuración la topología de la red, el método de entrenamiento en circuito y el diseño de una interface de control neuronal de los procesos, la cual permita seleccionar las acciones a

tomar y el monitoreo del comportamiento de la red. Se seleccionó esta tecnología por las características del diseño modular, con puertos de manejo de señales del parque ecológico.

El proyecto comprende el diseño e implementación de un conjunto de modelos de control electrónico en hardware, a través de diversas redes neuronales, seleccionadas de acuerdo a su función: conversión de energía eléctrica y manejo de accionamientos, así como un análisis del impacto ambiental del diseño, que se vería reflejado en un balance eficiente de las cargas con la red eléctrica pública, ayudando a bajar el consumo energético a partir de fuentes alternativas. Partiendo del diseño conceptual del sistema integrado de convertidores de energía renovable y los módulos inteligentes, para lo cual se establece una selección de tipos de redes neuronales, diseño, entrenamiento y validación.

2. Diseño del Sistema de Control Neuronal

Este diseño está basado en la arquitectura de redes neuronales artificiales, conformadas por un conjunto de neuronas, que intercambian información, a través de conexiones, cada una de éstas tendrá una ponderación relacionada con el proceso de aprendizaje. La información procede de las señales de entrada a la red $p(n)$, tendrá una estructura de capa oculta, capa de salida que procesan la información, a fin de obtener las señales de salida $a(n)$ de la red RNA. Otro aspecto de interés es los métodos de optimización del algoritmo de aprendizaje, en este caso una vez identificada la estructura del ponderador, representado por: $w_i \cdot x_i$ puede ser implementado en hardware como una neurona, de manera que al optimizar el entrenamiento, el valor de w_i se puede establecer por aproximaciones sucesivas, requiriendo b iteraciones, de acuerdo al número de bits del peso, de esta manera se puede optimizar, de manera más eficiente, empleando el método de proporcionalidad de los aportes por neurona basados en $\Delta e(n)$.

En este proyecto, se abordaron las redes con topología predictiva lineal simple, lineal adaptativa y redes multicapa con interacción hacia adelante –

FeedForward (usando el Neural Network Toolbox), las cuales son importantes para el tratamiento de las señales y reconocimiento de clases. Estas redes se reconocen por su arquitectura dada en función al número de capas y la definición del algoritmo de entrenamiento: *incremental*, para la adaptación de los parámetros desde el circuito, con las entradas y targets de la red o *BackPropagation* [5], [17] para redes multicapa – MPL, con interacción hacia adelante, con la propagación hacia atrás del error, se maneja un diferencial del error de la red, para corregir los pesos sinápticos de la capa oculta, que son proporcionales a la relación de la función de la neurona estudiada, estos algoritmos se presentan en la Figura 1, los cuales serán la base de la programación para su implementación sobre el microcontrolador.

```

x(n) = leer puerto; ←
patrón a entrenar (vector de R entradas)
e(n) = t(n) - w(n).x(n); error de la neurona para el patrón n
ea = e(n) + ea; error acumulado
-- Cálculo del error para el patrón x(n) → t(n)
For i=1 to R para cada entrada n patrones
wi(n+1) = wi(n) + α·e(n)·xi(n) -- Se actualizan los pesos next
-- Verificación de condición de parada
et(i) = ea / n; error promedio de la iteración
if et(i) < 0.00999 then comprobación del error
Goto Entrenamiento; si el error es mayor ir nueva iteración
endif;

```

(a) Incremental.

```

Para cada patrón p hacer:
Asignación de las entradas i hacer:
xi ← pi
Para cada capa c* hacer:
in_j ← ∑_{i=0}^n w_{j,i} · xi
y_j ← g(in_j)
Para cada nodo k en la capa de salida hacer:
Δe_k ← g'(in_k) · (y_k - t_k) ←
Para cada capa c (M-1 a 1) hacer:
Para cada nodo j de la capa c hacer:
Δe_j ← g'(in_j) · ∑_{j=0}^n w_{k,j}(n) · Δe_k
Para cada neurona j de la capa c+1 hacer:
w_{j,i}(n+1) ← w_{j,i}(n) + α · Δe_j · x_j(n)
Hasta que se alcance el criterio de parada

```

(b) BackPropagation.

Figura 1: Algoritmos de Entrenamiento para las RNA.

Los módulos componentes han sido definidos como: (1) Sistema de reconocimiento, basado en características (codificadas en binario), para ofrecer una clasificación y salida proporcional, de

acuerdo a la definición establecida, para aplicación de un dispensador inteligente de alimentos para mascotas [11], éste se basa en una red lineal, la cual mediante sensores de detección de características comprueba la presencia, detecta la forma de dos tipos de animales, así como la información de peso y tamaño, donde la red lineal decide tipo y cantidad de alimento. (2) Sistema Predictor simple para carga de baterías con mini-turbinas accionadas por agua de lluvia, (3) Sistema Predictor adaptativo para consumo eléctrico, implementado mediante una red neuronal predictiva adaptativa, ésta permitirá la conexión y desconexión del suministro directo a la carga de la red, permitiendo así la extensión de la durabilidad de las baterías u otro dispositivo de almacenamiento de energía y el aporte extra de energía solar en horas no pico, siendo esta práctica más ecológica al alargar la vida útil del dispositivo, así como un (4) Prototipo de optimizador de un sistema foto-voltaico, con controlador de posicionamiento de paneles solares, aplicando una red neuronal MPL hacia adelante, la cual permitirá el seguimiento en tiempo real de la máxima irradiación solar y así el aprovechamiento máximo de la conversión de energía eléctrica, para máxima eficiencia, todo esto basado en redes neuronales.

De esta manera, se han establecido los subsistemas, para un parque, el cual busca el aprovechamiento máximo de energía del medio ambiente, para mantener un principio ecológico en sus actividades, las cuales provean un servicio a la comunidad visitante y a sus mascotas Figura 2.

Descripción de los módulos inteligentes del parque ecológico

En primer lugar la aplicación del dispensador de alimentos para la fauna del parque, el cual se diseñó a través de una red neuronal con función lineal, donde se entrenó la red a partir de 24 patrones que están formados por 13 bits cada uno representados por diferentes sensores, la salida de la red neuronal responderá con un numero dependiendo de sus respectivas entradas binarias y luego tomará una decisión para dosificar el tipo de alimento y la cantidad necesaria. Las 13 entradas binarias estarán conformadas de la

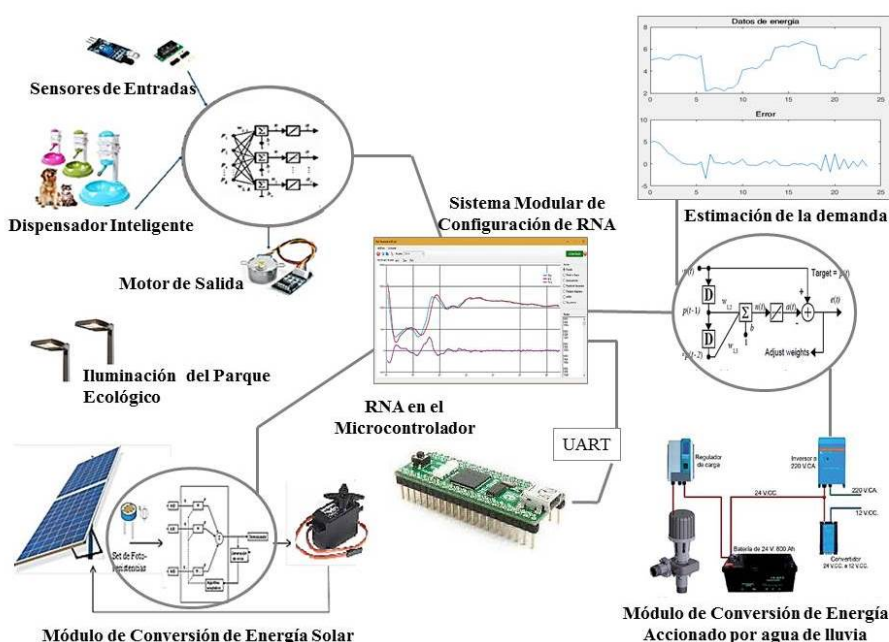


Figura 2: Esquema conceptual del sistema modular del parque ecológico.

siguiente manera: 2 bits corresponden a la salida de un sensor de peso digital, 2 bits dados por un sensor óptico para la altura del animal, 9 bits para clasificar tipo de animal (a partir de un pre-procesamiento de imagen capturada por una cámara digital), el accionamiento de salida estará dado por un motor de paso para la dosificación de alimento. Al encontrarse un animal en el dosificador de alimentos, la red neural estará en la capacidad de entregar la cantidad de alimento necesario según su clasificación (perros y gatos), peso (S, M, L, XL) y altura (P, M, G, EG), esto lo hará con un motor paso a paso que será programado para dar N vueltas según la salida de la RNA.

El siguiente módulo diseñado corresponde al predictor de la demanda para control para la configuración de los convertidores, donde se tiene la posibilidad de alimentar el parque ecológico, por una turbina accionada por un sistema de tanques que gestionan el agua de lluvia capturada y se emplea en los casos que la red tenga requerimientos adicionales. Este subsistema se encarga de monitorear la carga de las baterías, a través del voltaje en sus terminales. La condición para un voltaje superior a 26,6 VDC implica un cierre en la válvula que permite el flujo de agua

por la mini-Turbina, la cual aprovecha el flujo y la presión del agua para generar electricidad (24 VDC). El sistema predictor del consumo del parque es utilizado para determinar el consumo general del parque, durante las 24 horas del día, mediante un predictor adaptativo con una memoria o TDL de 5 retrasos. El sistema determina mediante datos de consumo promedio de potencia, la conexión eléctrica más favorable para mantener una reserva de energía importante almacenada.

Para el módulo de control de posición de la celda fotovoltaica, se seleccionó una red multicapa, mediante una red hacia adelante (*FeedForward*). Se diseñó el control de posición para un panel fotovoltaico, el cual permitirá el seguimiento de la trayectoria del sol, se realizará la lectura de las tensiones respectivas usando LDRs (*Light Dependent Resistor*) y se definió un conjunto de patrones, basados en una prueba experimental. Se toman valores de entrada a la red referentes a tensiones de intensidad de radiación y la variable salida como la magnitud y sentido de giro dando una posición al servomotor, se ejecuta el cálculo de la inclinación más apropiada, el sistema fotovoltaico detecta el cambio de intensidad solar recibida y ajusta la posición en tiempo real. Por

otra parte, se tiene la red lineal adaptativa, como predictor, de acuerdo a la salida del sistema en el tiempo, destacando que su implementación en circuito, aporta eficiencia al sistema híbrido de conversión de energía.

El modelo neuronal para el predictor viene dado por la Ecuación (1).

$$a(k) = \sum_{i=1}^R \omega_i p(k-i) + b(k) \quad (1)$$

Donde $a(k)$ corresponde a la salida de la red neuronal, ω_i la matriz de pesos sinápticos, $p(k)$ el patrón de entrada para el elemento i del TDL, es decir, la muestra retrasada y $b(k)$ la polarización de la red. Para este caso, se realizó el desarrollo de la neurona, tomando $R = 14$ registros del TDL, siendo este modelo matemático el que se utilizó para la programación del comportamiento de la red en el micro-controlador (ver ecuación (2)).

$$\begin{aligned} a(n) = & \omega_1 p(1) + \omega_2 p(2) + \omega_3 p(3) \\ & + \dots + \omega_{11} p(11) + \omega_{12} p(12) \\ & + \omega_{13} p(13) + \omega_{14} p(14) + b \end{aligned} \quad (2)$$

Se utilizó el algoritmo de aprendizaje regla delta LMS para actualización de pesos sinápticos, dado por la expresión de la ecuación (3).

$$\omega(n) = \omega(n-1) + (T(n) - a(n))p(n)^T \quad (3)$$

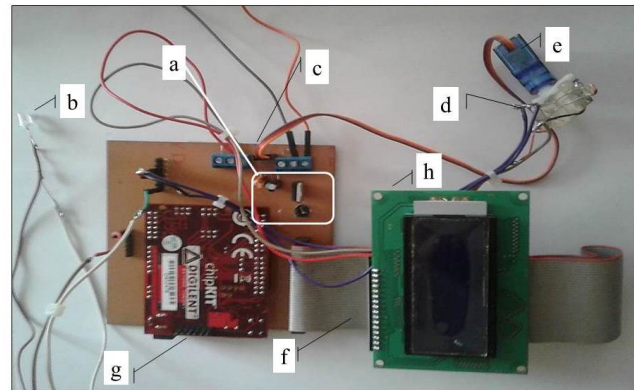
Donde $\omega(n)$ será el valor del peso nuevo, a partir del peso anterior $\omega(n-1)$, corregido en función de un coeficiente de aprendizaje por el error dado por la diferencia entre el target $T(n)$ y la salida de la red $a(n)$, en proporción de la entrada $p(n)$.

3. Diseño modular de las redes neuronales sobre micro-controlador

Inicialmente, se realizó el diseño de las redes según los requerimientos de cada función del parque ecológico (partiendo de las señales definidas en la descripción previa). Para cada módulo diseñado se consideró el tipo de red, partiendo de la configuración más sencilla, a fin de optimizar los recursos en el hardware de implementación.

Métodos y materiales

La implementación del hardware se llevó a cabo mediante un microcontrolador PIC de 32 bits a 40 MHz (20 MIPS). Los componentes: celda solar de calculadora, servo motor, regulador 7805, Capacitor electrolítico 0,1 μ F, capacitor 0,3 μ F, resistencia 20 Ω , led indicador, pantalla LCD, etc. Se diseñó un prototipo de prueba para el control de posición de una celda fotovoltaica, tal como se presenta en la Figura 3.



Componentes Circuitales: (a) Circuito Regulador: Regulador 7805, Capacitor electrolítico 0,1 μ F, Capacitor electrolítico 0,33 μ F, Resistencia de precisión 20k Ω ±2%. (b) Led Indicador. (c) Placa Baquelita 10x10. (d) Arreglo de Conversión Solar: Celda Solar 2,8 x 1,5, Sensores LDR. (e) Servomotor. (f) Cable Plano. (g) Microcontrolador. (h) Pantalla LCD

Figura 3: Circuito de implementación de la red neuronal.

En la Tabla 1, se presentan los datos recolectados, realizando un experimento con el prototipo diseñado, se realizaron mediciones para el análisis del predictor obteniendo la conversión, a partir de la intensidad de luz solar.

Se observa el comportamiento de la irradiación solar tomada durante el día. La red del predictor dará como salida el valor de tensión de la próxima media hora en adelante, así tomando acción de conectarse directamente a la máquina expendedora de alimento o mantenerse conectada al banco de baterías. La data resaltada denota la conexión directa a la máquina expendedora de alimentos, en las otras horas se establece la conexión del sistema fotovoltaico al banco de baterías. La conexión y desconexión se indica mediante el *led* indicador del prototipo diseñado.

Una vez diseñado la plataforma de diseño para la red neuronal, se procedió a definir la

Tabla 1: Datos experimentales tomados con el prototipo.

Horas	Voltaje (mV)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
07:30 am,	1604	0,160	0,256
08:00 am,	1664	0,166	0,276
08:30 am,	1695	0,169	0,286
09:30 am,	1685	0,168	0,283
10:00 am,	1776	0,177	0,314
11:00 am,	1932	0,193	0,373
11:30 am,	1928	0,193	0,372
12:00 m,	1910	0,191	0,364
1:00 pm,	1898	0,189	0,358
1:30 pm,	1892	0,189	0,357
2:30 pm,	1889	0,188	0,355
3:00 pm,	1888	0,188	0,354
3:30 pm,	1861	0,186	0,346
4:00 pm,	1753	0,175	0,306
6:00 pm,	1651	0,165	0,272

data de entrenamiento (a partir de los datos experimentales), siendo éste un aspecto importante para analizar la respuesta de la red y su capacidad de generalización. Así, se realizó el entrenamiento, que permitió obtener una aproximación de los parámetros de la red, logrando resultados en los que el error converge a cero, es decir, que la salida de la red coincide con el target para la data de validación, se realizó la simulación y se establecieron así las condiciones iniciales para la implementación en hardware, con lo que se programaron las neuronas componentes en el micro-controlador, para las pruebas de funcionamiento. El método empleado para el diseño modular consistió en la descripción generalizada de los tipos de redes (en lenguaje C para su implementación sobre microcontroladores), considerando su arquitectura, características de las capas, función de salida de las neuronas en cada capa y modo de entrenamiento.

4. Aplicaciones neuronales desarrolladas

Se obtiene como resultado la matriz de parámetros de cada una de las redes diseñadas, las cuales han sido insumo para el proceso de programación en el micro-controlador, destacando que este procedimiento puede ser realizado en circuito, solo que por simplificación de la etapa de diseño, se consideró la opción de un pre-

entrenamiento, el cual resulta especialmente útil en las redes multicapa, los parámetros obtenidos como resultados de las simulaciones son presentados a continuación.

4.1. Parámetros del entrenamiento del dispensador de alimentos

Se diseñó una red neuronal lineal, para la clasificación de las especies de fauna del parque que serán abastecidas con la aplicación, seleccionando el esquema de la Figura 4, para múltiples entradas y un número de salidas a seleccionar.

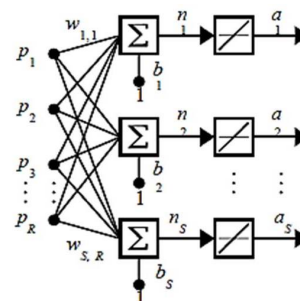


Figura 4: Esquema de la Red Neuronal Lineal.

Un método alternativo corresponde a una red convolucional previa a la red lineal, incorporando el concepto de aprendizaje profundo para clasificación, sin embargo el método de diseño que se ha empleado en esta oportunidad, simplifica la etapa de procesamiento en hardware, aplicando una composición de sensores de entrada, que constituyen el mapa de caracteres (características de identificación).

Para este diseño se consideró una selección de señales de entrada, concatenadas en un vector $p(x)$, compuesto por las salidas de los sensores de identificación. En primer lugar pixeles de identificación, sensor de peso, un conjunto de sensores de presencia dispuestos a diferentes alturas, para la identificación de la talla y aspectos de reconocimiento de las mascotas.

En la Figura 5 se presentan los resultados del diseño y parámetros de entrenamiento de la red neuronal lineal (13 entradas 1 salida para accionamiento de los mecanismos del dispensador). Es importante señalar que se seleccionó una salida correspondiente a un comando numérico, para

establecer el accionamiento correspondiente, éste comprende el control de la electro-válvula de suministro de agua y el motor de paso de suministro de alimento, como funciones básicas.

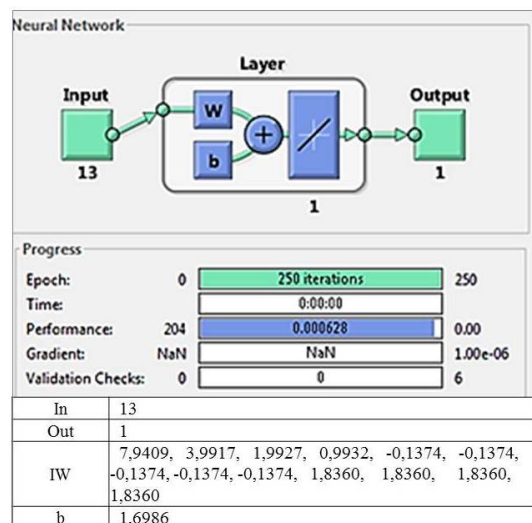


Figura 5: Parámetros de entrenamiento de la RNA Lineal.

4.2. Aplicaciones de la red dinámica

Se diseñaron diversas aplicaciones de redes lineales dinámicas, partiendo del esquema general de la Figura 6.

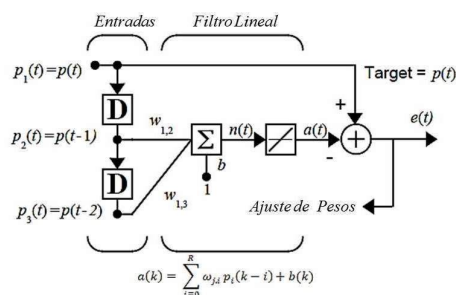


Figura 6: Esquema general de la red lineal dinámica.

Los resultados de los parámetros de entrenamiento obtenidos se presentan en la Tabla 2.

4.3. Parámetros del entrenamiento del control fotovoltaico

Se diseñó una red multicapa, con entradas de los sensores LDR (IL, DL), y una salida que corresponde al accionamiento del servomotor,

Tabla 2: Resultados de entrenamiento red dinámica.

Cargador de baterías con mini-Turbinas	
In	12 (entradas retrasadas)
Out	1
IW	0,9628, -0,0013, -0,0006, -0,0075, 0,0067, -0,0003, -0,0003, -0,0077, 0,0068, -0,0003, -0,0004, -0,0046
b	0.8213
Sistema Inteligente de Gestión de Carga	
In	14 (entradas retrasadas)
Out	1
IW	0,0374, 0,0179, -0,0076, 0,0569, 0,0933, -0,0118, -0,0134, -0,0082, -0,0136, -0,0094, 0,0028, -0,0136, -0,0640, -0,0561
b	16,040
Cargador de baterías con mini-Turbinas	
In	5 (entradas retrasadas)
Out	1
IW	Adaptativo en tiempo real
b	Adaptativo en tiempo real

para posicionamiento del arreglo solar en máxima potencia, según el esquema de la Figura 7.

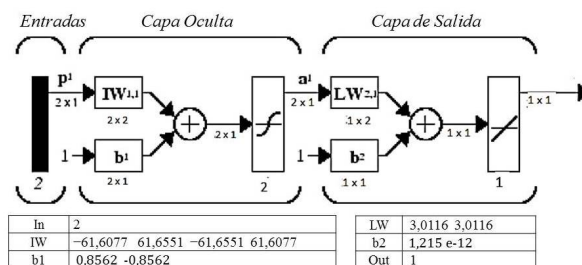


Figura 7: Esquema de la Red Neuronal Multicapa MPL.

Sustituyendo las entradas de los sensores y operando con la matriz de pesos de la capa oculta y la matriz de pesos de la capa de salida respectivamente, se obtiene:

$$a_3(k) = L\omega_{1,1}(\tanh(I\omega_{1,1}D_L(k) + I\omega_{1,2}I_L(k) + b_1(k))) + L\omega_{1,2}(\tanh(I\omega_{2,1}D_L(k) + I\omega_{2,2}I_L(k) + b_2(k))) + b_3(k)$$

Las pruebas de implementación en hardware de las redes neuronales estudiadas, permitió el procesamiento en tiempo real de los patrones adquiridos a través de la conversión analógica-digital, con una conversión de 10 bits por valor analógico en el rango de 0-3,3 V con una precisión

de 3,3 V/1024 bit = 3 mV/bit. Así mismo, se configuró la topología de la red neuronal, para el predictor se programó con función de activación lineal, asignándole 15 entradas, con una línea de retardo TDL de 14 registros, comunicando por hiper-terminal los valores de conversión en tiempo real de la entrada $p(n)$, la salida posterior a la función de activación lineal $a(n)$ y el error $e(n)$, procesados en el micro-controlador. Se tomó en consideración para la red del predictor adaptativo, una actualización de pesos continua ejecutándose sin un límite de épocas de entrenamiento. De esta manera, se desarrolló la configuración de la red en el microcontrolador.

Por otra parte, para la implementación de la red multicapa FeedForward, se tiene la estructura de la red programada usando lenguaje C, con dos neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida, destacando que el algoritmo de entrenamiento de retro-propagación, el cual se aplicó para definir la matriz de pesos sinápticos de la red neuronal, como se muestra en la Figura 8. Se puede observar en las dos neuronas de la

```
// Capa Oculta
// Neurona 1:  $a1(k) = \tanh(\omega1.1.p1(k) + \omega1.2.p2(k) + b11(k))$ 
n1f[0][0] += Seg_IW11[0][0]*V_LDR_Izf
+ Seg_IW11[0][1]*V_LDR_Derf + Seg_B1[0][0];
n1f[0][0] = tanh(n1f[0][0]);
// Neurona 2  $a2(k) = \tanh(\omega12.1.p1(k) + \omega12.2.p2(k) + b12(k))$ 
n2f[0][0] += Seg_IW11[1][0]*V_LDR_Izf
+ Seg_IW11[1][1]*V_LDR_Derf + Seg_B1[1][0];
n2f[0][0] = tanh(n2f[0][0]);
// Capa de Salida
// Neurona de salida  $a3(k) = \omega21.1(a1(k)) + \omega21.2(a2(k)) + b2(k)$ 
n3f[0][0] += Seg_LW21[0][0]*n1f[0][0]
+ Seg_LW21[0][1]*n2f[0][0] + Seg_B2[0][0];
```

Figura 8: Programación de la red MPL en el PIC.

capa oculta la interacción de las entradas (señales del sensor LDR), para los pesos definidos en el esquema matricial MPL. Cada una de las salidas obtenidas en las neuronas de la capa oculta n1f y n2f (función de salida tangh), pasan a ser las entradas de la neurona n3f (con función de salida lineal) de la cada de salida de la red neuronal.

Seguidamente, se programó un manejador para la comunicación de la red con una pc, la cual permite definir acciones, tomar las lecturas de la red, su respuesta y graficar el comportamiento de

la salida en relación a los patrones de entrada. La interface es presentada en la Figura 9.

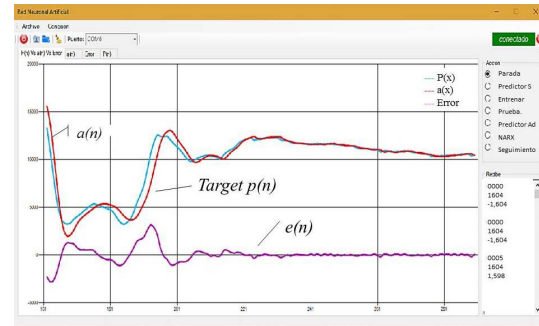


Figura 9: Manejador de entrenamiento y prueba de la red neuronal en el micro-controlador.

En la interface se presentan las funciones asociadas al radio-button, se describen las funciones diseñadas, que están soportadas por la herramienta para la configuración de las redes neuronales de la aplicación, sobre el hardware del micro-controlador. Estas funciones están definidas de la forma, el procesador ejecuta programa del Predictor Simple <A>, actualización de parámetros (pesos) durante el Entrenamiento <E>, Prueba de Secuencia <S>, Predictor Adaptativo <F>, Seguimiento de la red Red FeedForward-FF , Entrenamiento de la red MPL, algoritmo retro-propagación conocido como BackPropagation <W>, Red Neuronal NARX <N>, Parada <Z> Detiene todo tipo de acción.

A través de la interface se realizó el procedimiento de diseño de las redes a estudiar, en primer lugar se tiene la función <Entrenamiento>, en la cual se realiza el cálculo de los parámetros de la red desde el microcontrolador, esto a partir de las entradas recolectadas desde el convertidor A/D, y los targets suministrados al sistema, destacando que en el caso del predictor las entradas están dadas por muestras retrasadas $p(n-i)$, y el target viene dado por $p(n)$. De esta manera, se realizó el entrenamiento de las redes neuronales implementadas en hardware, según la secuencia indicada: en la Figura 10.

Seguidamente, se diseñó un experimento de actualización de pesos sobre el hardware, donde se modificó la componente [0][10] con un valor arbitrario de 0,1, esto para poder realizar la validación de corrección de pesos cuando el

```

// RNA Lineal
// Se define el coeficiente de aprendizaje de la red: Apl=0.002;
// Se Actualizan los pesos sinápticos:
//  $W(n) = W(n-1) + coef \cdot [t(n)-a(n)] \cdot p(n)$ 
wf[0][0] = wf[0][0] + (Apl)*(P_Inf-(af[0][0]))*TDL[0][0];
...
wf[0][13] = wf[0][13] + (Apl)*(P_Inf-(af[0][0]))*TDL[0][13];

// Red MPL con algoritmo de entrenamiento BackPropagation,
// con función sign.
// Matriz de pesos de inicialización:
// Se evalúa la salida en la red hacia adelante
net = n1*Seg_LW21[0][0] + n2*Seg_LW21[0][1] + Seg_B2[0][0];
// Se calcula el error asociado a cada neurona
Error = (Targetfeed[0][k]-(net)); // Cálculo del error de la red lineal
// actualización de Parámetros de la capa de salida:
Seg_LW21[0][0] += 0.01*Error*n1;
Seg_LW21[0][1] += 0.01*Error*n2;
Seg_B2[0][0] += 0.01*Error;
// actualización de Parámetros de la capa oculta:
// Relación de Diferencial del error según la función de la neurona
// Sigmoide:  $a1(k) \cdot (1 - a1(k))$ ,
// Tangente Hiperbólica:  $(1 - a1(k)^2)$ 
Error_1 = (1-pow(zol,2))*Error*Seg_LW21[0][0];
Error_2 = (1-pow(zol,2))*Error*Seg_LW21[0][1];
Seg_IW11[0][0] += 0.01*Error_1*P_LDR_1[0][k];
Seg_IW11[0][1] += 0.01*Error_1*P_LDR_2[0][k];
Seg_B1[0][0] += 0.01*Error_1;
Seg_IW11[1][0] += 0.01*Error_2*P_LDR_1[0][k];
Seg_IW11[1][1] += 0.01*Error_2*P_LDR_2[0][k];
Seg_B1[1][0] += 0.01*Error_2;

```

Figura 10: Código de entrenamiento de las redes neuronales diseñadas.

μC ejecuta la rutina de entrenamiento, con lo cual se obtuvo que la red converge de modo estable, luego de 800 épocas de entrenamiento incremental se obtuvo nuevamente el valor original de $\omega[0][10]=0,0028$. De esta manera, se comprobó el correcto funcionamiento de las redes neuronales programadas, de forma independiente, funcionando al mismo tiempo. Se analizaron los resultados correspondientes al porcentaje de utilización de los recursos en hardware, el uso de la RAM estática en 1,08 KB y la memoria RAM dinámica en 15,34 KB, la memoria de programa utilizada es 33,40 KB, la cual corresponde el 25 % de la memoria total del dispositivo.

Al seleccionar la opción de *Prueba de secuencia* en la gráfica superior, podemos discernir el efecto que causó la variación introducida a propósito en una componente de la matriz de pesos. En la Figura 11, se presenta el resultado de la salida al modificar intencionalmente uno de los pesos sinápticos, a fin de observar su efecto. La gráfica de color rojo representa la salida de la neurona $a(n)$, la gráfica de color azul representa los datos de entrada $p(n)$; los cuales serían datos a predecir, y la gráfica color violeta representa el error entre

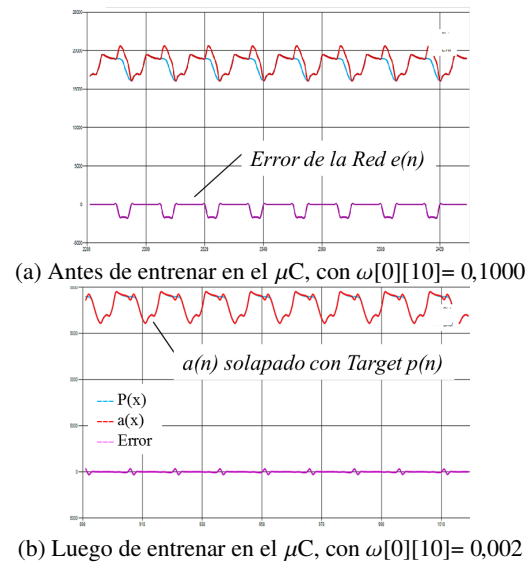


Figura 11: Entrenamiento de parámetros de la red neuronal predictiva.

el Target (valor esperado) y el valor de salida de la neurona.

Se selecciona la opción entrenamiento en la gráfica superior, comienza el proceso de corrección y adaptación mediante la actualización de pesos de una manera incremental, cada vez que ingresa un patrón de 14 datos se realiza el cálculo de pesos de cada componente de la matriz de pesos y se sustituye por el nuevo valor, al cabo de 67 épocas, se observa en la gráfica superior como la salida $a(n)$ se va adaptando a los patrones de entrada $p(n)$. Al ejecutarse 800 épocas se obtiene una corrección total de la componente errónea en la matriz de pesos, luego de entrenar se logra un error que converge a cero, observándose que se solapan la salida de la red y el target. Este tipo de pruebas pueden ser implementadas por el usuario con una infinidad de variaciones tanto en el vector de entrada, matriz de pesos sinápticos y polarización, esto con la finalidad de afianzar la teoría de redes neuronales de manera práctica. La siguiente prueba consistió en realizar el entrenamiento de la red predictiva para el caso de diferentes coeficientes de aprendizaje y observar el efecto de estabilidad de convergencia de la red neuronal, en la Figura 12, se presentan los resultados del entrenamiento.

Se puede observar (Figura 12) que al seleccionar un coeficiente de aprendizaje mayor al límite

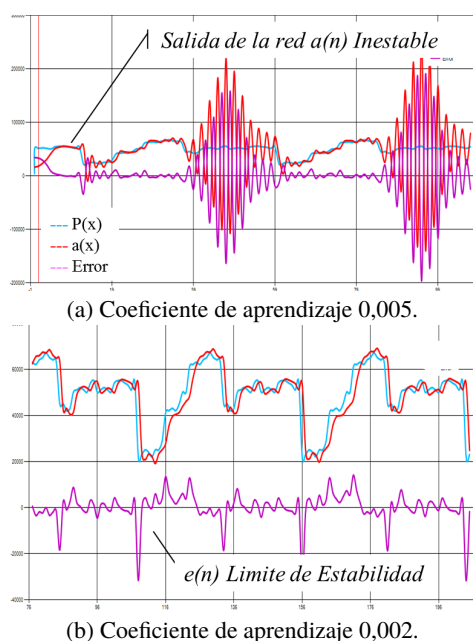


Figura 12: Respuesta de la red adaptativa como predictor.

de estabilidad (a) la respuesta del sistema se vuelve inestable, en tanto que el error oscila sin lograr converger a cero, se seleccionaron diversos coeficientes de aprendizaje obteniendo que el límite de estabilidad se obtiene con 0,002 (b), donde el error converge a cero, por tratarse de un predictor adaptativo al presentarse cambios en la señal de entrada $p(n)$, el sistema debe reentrenar sobre el circuito obteniendo los nuevos valores de los parámetros, lo que explica las oscilaciones en los puntos de cambio.

5. Conclusiones

Esta investigación aporta una solución en software/hardware, para la configuración y prueba del sistema de control neuronal para aplicaciones de un parque ecológico, de manera modular, que integra diversos elementos de conversión de energía renovable y un sistema inteligente para optimizar su configuración, con análisis de eficiencia energética, a partir de predicción de la demanda eléctrica y el seguimiento óptimo de la celda solar implementada en el prototipo de prueba. Destacando que la propuesta es respetuosa con el medio ambiente, considerando aplicaciones como el módulo inteligente del dispensador de alimento

para mascotas, considerado como la carga principal del sistema, por su importancia. En el diseño se analizó el impacto ambiental, siendo los recursos naturales tratados de manera responsable, como el caso del agua de lluvia para accionar la turbina de conversión de energía, y se utilizó componentes programables para que el proyecto no presente obsolescencia y pueda actualizarse en el tiempo, reduciendo así los residuos electrónicos, propios de los procesos de actualización tecnológica.

Adicionalmente, se implementaron los módulos para el parque ecológico: predictor simple para las celdas fotovoltaicas, sistema de seguimiento de la irradiación máxima en un panel fotovoltaico, el predictor adaptativo conecta o desconecta los bancos de baterías dependiendo del consumo del parque, con esto se cuida la vida útil de las baterías, el módulo de seguimiento solar, en base a la irradiación, mueve el panel fotovoltaico hacia el lado de mayor incidencia, con lo cual se hace más eficiente el sistema de generación, gracias al control neuronal que permite aprender del modelo, desde su implementación en hardware y obtener resultados más eficientes.

A partir del análisis de recursos y eficiencia en épocas de entrenamiento se tiene la posibilidad de escalar el diseño hasta el límite de memoria del dispositivo, lo que hace factible la expansión de los módulos del sistema, siempre tomando en cuenta que se simuló en un procesador secuencial, incidiendo en la velocidad de procesamiento y considerando que la simplificación del diseño incide en la disminución del consumo de energía del modelo de control, quedando planteado para trabajos futuros su implementación sobre procesadores paralelos, a través de tecnología FPGA. Finalmente, el manejador de la red neuronal constituye una herramienta versátil para el modelado, entrenamiento y pruebas de funcionamiento, que permite afianzar conocimientos teóricos de manera didáctica [18], lo cual es un valioso aporte para el eco-parque, que tendrá la capacidad de ofrecer soporte en actividades de formación, investigación y desarrollo. El diseño modular, permite la incorporación de nuevas aplicaciones con implementación de redes neuronales, integrando elementos al sistema sin

alterar los objetivos alcanzados, siendo flexible para proponer alternativas que se adapten a las potencialidades del parque ecológico.

6. Referencias

- [1] Cecilia Sandoval Ruiz. Diseño conceptual de un módulo híbrido para generación eléctrica. In *VIII Congreso Nacional y 2do Congreso Internacional de Investigación Universidad de Carabobo*, Venezuela, 2013.
- [2] Cecilia Sandoval Rúiz. Plataforma de gestión, investigación y formación en tecnologías sostenibles para soporte de un laboratorio remoto. *Eduweb*, 10(1):79–92, 2016.
- [3] I. González García. Control neuronal de un generador de inducción para generación eólica. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, 2005.
- [4] D. Gandolfo, M. Molina, and H. Patiño. Estimación de la energía generada por sistemas fotovoltaicos mediante redes neuronales artificiales. In *Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011*, 2011.
- [5] Santiago Fernández Posada. Diseño e implementación de una red neuronal para el seguimiento del punto máximo de poder de un panel solar. Trabajo Especial de Grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2015.
- [6] CECILIA Sandoval-Ruiz. Sistema eco-adaptativo integrado en elementos arquitectónicos con tecnología sostenible. *Revista Electrónica Científica Perspectiva*, 8(4):96–109, 2015.
- [7] María José Santofimia Romero, Xavier del Toro García, and Juan Carlos López López. Técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la red eléctrica inteligente (smart grid). *Novática: Revista de la Asociación de Técnicos de Informática*, (213):29–34, 2011.
- [8] IRENA. Análisis del mercado de energías renovables américa latina. Reporte técnico, IRENA, 2016.
- [9] C Sandoval-Ruiz. Adaptive control in VHDL applied to a solar oven. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(23):142–147, 2014.
- [10] Luis Gonzaga Baca Ruiz, Manuel Pegalajar Cuéllar, Miguel Delgado Calvo-Flores, and María Del Carmen Pegalajar Jiménez. An application of non-linear autoregressive neural networks to predict energy consumption in public buildings. *Energies*, 9(9):1–21, 2016.
- [11] Marco Antonio Reyes Clavijo and Álvaro Xavier Sánchez Santander. Análisis de factibilidad del proyecto de responsabilidad social “ECO CAN” en la ciudad de cuenca. Trabajo Especial de Grado, Universidad del Azuay, Ecuador, 2017.
- [12] Cecilia Sandoval-Ruiz. Modelo neuro-adaptativo en VHDL, basado en circuitos NLFSR, para control de un sistema inteligente de tecnología sostenible. *Universidad, Ciencia Y Tecnología*, 21(85):140–149, 2017.
- [13] Cecilia Sandoval Ruiz. FPGA prototyping of neuro-adaptive decoder. In *Proceedings of the 9th WSEAS international conference on computational intelligence, man-machine systems and cybernetics*, pages 99–104. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2010.
- [14] Cecilia E. Sandoval-Ruiz. VHDL Model of configurable neural networks applied to decoding in cognitive radio. *Revista Ingeniería UC*, 24(3):290–301, 2017.
- [15] Thomas Strasser, Filip Andrén, Felix Lehfuss, Matthias Stifter, and Peter Palensky. Online reconfigurable control software for ieds. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(3):1455–1465, 2013.
- [16] Granados-Rojas Benito, A Jiménez-Saucedo Mario, A Vallejo-Alarcón Manuel, E González-Navarro Yessenia, Villarreal-Cervantes Miguel, and Corona-Ramírez Leonel. Implementación de una red neuronal multicapa en un microcontrolador pic para la identificación de color. In *10^{mo} Congreso Nacional de Mecatrónica*, pages 84–89, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Noviembre 2011. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
- [17] Stuart Russell and Peter Norvig. *Inteligencia artificial: un enfoque moderno*. Prentice Hall Hispanoamericana, 2^{da} edition, 1996.
- [18] Cecilia Sandoval Ruiz. Estrategias de aprendizaje colaborativo, a través de las TIC y grupo de investigación. *Revista de Tecnología de Información y Comunicación en Educación*, 11(2):99–112, 2017.

Evaluation of the procedures of heavy metal removal in COD residues

M. Torres^a, Darwin López^{*,a} y R. Windevoxhel^b

^aLaboratorio de Calidad Ambiental (LCA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bLITSA, Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- A comparison was made between the efficiencies of a conventional process for the removal of metals and another that involves the use of hen's eggshell as an absorbing medium. The first consisted of a precipitation-reduction process, donde el Cr(IV), where the Cr (IV) was brought to Cr (III) by its contact with a sugar solution; sodium chloride (NaCl) was then added to precipitate the silver as AgCl. Finally the rest of the metals were separated through their reaction with sodium hydroxide (NaOH). The second treatment was studied by random block design using beakers containing liquid in contact with treated shell in a ratio of 2.40 g / 100 mL at room temperature (26-29 ° C). Residual contents were monitored for 6 hours, for which destructive tests were performed every 2 hours in duplicate. The samples studied were analyzed, before and after each treatment, using the atomic absorption spectrophotometry technique in order to obtain the concentrations of silver and chromium present. After the conventional treatment, the residue was neutralized using sodium bicarbonate (NaHCO₃).

Keywords: chemical oxygen demand (COD); precipitation-reduction; chicken egg shell; parameter normative-legal.

Evaluación de los procedimientos de remoción de metales pesados en los residuos de la DQO

Resumen.- Se realizó la comparación entre las eficiencias de un proceso convencional para la remoción de metales y otro que involucra el uso de la cáscara de huevo de gallina como medio absorbente. El primero consistió en un proceso de precipitación reducción, donde el Cr (IV) se llevó a Cr (III) mediante su contacto con una solución de azúcar; posteriormente se añadió cloruro de sodio (NaCl) para precipitar la plata en su forma de AgCl; finalmente el resto de los metales se separaron a través de su reacción con el hidróxido de sodio (NaOH). El segundo tratamiento, se estudió mediante un diseño de bloques al azar empleando beakers contentivos de líquido en contacto con cáscara tratada en una proporción de 2,40 g/ 100 mL a temperatura ambiente (26 - 29 °C). Se hizo seguimiento al contenido residual durante 06 horas, para lo cual se realizaron ensayos destructivos cada 02 horas por duplicado. Las muestras estudiadas fueron analizadas, antes y después de cada tratamiento, mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica a fin de obtener las concentraciones de plata y cromo presentes. Posteriormente al tratamiento convencional, el residuo fue neutralizado usando de bicarbonato de sodio (NaHCO₃).

Palabras claves: demanda química de oxígeno (DQO); precipitación-reducción; cáscara de huevo de gallina; eficiencia de remoción.

Recibido: septiembre 2017

Aceptado: febrero 2018

1. Introducción

Las aguas residuales cuando son descargadas directamente a un cuerpo de agua ocasionan efectos negativos en la vida acuática, ocasionando la muerte de los peces debido a la disminución del oxígeno disuelto y pueden disminuir su valor de

uso como agua para fines agrícolas e industriales; llegando a ser agua no apta para el consumo; por otra parte, si su uso es indispensable, los costos de tratamiento se tornan muy altos. Los residuos de laboratorios presentan como características gran diversidad, alta peligrosidad y escaso volumen, lo que hace que su gestión presente una problemática distinta a la de los residuos de origen industrial, caracterizados por su gran volumen y su poca diversidad, por eso, a este tipo de residuos se los designa como Residuos Tóxicos en Pequeña Cantidad (RTPC) [1].

* Autor para correspondencia:

Correo-e:delopez22@gmail.com (Darwin López)

Dentro de este marco, uno de los residuos más peligrosos que generan los laboratorios de análisis químicos es el proveniente de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Esta determinación analítica, ampliamente utilizada para determinar el contenido de materia orgánica en aguas y aguas residuales, pese a ser un ensayo útil, genera un residuo líquido considerado como peligroso ya que requiere el uso de reactivos tales como dicromato de potasio, ácido sulfúrico, sulfato de plata y sulfato mercúrico con lo cual se produce un líquido residual altamente tóxico, tanto por su elevado contenido en metales pesados: cromo, mercurio y plata, como por su bajo pH. Aunque la descarga del líquido residual sin tratar a la red colectora cloacal es práctica usual en algunos laboratorios, implica un alto riesgo de contaminación del ambiente de trabajo y del medio ambiente en general [2].

La reducción de volumen y toxicidad es el principal objetivo del tratamiento de residuos líquidos peligrosos, los procesos fisicoquímicos, biológicos y térmicos son los mecanismos más usados para tal fin. Dentro de los procesos fisicoquímicos la reducción-precipitación es una alternativa de tratamiento basada en la formación de sales de baja solubilidad, es decir, Kps muy pequeños [3]. Otra alternativa aprovechable por ser un recurso fácilmente disponible es la cáscara de huevo de gallina, la cual pudiese aportar una posible solución de los problemas ambientales, por medio de un procedimiento sencillo de adsorción ya que la misma está constituida principalmente por carbonato de calcio, el cual es un buen agente adsorbente [4].

El objetivo de esta evaluación es presentar una metodología efectiva y ambientalmente segura para el tratamiento de los residuos de DQO generados en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la Facultad de Ingeniería. Ambas metodologías utilizadas proponen una secuencia de reacciones químicas donde la concentración de los iones de Cr, Ag y Hg son disminuidas [5], logrando así que dichas características tóxicas del residuo de DQO cumplan con lo establecido en las normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia [6]

2. Metodología

2.1. Identificación de los residuos generados por la aplicación de la DQO

Para determinar la forma en que el residuo es almacenado en el Laboratorio de Calidad Ambiental, se hizo una inspección visual de los recipientes donde es almacenado, además de observar su color y apariencia (características físicas), y comparar esta disposición con lo estipulado en la norma para el manejo de materiales y desechos peligrosos [7].

La concentración inicial de los metales en el residuo se determinó usando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (AA), utilizando el equipo GBC 932 AA. Para atomizar las muestras, se usó una llama de aire – acetileno. La concentración de cromo (Cr) y plata (Ag), presente en el residuo, se determinó basándose en el siguiente procedimiento:

Se preparó una solución madre patrón para el cromo, diluyendo a 200 mL 0,1768 g de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) para obtener una concentración inicial de 299,98 ppm de Cr; a partir de ésta se diluyeron los patrones de 0,2; 2,00; 6,00; y 10,00 ppm. De manera similar, se procedió para la plata, midiéndose una masa de 0,0395 g de nitrato de plata ($AgNO_3$), resultando una solución madre de 100,39 ppm de Ag y unos patrones de concentraciones iguales a 1,01; 2,01; 3,01 y 4,02 ppm. Por otra parte, se realizaron diluciones de la muestra del residuo, a fin de trabajar en el intervalo de concentración óptimo del equipo: en el caso del cromo se usó una dilución de 1/25 y para la plata una de 1/500.

Posteriormente, se procedió a preparar el equipo para las mediciones: se configuró el tipo de lámpara a utilizar según el metal a cuantificar; luego se seleccionó la longitud de onda (357,9 nm para Cr y 328,1 nm para Ag). Finalmente, se introdujo la identificación de los patrones y las muestras, y las concentraciones indicadas en el párrafo precedente.

Una vez configurado el equipo, se procedió a su arranque, se verificó que el tubo capilar no presentase obstrucciones, en caso contrario, se utiliza solución de ácido nítrico (HNO_3) concentrado. A continuación, se midió la absorbancia para el

agua destilada, cuyo valor debe ser 0,000; de lo contrario se realizan ajustes. Después se midieron las concentraciones de los patrones y muestras, para obtener la concentración real de cada metal, se debe considerar el factor de dilución antes mencionado.

Finalmente, el pH inicial del residuo se midió mediante su dilución al 10 % v/v, usando un pH-metro digital.

2.2. Aplicación los tratamientos físico – químicos convencional y con cáscara de huevo al residuo

2.2.1. Tratamiento convencional

A continuación se describe, los pasos seguidos para la realización del tratamiento convencional:

Reducción de cromo hexavalente a trivalente. Para ello, se añadió 0,1 mL de una solución acuosa de azúcar al 10 % p/v a 50 mL de muestra, a fin de obtener una concentración final de 200 ppm de azúcar, posteriormente la mezcla se colocó en agitación por 1 hora a 300 rpm [3]

Precipitación de la plata. A la solución obtenida anteriormente se agregó 0,10 g de cloruro de sodio (NaCl), homogeneizando la mezcla mediante agitación durante 20 min. El precipitado formado (de color blanco), se separó mediante filtración por gravedad, conservando únicamente el primer lavado [3]

Precipitación del cromo y el mercurio. Al filtrado separado en la actividad anterior, se agregó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 25 % p/v, cuidadosamente, desde una bureta, a fin de evitar que la mezcla entrara en ebullición, la adición de la base se realizó hasta alcanzar un pH de 12. Durante el procedimiento, se mantuvo una agitación constante de 300 rpm, el precipitado formado (color marrón), fue separado mediante filtración por gravedad, obteniéndose un filtrado incoloro.

Neutralización del filtrado. Para ello, se utilizó bicarbonato de sodio (NaHCO_3), grado alimenticio, añadiendo porciones de 2 g a 50 mL de muestra, y adicionalmente se agregó HCl a 1M, en los casos

que no se logró obtener un pH en el rango de 6-9, establecido en la norma [6].

2.2.2. Tratamiento con cáscara de huevo

En la aplicación del tratamiento mediante el uso de cáscara de huevo se realizaron los siguientes procedimientos:

Acondicionamiento de la cáscara - esterilización con ácido acético. Además de la presencia de una fina membrana orgánica y excremento, es común encontrar en la cáscara de huevo de gallina una importante densidad bacteriana, que puede incluir la presencia de bacterias patógenas como *Salmonella* sp. y *Shigella* sp. Para remover este material que causaría un incremento de la carga contaminante en el líquido a tratar, se aplica un tratamiento de agitación en solución de ácido acético 1 M, hasta observar desprendimiento de la membrana. Después del tratamiento ácido, la cáscara es lavada con agua destilada y secada a temperatura ambiente, es molida y se conserva envuelta en papel absorbente dentro de una bolsa sellada (Ziploc) para evitar su contaminación. Posteriormente se verificó la disminución de la carga bacteriana del material.

Determinación de la población bacteriana en las cáscaras tratadas y sin tratar. Se utilizó una muestra de cáscara cruda (sin tratamiento) y una muestra de la cáscara tratada en medio ácido. La flora bacteriana de ambas muestras de cáscara fue activada durante 48 horas a temperatura ambiente (27-32 °C) sin agitación en Erlenmeyers con caldo nutritivo (Riedel de Haën), al cual se le añadió trazas de agente antifúngico para evitar el crecimiento de hongos y se esterilizó [8].

La determinación de la densidad bacteriana (unidades formadoras de colonias, UFC, por unidad de masa de cáscara) se llevó a cabo mediante la técnica de recuento en placas, empleando solución salina peptonada para la preparación de las soluciones decimales seriadas. Se realizaron diluciones seriadas hasta 10^{-8} (con sus duplicados), se mezcló 1 mL de cada una con 15 mL de Agar Plate Count (Difco) y la mezcla se vertió en placas (siembra por inclusión), para dejar incubando

a temperatura ambiente durante 24 horas hasta verificar el crecimiento de colonias [8].

Realización de montajes (contacto cáscara residuo). El ensayo de remoción se construyó bajo un diseño de bloques al azar empleando beakers contentivos de líquido en contacto con cáscara tratada en una proporción de 2,40 g/ 100 mL a temperatura ambiente (26 - 29 °C). Se hizo seguimiento al contenido residual durante 06 horas, para lo cual se realizaron ensayos destructivos cada 02 horas por triplicado, consistentes en filtrar el líquido y conservar los filtrados bajo refrigeración en envases plásticos lavados con ácido nítrico, para su posterior análisis. Las unidades experimentales se montaron por duplicado, obteniéndose un total de 15 bloques, y el mismo número de muestras para el análisis de contenido metálico.

2.3. *Análisis los resultados obtenidos en la aplicación de cada tratamiento*

Una vez que se obtuvieron las concentraciones por medio de la espectrofotometría de absorción atómica (AA); se logró conocer el porcentaje (%) de remoción de metales (cromo y plata) por parte de ambos métodos (Ec. 1), y los resultados reportados se compararon entre sí, para así determinar cuál de ellos es más efectivo.

$$\%_{Remocion} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

$\%_{Remocion}$: porcentaje de remoción del metal.

C_0 : concentración inicial del metal, ppm.

C_t : concentración del metal en el tiempo t , una vez finalizado el tratamiento, ppm.

2.4. *Comparación de las concentraciones de los metales, después de la aplicación de los tratamientos físico-químicos, con la normativa legal*

Una vez obtenido el porcentaje de remoción (% Remoción) por parte de cada método, se tomó el método con mayor porcentaje de remoción; el mismo se comparó con los parámetros establecidos en Las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago

de Valencia [6], a fin de verificar si cumple con los rangos y límites máximos de concentración.

3. **Análisis y discusión de los resultados**

3.1. *Identificación de los residuos generados por la aplicación del DQO*

Una vez realizada la observación en el sitio de la forma en que se dispone el material, se determinaron sus características físico – químicas, las cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1: Caracterización del residuo.

Parámetro	Valor
pH (al 10 %)	1,70
Color	Verde-azulado
Apariencia	Sin sólidos suspendidos (Turbidez)
Cromo (mg/L)	136,09
Plata (mg/L)	1789,45

Es importante mencionar que la coloración verde – azulada (Tabla 1) que presenta el residuo generado por el análisis de la DQO, se debe principalmente a la alta concentración del ion cromo en su forma trivalente (Cr^{3+}), por otra parte también se puede observar las altas concentraciones del cromo y la plata, que exceden por mucho el parámetro establecido en la norma para el control de vertidos líquidos [6]; del mismo modo presenta un valor de pH = 1,70 para una dilución de 10 %.

3.2. *Aplicación de los tratamientos físico-químicos convencional y con cáscara de huevo al residuo*

3.2.1. *Tratamiento Convencional*

Este tratamiento se basó en reacciones de precipitación, donde cada metal fue removido de manera selectiva, en el caso de la plata se aprovechó la baja solubilidad de la sal cloruro de plata (AgCl):



El sólido obtenido (AgCl), presenta un valor de kps a 25 °C de $1,1 \times 10^{-10}$ [9], el bajo valor del producto de solubilidad explica la disminución

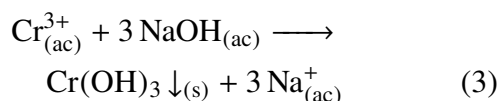
apreciable en la concentración del ion plata mediante este tratamiento (Tabla 2), obteniéndose un valor final de 1,00 ppm Ag. Es importante destacar que, el sólido obtenido, debido a su pureza, es potencialmente recuperable; por lo que, se recomienda evaluar su realización en futuras investigaciones.

Tabla 2: Eficiencia de remoción-tratamiento convencional.

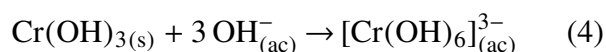
Metal	C ₀ (mg/L)	C _{NaCl} (mg/L)	C _{final} (mg/L)	Remoción (%)
Cr	136,09	---	10,15	92,54
Ag	1789,45	1,00	<0,01	100,00

pH final (adim): 11,3 ± 0,1

En el mismo orden de ideas, se evaluó la remoción del cromo mediante su precipitación con hidróxido de sodio (NaOH), según la siguiente reacción:

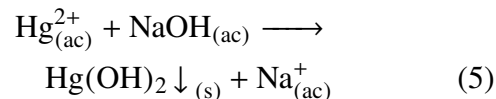


El hidróxido de cromo (III), presenta una constante de producto de solubilidad (kps) a 25 °C de $7,0 \times 10^{-31}$ [10], sin embargo al final de la reacción se obtuvo una cantidad considerable cromo (Tabla 3), para una eficiencia de remoción del 92,54 %, este remanente se puede deber posiblemente a la baja conversión del cromo (VI) a cromo (III), mediante el tratamiento con azúcar, por lo que sería recomendable usar otro tipo de agente reductor para este fin (como el sulfato ferroso, FeSO_4). Otro factor, que pudo haber influenciado el proceso es la naturaleza anfótera del cromo, el cual a valores de pH en el rango de 7 – 8 se comportan como un ácido débil [11], y se convierte en un anión, de acuerdo a la ecuación:

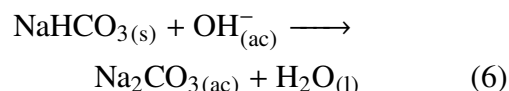


Sin embargo, el método convencional recomienda el uso de valores de pH por encima de 10,5 [5], para facilitar la precipitación de todas las especies metálicas, como es el caso del hidróxido

de mercurio (ecuación (5)), cuyo kps es $3,0 \times 10^{-26}$ a 25 °C [9].



Por lo que, se puede decir que el sólido obtenido es una mezcla de varios hidróxidos, para evitar esta interferencia sería recomendable realizar la precipitación en dos etapas, y así facilitar la separación del cromo. Finalmente, se realizó la adición de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), grado alimenticio, para neutralizar al residuo a valores de pH cercanos a $8,8 \pm 0,1$, para cumplir con lo establecido en el parámetro normativo legal.



3.2.2. Tratamiento con cáscara de huevo

Densidad bacteriana. Luego de realizada la siembra por inclusión, las placas mostraron crecimiento bacteriano macroscópico transcurridas 24 horas de incubación. Se llevó a cabo el conteo de UFC y se consideraron únicamente aquellas con un número de UFC entre 30 y 300 [8, 12] para el cálculo de la densidad bacteriana, obteniéndose los siguientes títulos:

- Cáscara cruda: $7,35 \times 10^5$ UFC/mg de cáscara
- Cáscara tratada: $2,65 \times 10^2$ UFC/mg de cáscara

Una vez realizado el conteo bacteriano, se observó la disminución de la población bacteriana en la cáscara tratada en medio ácido, por lo que, se puede concluir que las membranas adheridas a la cáscara son responsables de la contaminación microbiológica una vez separado el huevo de la cáscara, debido a su alto contenido orgánico y su naturaleza proteica expuesta [13]. Por lo que, es necesario la esterilización de la cascara de huevo ante cualquier proceso químico, para de esta forma obtener resultados sin la interferencia de bacterias en el proceso.

Contacto cáscara-residuo. En esta sección se presenta el tratamiento de adsorción, mediante el uso de un adsorbente localmente disponible, como la cáscara de huevo de gallina para la remoción de los metales pesados cromo y plata (Figuras 1 y 2). Para el caso del cromo (Figura 1), se observó que la concentración disminuyó rápidamente en las primeras dos horas (120 min), pero luego la concentración disminuye muy poco, exhibiéndose un valor atípico a las cuatro (4) horas, que puede ser atribuido a interferencias durante el lavado de la cáscara durante la etapa de filtración.

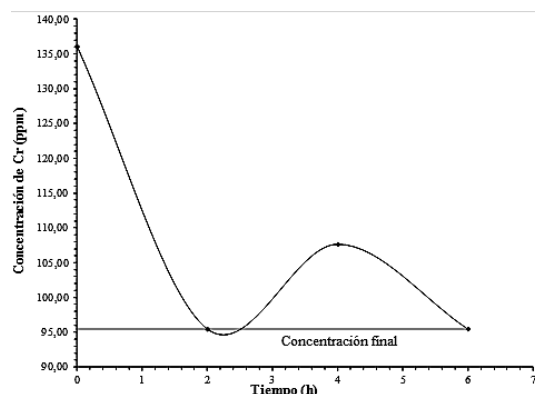


Figura 1: Concentración de cromo en función del tiempo para el tratamiento con cáscara.

En el mismo orden de ideas, para la plata (Figura 2) se notó un comportamiento similar al presentado para el cromo, donde la velocidad de adsorción fue mayor en las dos primeras horas, obteniéndose un comportamiento casi constante después de este tiempo, lo cual puede atribuirse a que el proceso alcanzó el equilibrio después de llegar a las concentraciones de 95,47 y 1252,66 ppm respectivamente para cada metal. Asimismo, se observó el punto atípico alrededor de las 4 horas, lo cual permite corroborar el problema ocurrido durante la fase de filtración.

Finalmente, se tienen los resultados de remoción de los metales mediante este método (Tabla 4), se puede observar que los valores obtenidos son de 29,85 y 30,02 % para el cromo y la plata respectivamente. El bajo valor obtenido, puede atribuirse al bajo valor de pH del residuo ($\text{pH} < 1,70$), condición en la cual los protones (H^+) compiten con los iones metálicos (Cr^{3+} , Cr^{6+} , Ag^+ ,

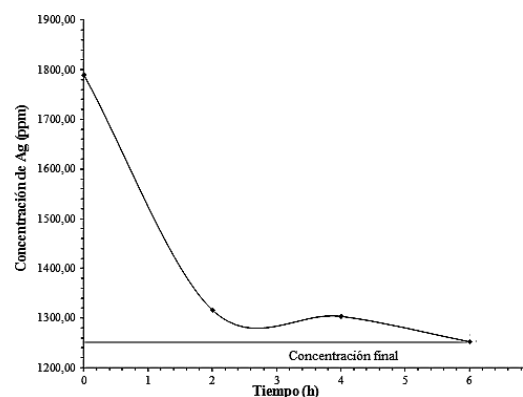


Figura 2: Concentración de plata en función del tiempo para el tratamiento con cáscara.

Hg^{2+}) por los sitios de enlace con el carbonato (presente en la cáscara de huevo de gallina), la concentración de ion hidronio es alta, entonces más de estos grupos carbonato están unidos a ellos; dejando pocas cantidades disponibles para los cationes metálicos. Por otra parte, también se disuelve gran parte del sorbente de cáscara de huevo [14].

En base a lo anterior, sería recomendable considerar dos factores para disminuir la concentración de iones hidronio antes de aplicar el tratamiento con cáscara: el primero consiste en realizar diluciones del residuo hasta obtener un pH donde la cáscara opere efectivamente; el segundo consiste en aplicar el tratamiento convencional hasta alcanzar ese valor de pH más apropiado.

Tabla 3: Eficiencia de remoción de cromo y plata-tratamiento con cáscara.

Metal	$C_0(\text{mg/L})$	$C_{\text{final}}(\text{mg/L})$	Remoción (%)
Cr	136,09	95,47	29,84
Ag	1789,95	1252,66	30,01

3.3. Análisis los resultados obtenidos en la aplicación de cada tratamiento

Considerando los resultados obtenidos mediante ambos tratamientos representados en la Tabla 2 y 3, se puede establecer que el tratamiento más efectivo para la remoción de los metales pesados (cromo

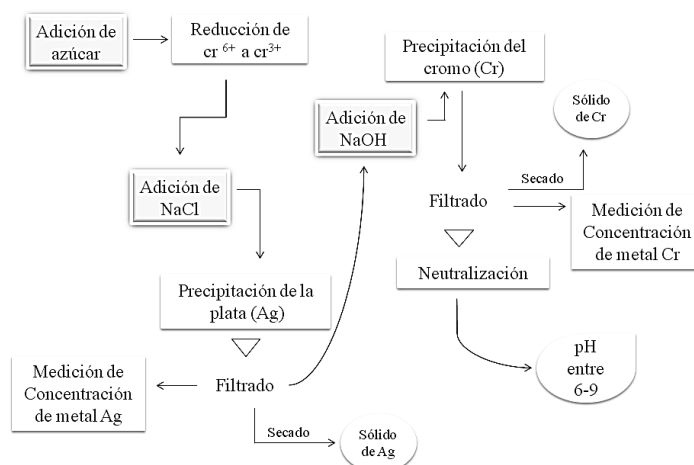


Figura 3: Esquema para la Remoción de metales pesados en los residuos generados por la DQO.

y plata), en los residuos generados por ensayo de la DQO realizado en el Laboratorio de Calidad Ambiental, es el tratamiento convencional; ya que, su eficiencia de remoción, bajo las condiciones del estudio, fueron mayores que para el tratamiento con cáscara de huevo de gallina. En base a esto, se planteó éste como esquema recomendado para el procesamiento del mencionado material Figura 3.

3.4. Comparación de las concentraciones de los metales, después de la aplicación de los tratamientos físico-químicos, con la normativa legal

Tabla 4: Cuadro comparativo entre el tratamiento convencional y el decreto 3.219.

Parámetro	Tratamiento convencional	Decreto 3219
Cr (mg/L)	10,15	2,00
Ag (mg/L)	<0,01	0,1
pH (adim)	8,8 ±0,1	6 – 9

Dentro de este marco se puede observar que, las concentraciones obtenidas del metal plata (Ag) cumple con lo requerido en la normativa, al igual que el pH se encuentra dentro del rango necesario para el vertido; sin embargo la concentración final del metal cromo (Cr) se mostró muy por encima

del límite permitido; bajo estas condiciones el residuo una vez tratado no se puede descargar, ya que, la concentración que se alcanzó no cumple con el límite permisible legal de concentración de cromo total que describe el Decreto 3.219 [6] en su sección VI de las descargas al Lago de Valencia y a la red hidrográfica tributaria. Por lo tanto, se recomienda evaluar modificar el método de tratamiento sugerido por Calvo [5], para evitar la formación de la especie anfótera observada en el análisis precedente.

4. Conclusiones

El líquido residual de la DQO se genera en el laboratorio en cantidades reducidas, acumulado en recipientes plásticos herméticos de 1 ½ litro de capacidad presentando un color verde – azulado, debido principalmente a la alta concentración del ion cromo en su forma trivalente (Cr^{3+}); de igual forma, presenta concentraciones de cromo y la plata, que exceden por mucho el parámetro establecido en la norma para el control de vertidos líquidos [6]; del mismo modo, mostró un pH muy ácido ($< 1,70$), estas características permitieron catalogarlo como un residuo tóxico y corrosivo.

El tratamiento convencional, basado en un proceso de reducción – precipitación, mostró eficiencias de remoción de 92,54 % y cercanas al 100,00 para el cromo y la plata respectivamente.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2017.

5. Referencias

- [1] Enrique Gadea Carrera. Seguridad en el laboratorio: gestión de residuos tóxicos y peligrosos en pequeñas cantidades. ntp 359. *IMU: Ingeniería municipal*, (252):14–17, 2009.
- [2] M. Bittar, S. Llamas, M. Quiroga, and Ferrer L. Tratamiento y disposición final del líquido residual generado en la demanda química de oxígeno. In *3^{er} Seminario Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. REDISA, ABES, 2010.
- [3] Tatiana Mañunga, Héctor Mario Gutiérrez, Jenny Alexandra Rodríguez, and Alexander Villarreal Díaz. Tratamiento de residuos de DQO generados en laboratorios de análisis ambientales. *Ingeniería e Investigación*, 30(2):87–95, 2010.
- [4] M. Escobar, G. Lobo, M. Maza, A. Pineda, L. Velásquez L. Romero, and M. De la Rosa. Evaluación del uso de cáscara de huevo como sustrato adsorbente para la remoción de cromo (VI) en solución acuosa. *Revista del colegio de médicos veterinarios del Estado Lara*, 8(2):36–43, 2012.
- [5] Guillermo Calvo-Brenes, Jesús Mora-Molina, Jaime Quesada-Kimsey, and Hilda Quesada-Carvajal. Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos. *Revista Tecnología en Marcha*, 23(1):94–106, 2010.
- [6] Presidencia de la República. Decreto N° 3219. normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, Extraordinaria(5305):1–56, 1999.
- [7] Presidencia de la República. Decreto N° 2635. normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, Extraordinaria(2545):1–32, 1998.
- [8] Reyna Windevoxhel, Nereida Sánchez, Neudis Subero, Héctor Bastardo, and Nora Malaver. Grupos funcionales de bacterias con potencial para biodegradación de hidrocarburos. *Revista Ingeniería UC*, 16(1):51–53, 2009.
- [9] Gary D. Christian. *Química Analítica*. Mcgraw-Hill, México, 6^{ta} edition, 2009.
- [10] Alonso Lozano Morales, Maria Inman, and E. Jennings Taylor. Electrolytic looping for through crack interruption during functional Cr⁺³ electroplating. *ECS Transactions*, 13(11):39–47, 2008.
- [11] Qinguo Fan. *Chemical testing of textiles*. Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [12] L.S. Clesceri, A.E. Greenberg, and A.D. Eaton. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, 20th edition, 1998.
- [13] Urbano Vargas and Erika Lorena. Extracción a escala de laboratorio del complejo de proteínas presentes en las membranas intersticiales de residuos de cáscara de huevo de gallina (*gallus domesticus*) mediante el proceso de hidrólisis alcalina. Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2015.
- [14] Suheila Abd Alreda Akkar. Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by adsorption on thermally modified and non-modified eggshells. *Journal of Engineering*, 19(12):1661–1672, 2013.

Implementation of a control system for a hand's passive rehabilitation device

Washington Mosquera^a, Pablo Benavides^a, David Ojeda^{*,b}, Diego Ortiz^a

^a*Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador*

^b*Centro de Biomecánica de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- A control proposal for a finger rehabilitator is presented. It is part of a multidisciplinary research project at the Technical University of the North (Ecuador) whose purpose is the production of medical devices. The creation of an automatic device that assists the physiotherapist in the hand's rehabilitation could allow the attention of many patients simultaneously. The control is simulated using a computer program since the design involves the use of electrical, mechanical and pneumatic systems; additionally, it allows performing the appropriate recovery routine, depending patient's injury. Finally, the rehabilitator is tested to verify its operation. Fine and gross motor movements are determined according to the passive rehabilitation methods of the fingers. The settling time of the actuators in the control system is set. The pneumatic actuator is used due to the slow movements that the rehabilitation of the hand must make; so the ON - OFF control system is applied in the solution.

Keywords: rehabilitation; control; automation; finger.

Implementación de un sistema de control para rehabilitador pasivo de dedos de la mano

Resumen.- Se presenta una propuesta de control para un rehabilitador de dedos de la mano. La misma está enmarcada dentro de un proyecto de investigación multidisciplinario en la Universidad Técnica del Norte (Ecuador) cuyo propósito es la producción de dispositivos médicos. La creación de un aparato automático que asista al fisioterapeuta en la rehabilitación de la mano pudiera permitir la atención de pacientes de forma simultánea. El control se simula usando un programa computacional ya que el diseño involucra la utilización de sistemas eléctricos, mecánicos y neumáticos; adicionalmente, permite realizar la rutina de recuperación adecuada, según sea el caso o nivel de mejoramiento del paciente. Finalmente se prueba el rehabilitador con el propósito de verificar su funcionamiento. Se determinan los movimientos de motricidad fina y gruesa según los métodos de rehabilitación pasiva de dedos de la mano. Se fija el tiempo de establecimiento de los actuadores en el sistema de control. Se usa el actuador neumático debido a los movimientos lentos que debe realizar la rehabilitación de la mano; por lo que se aplica el sistema de control ON - OFF en la solución.

Palabras claves: rehabilitación; control; automatización; dedos.

Recibido: marzo 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

La práctica de una disciplina deportiva de alto impacto o algún accidente, pueden ocasionar una lesión en los dedos de la mano [1, 2, 3]. La aplicación de terapias de rehabilitación a nivel de dedos es muy común en los centros de rehabilitación [4, 5, 6]. El presente proyecto está

enmarcado dentro del proyecto de investigación de multidisciplinario de las carreras de Ingeniería en Mecatrónica y Terapia Física adscritas a la Universidad Técnica del Norte (Ecuador) cuyo propósito es la producción de dispositivos médicos [7, 8, 9]. Cabe destacar que instituciones afines, debido a sus desarrollos en investigaciones de biomecánica y sus resultados satisfactorios [10, 11, 12], han servido de impulso y motivación para que se realicen soluciones de ingeniería destinadas a la población más vulnerable.

Por tal motivo, se presenta el diseño y desarrollo de un rehabilitador para los dedos de la mano, el cual se basa en el concepto de desarrollar un

* Autor para correspondencia:

Correo-e:dojeda@uc.edu.ve (David Ojeda)

sistema portátil de cuatro grados de libertad (GDL), con una interfaz háptica [13]. De manera similar, Wang y otros autores [14] presentan un sistema similar de rehabilitación para dedos, el cual puede generar movimientos de flexión y extensión.

La implementación de esta propuesta debido a la terapia que se realiza de forma autónoma, constante y confiable, bajo la supervisión de un especialista en fisioterapia [15], provoca la reducción del tiempo de recuperación de un paciente con dificultades de movimiento en su mano. Asimismo, los Centros de Rehabilitación Integral podrán brindar una mejor atención a sus pacientes [16].

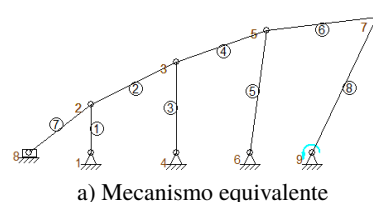
Por otro lado, adicionalmente, el dispositivo sirve como una ortesis pasiva para la rehabilitación de los dedos de la mano donde puede seleccionarse el tipo de lesión a tratar, tiempo de rehabilitación y empeño en el tratamiento, en los pacientes que así lo necesiten para que puedan nuevamente desempeñar sus funciones cotidianas, y así mejorar su calidad de vida.

2. Partes y componentes del rehabilitador pasivo de dedos de la mano

Diseño mecánico. El diseño parte de un mecanismo de eslabones (ver Figura 1.a) ubicados en similitud a un dedo de una mano humana. Según un estudio de características antropométricas y medidas de una mano promedio [17, 18] se realizan los cálculos respectivos para luego realizar una impresión del mecanismo (Figura 1.b). Finalmente se seleccionan los componentes mecánicos que conducen a la realización de pruebas conducentes a verificar los resultados esperados.

Componente neumático. Corresponde a los cilindros neumáticos de doble efecto, construidos a medida, para lograr los movimientos del mecanismo. La Figura 2 muestra el cilindro seleccionado.

Se instalan siete micro-actuadores neumáticos de doble efecto, en una base colocada en el antebrazo del rehabilitador, como lo ilustra la Figura 3, con el objetivo de conservar las medidas promedio de los dedos de la mano y realizar el movimiento



b) Impresión 3D del mecanismo en material PLA (Poliácido láctico)

Figura 1: Mecanismo del meñique.

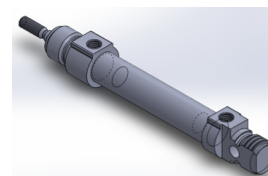


Figura 2: Actuador neumático seleccionado.

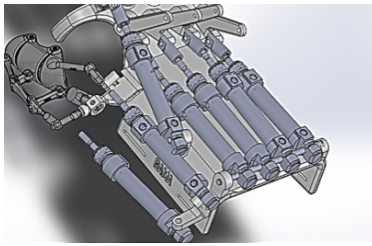
para el accionamiento del mecanismo que hace la rehabilitación.

Dichos actuadores son seleccionados bajo especificaciones técnicas de tamaño, peso, volumen potencia, control, precisión y mantenimiento, y que por ende sean afín al rehabilitador.

Componente de control. Para su funcionamiento, el dispositivo cuenta con un sistema electro-neumático el cual provee de los movimientos adecuados, según su programación y del ejercicio de rehabilitación prescrito por el profesional de medicina tratante (Véase Figura 4).

El sistema está conformado por:

- Válvulas electro-neumáticas 5/3
- Cilindros doble efecto
- Controlador eléctrico
- Unidad de mantenimiento neumático
- Software de control LabVIEW.
- Tablero de mando implementado (Figura 5).



a) Simulación del arreglo de los micro-actuadores



b) Arreglo de los micro-actuadores

Figura 3: Posicionamiento de los cilindros neumáticos de doble efecto sobre la base del rehabilitador.

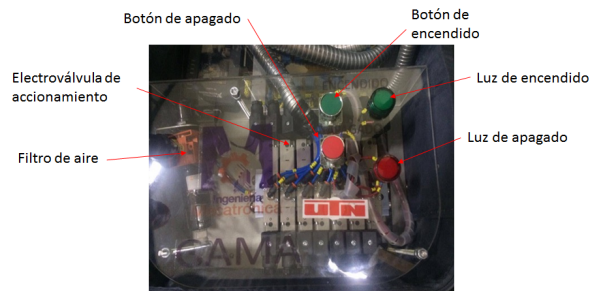


Figura 4: Unidad de potencia electro-neumática.



Figura 5: Tablero de mando implementado.

Para el sistema de control se establece el diagrama de bloques de control en lazo abierto,

tal cual mostrado en la Figura 6. Donde las

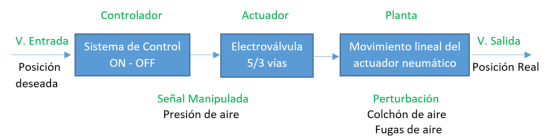


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control en lazo abierto.

características del sistema son:

A1: área del émbolo = 0,113 [m²].

M: masa externa aplicada = 1,01 N.

b: coeficiente de fricción viscosa = 0,3 Ns/m.

El sistema de control se realiza utilizando la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{P(s)} = \frac{0,113}{1,01(s^2 + 0,3 + s)}$$

La Figura 7 muestra el diagrama de bloque del controlador haciendo uso del software LabVIEW y la Figura 8 muestra la respuesta en lazo abierto en un pulso.

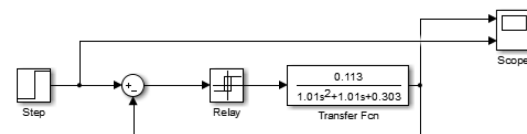
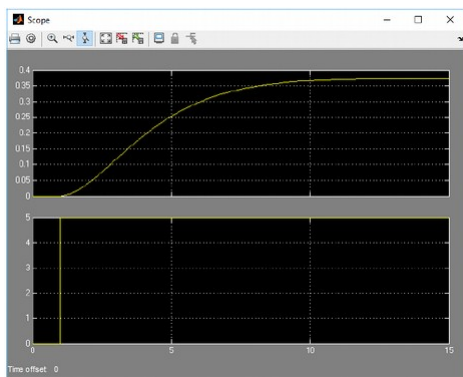


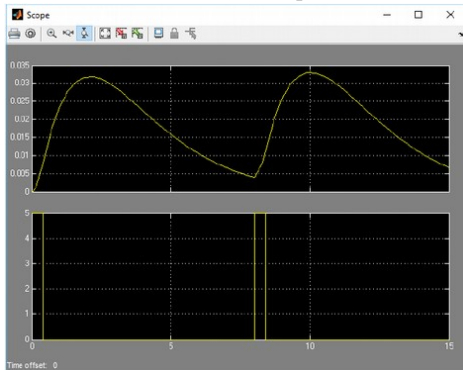
Figura 7: Diagrama de bloques del controlador.

Componentes del software. LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan C o BASIC. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en que estos lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

La Figura 9 muestra el diagrama de control de un dedo meñique utilizando LabVIEW. La ventaja de usar el mencionado software es que tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, como por ejemplo: sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en



a) Lazo abierto 1 pulso



b) Lazo abierto

Figura 8: Respuesta del controlador.

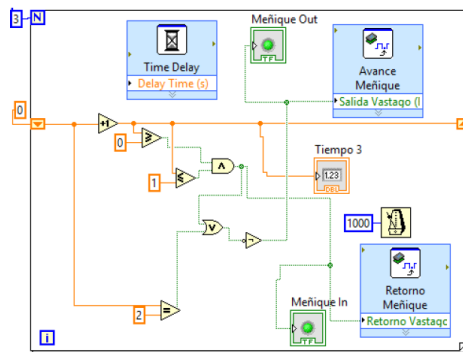


Figura 9: Control dedo meñique en el VI de LabView.

universidades, procesos de control industrial. LabVIEW es muy utilizado en procesamiento digital de señales (wavelets, FFT, Total Distorsion Harmonic TDH), procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras.

El diseño gráfico del sistema es un enfoque moderno para diseñar, generar prototipos y desplegar sistemas embebidos. Combina la

programación gráfica abierta con hardware para simplificar drásticamente el desarrollo. LabVIEW brinda la flexibilidad de un potente lenguaje de programación sin la complejidad de los entornos de desarrollo tradicionales. Por el contrario, sus beneficios son:

- Fácil de aprender y usar
- Funcionalidad completa
- Capacidades de E/S integradas

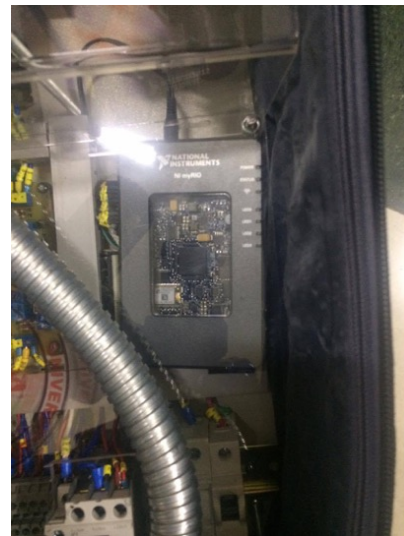


Figura 10: Sistema embebido myRIO usado para el rehabilitador.

Por otra parte, se usa un sistema embebido myRIO (Figura 10) para el rehabilitador. El sistema myRIO es un dispositivo de diseño embebido para estudiantes, con los siguientes beneficios:

- Rentable para enseñar e implementar múltiples conceptos de diseño con un dispositivo.
- 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas; 40 líneas E/S digital.
- Inalámbricos, LEDs, pulsador, acelerómetro interno.
- Xilinx FPGA y procesador dual-core ARM Cortex-A9,
- Programable con LabVIEW o C; adaptable para diferentes niveles de programación.

Finalmente logra ensamblarse todo el sistema de rehabilitación (ver Figura 11), haciendo uso del módulo de myRIO, ya que posee una interfaz amigable, tal como se observa en la Figura 12, siguiendo el diagrama de flujo de control (Figura 13) que permite obtener resultados satisfactorios.

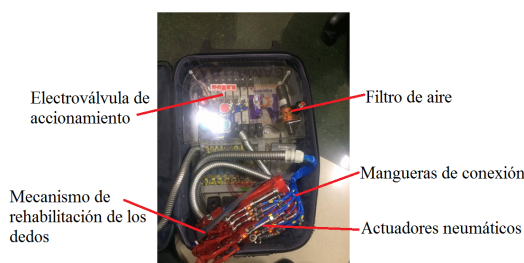


Figura 11: Conjunto completo del rehabilitador pasivo de dedos de la mano.

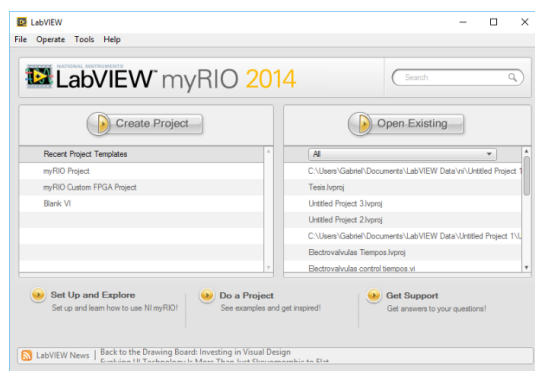


Figura 12: Pantalla principal myRio 2014.

3. Análisis de resultados

Luego de determinar los parámetros que permiten desarrollar el sistema de control implementado, se realiza un análisis haciendo énfasis en el prototipo final, respuesta y estabilidad que presenta en el dispositivo rehabilitador.

Se realiza el ensamblaje de todo el dispositivo rehabilitador, elementos mecánicos neumáticos y sistema de control. Ejecutadas las primeras pruebas se determinó que el primer prototipo posee falencias en el mecanismo y en el sistema de control, luego de hacer las correcciones respectivas se procede a ejecutar la segunda prueba, teniendo

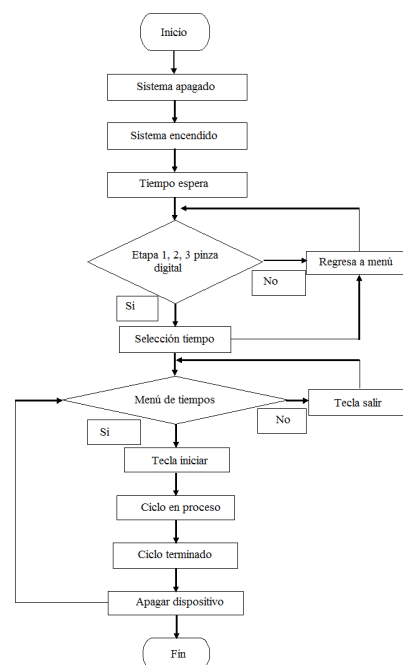


Figura 13: Diagrama de flujo de control.

como resultado un funcionamiento óptimo del mecanismo y una respuesta del sistema de control acorde a las necesidades planteadas en los objetivos.

Los cilindros neumáticos son sistemas de mayor dificultad en lo que a control corresponde. Se determinaron las ecuaciones respectivas para obtener un modelo matemático que implica relacionar la presión de trabajo con la posición a determinar, teniendo como resultado un tiempo de establecimiento acorde a la carrera corta del cilindro y los reguladores de velocidad.

El sistema de control ON – OFF teórico se acercó muy considerablemente a los valores de las pruebas reales obtenidas, se pueden observar estos valores en las Figuras 14 y 15.

Realizadas las primeras pruebas de los cilindros neumáticos con el sistema de control se obtuvo una inestabilidad en todos los cilindros teniendo como resultado un arranque completamente brusco que afecta el funcionamiento del dispositivo rehabilitador. Estas pruebas fueron necesarias para poder corregir y establecer una estabilidad en todo el sistema. Luego de estos ajustes el dispositivo posee un sistema de control estable con un arranque de los cilindros neumáticos muy suave y apropiado para rehabilitación.

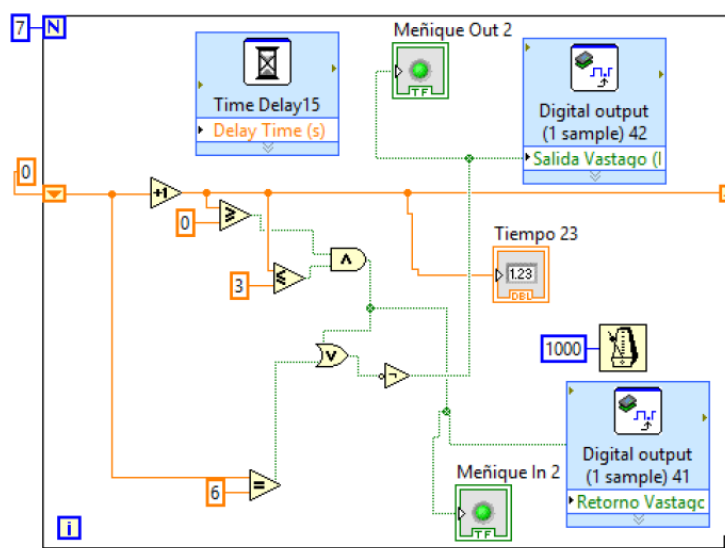


Figura 14: Tiempo de establecimiento real.

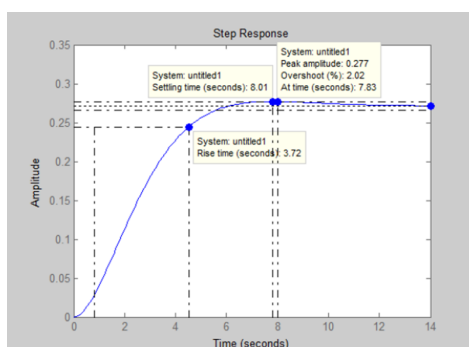


Figura 15: Tiempo de establecimiento teórico.

Para futuras investigaciones se puede implementar un sistema de control en ciclo cerrado con señales electromiográficas, esto para obtener un dispositivo rehabilitador activo.

4. Conclusiones

La determinación de los movimientos de motricidad fina y gruesa se logra debido a un estudio previo realizado por especialistas en fisioterapia definiendo los métodos de rehabilitación en el dispositivo. Cabe destacar que las pruebas sirvieron para fijar el tiempo de inicio para los actuadores, en el sistema de control. Se usa el actuador neumático debido a los movimientos lentos que se deben realizar en la rehabilitación de la mano; por lo que se aplica el sistema de control ON – OFF en la solución. El modelo matemático de

comportamiento del actuador se obtuvo a partir del acondicionamiento de los parámetros y valores de salida para fines de este proyecto. El diseño de control ON – OFF se realizó utilizando la función de transferencia de la presión respecto a la posición del vástago del cilindro, para sus cálculos se trabajó en un sistema de lazo abierto generando estabilidad al sistema. Esta implementación de control en los actuadores permitió tener un acceso rápido y directo al sistema neumático lo que facilitó su calibración.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a las Carreras de Ingeniería en Mecatrónica y Fisioterapia, adscritos a la Universidad Técnica del Norte, Ecuador, por todo el apoyo técnico-científico, así como a la SENESCYT, específicamente el programa Prometeo, por el soporte al desarrollo de esta investigación.

5. Referencias

- [1] Isabel Cristina Gallego Ching, Santiago Patiño Giraldo, Elkin Arango, Mónica Paola Clavijo Rodríguez, and Jorge Alberto Osorio Ciro. Lesiones deportivas. *Iatreia*, 20(2):167–177, 2007.
- [2] María del Pino Díaz Pereira, José María Buceta, and Ana M. Bueno. Situaciones estresantes y vulnerabilidad a las lesiones deportivas: un estudio con deportistas de

- equipo. *Revista de psicología del deporte*, 13(1):7–24, 2004.
- [3] Roald Bahr and Sverre Maehlum. *Lesiones deportivas: diagnóstico, tratamiento y rehabilitación*. Ed. Médica Panamericana, 2007.
- [4] Pablo Gabriel Iza Yugsi. Diseño e implementación del sistema de control de un rehabilitador pasivo de dedos de la mano. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2016.
- [5] Jaime Vargas Medina and Luis Enrique Rodríguez Tahuilán. Análisis experimental del túnel carpiano. Trabajo Especial de Grado, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.
- [6] C. H. Guzmán Valdivia, A. Blanco Ortega, and M.A. Oliver Salazar. Entendiendo la mecatrónica en la rehabilitación. In *X Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*, pages 1–6, Cuernavaca Morelos, México, 2013.
- [7] F. Cadena, J. Sanipatin, G. Verdezoto, H. Cervantes, D. Ortiz, and D. Ojeda. Acquisition and conditioning of electromyographic signals for prosthetic legs. In *Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering, APCASE '15*, pages 360–365, Washington, DC, USA, 2015. IEEE Computer Society.
- [8] F. Valencia, X. Lima, D. Ojeda, and D. Ortiz. Prótesis de rodilla externa mecatrónica. *Biomecánica*, 23(1):33–56, 2017.
- [9] Femando Valencia, Diego Ortiz, and David Ojeda. Design and testing of low-cost knee prosthesis. In *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), 2017 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [10] Carlos Aguilar, José Rodulfo, Jesús Pérez, Brizeida Gámez, and David Ojeda. Traccionador de fractura para tibia y peroné. *Revista Ingeniería UC*, 22(2), 2015.
- [11] J Velasco, D Ojeda, J Brito, R Chacon, M Benitez, and R Melendez. Vacuum for the removal of brain tumors, with micro-destruction and integrated control system. *Revista Ingeniería UC*, 23(2):122–137, 2016.
- [12] José Velasco, David Ojeda, Mariana Hurtado, and Rafael Chacón. Diseño de un seccionador con cánula de aspiración para una microaspiradora de extracción de tumores cerebrales. *Revista Ingeniería UC*, 21(3), 2014.
- [13] Mark J. Lelieveld, Takashi Maeno, and Tetsuo Tomiyama. Design and development of two concepts for a 4 dof portable haptic interface with active and passive multi-point force feedback for the index finger. In *ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 547–556. American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [14] J Wang, J Li, Y Zhang, and S Wang. Design of an exoskeleton for index finger rehabilitation. In *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference*, volume 2009, pages 5957–5960, 2009.
- [15] S. C. Enriquez, Y. Narváez, O. A. Vivas, J. Diez, F. J. Badesa, J. M. Sabater, and N. Garcia-Aracil. Sistema robótico de tipo exoesqueleto para rehabilitación de la mano. In *Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014*, Valencia, España, 2014. Universitat Politècnica de València.
- [16] M. Feijóo Aguilar. Adquisición de equipos para implementar un Centro de rehabilitación y terapia física integral en la U.A.A. de Santa Rosa - El Oro. Reporte técnico, IIEC, Ecuador, 2015.
- [17] Milton Armando Proaño Robalino. Determinación de la fuerza de agarre y medidas antropométricas de mano en la población afroecuatorina en la parroquia Mascarilla, Cantón Mira, Provincia del Carchi año, 2016. Trabajo Especial de Grado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2016.
- [18] Erika Adriana Ramírez Vargas. Determinación de la fuerza de agarre y medidas antropométricas de mano; población indígena de la comunidad Miguel Egas; Otavalo; Provincia de Imbabura. Trabajo Especial de Grado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2016.

Design of a system of acquisition and data processing with the use of multisensors for university physics laboratories

Yubiry González^{*,a}, Jesús Pérez^b y Emery Dunia^b

^aPostgrado en instrumentación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

^bDepartamento de Ciencias Básicas, Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua Federico Brito Figueroa, Venezuela.

Abstract.- The design and construction of a data acquisition and data processing system with the use of multisensors for the execution of ten practical laboratory works that covers the curricular contents of basic physics at university level. The proposed system incorporates data acquisition and processing technologies through the use of multi-sensors (ultrasonic position sensor, voltage sensors, light intensity, temperature, mechanical bending and Hall effect) and a PIC 16F870 micro controller, attached to a USB communication interface. The design of automated practical experiences in the acquisition of signals and data processing, showed its effectiveness and versatility for the execution of practical experiences in the laboratories of university physics.

Keywords: data acquisition and processing systems; multisensors; physics laboratories.

Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para laboratorios de física universitarios

Resumen.- Se presenta el diseño y construcción de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para la realización de diez trabajos prácticos de laboratorio que abarcan los contenidos curriculares de la física básica a nivel universitario. El sistema propuesto incorpora las tecnologías de adquisición y procesamiento de datos mediante la utilización de multisensores (sensor ultrasónico de posición, sensores de voltaje, de intensidad lumínica, de temperatura, de flexión mecánica y de efecto Hall) y un micro controlador PIC 16F870, unido a una interfaz de comunicación USB. El diseño de las experiencias prácticas automatizadas en la adquisición de señales y procesamiento de datos, mostró su eficacia y versatilidad para la ejecución de experiencias prácticas en los laboratorios de Física universitarios.

Palabras claves: sistemas de adquisición y procesamiento de datos; multisensores; laboratorios de física.

Recibido: mayo 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas se ha caracterizado por el auge de la globalización informática, la automatización y las telecomunicaciones; comúnmente conocidas como Tecnología de Información y Comunicación (TIC), teniendo un amplio impacto, reconocido mundialmente en el área de la ingeniería y la vida cotidiana. Aunado al desarrollo de las TIC se encuentra el empleo

sistemático y extendido de la automatización-control y adquisición-procesamiento de datos, mediante la tecnología de Microcontroladores, también conocidos como controladores de interfaz periférico, o por su acrónimo anglosajón PIC (Peripheral Interface Controller). La incorporación de estos desarrollos tecnológicos dentro del proceso de enseñanza – aprendizaje a nivel universitario trae de la mano, además, notables resultados que permiten acercar a los aprendices, desde la práctica, al uso de estos desarrollos [1].

La incorporación de la automatización y procesamiento de datos con el uso de microcontroladores en los laboratorios universitarios, sirve no solo para hacer más eficiente el procesamiento de datos y la ejecución de los ensayos sino también; y sobre

* Autor para correspondencia:

Correo-e: Yubiry.gonzalez.17@gmail.com (Yubiry González)

todo; para capacitar a los futuros ingenieros en el manejo de las TIC, además de los sistemas automatizados basados en PIC.

Es conocido dentro de los laboratorios de física universitaria que la mayoría de las veces, emplean técnicas de muestreo, tabulación y procesamiento de datos en forma manual y la repetición continua de medidas de una misma situación física particular [2, 3]. El tiempo efectivo de “experimentación” para el estudiante se circunscribe al muestreo estadístico y la lectura visual de instrumentos de medición, soslayando la interpretación, análisis y variación de otros parámetros experimentales, dificultad que puede ser superada con la incorporación de sistemas automatizados y el uso de multisensores.

En los últimos años diversos autores [4, 5, 6, 7] han propuesto iniciativas del empleo de tecnología PIC limitándose a ciertos contenidos de Mecánica Clásica en los Laboratorios de Física Universitaria; siendo menester ampliar la gama de aplicación de tales dispositivos a sistemas multisensores con tecnología PIC que puedan abarcar mas contenidos programáticos en tópicos diversos como Mecánica, Óptica, Electromagnetismo, Termodinámica y Física Moderna.

El objetivo del presente trabajo es presentar el diseño y construcción de un sistema de adquisición y procesamiento de datos empleando tecnología PIC y multisensores analógicos-digitales, a ser implementados en los laboratorios de Física General que cumpla con los siguientes criterios:

- **Versatilidad:** empleo del mismo sistema de adquisición y procesamiento de datos con diversos sensores para la ejecución de todas las prácticas de laboratorio de física, que incluye contenidos de cinemática, dinámica, hidrostática, electricidad, magnetismo, óptica, calor y temperatura, oscilaciones, ondas y física moderna.
- **Robustez:** diseño compacto que permite la manipulación por los no expertos. Se presenta el prototipo armado y su configuración permite adicionarle accesorios de forma modular de acuerdo a la aplicación. Evitando

el uso de calibración previa por parte de los usuarios.

- **Universalidad:** puede acoplarse a cualquier PC, Laptop o Tablet y permite el procesamiento de la información emanada por el sensor usando cualquier software de graficación y manejo de base de datos.
- **Economía:** construido con materiales de bajo costo y fácil adquisición sin requerir insumos adicionales ni refacciones. El sistema de adquisición de datos y de experimentación es energizado por el ordenador, no requiriendo de fuentes de voltaje adicionales.

En la sección 2 (metodología) se muestra los detalles de su diseño y construcción, seguidamente los trabajos prácticos se especifican en la sección 3 (resultados) y en la sección 4 se discute y concluye sobre la valoración del prototipo.

2. Metodología

El sistema de medición consiste en una maqueta experimental, un sistema de adquisición de datos (Hardware) y un software en Visual Basic para el procesamiento de la información. La maqueta de experimentación pone a prueba la situación física particular, los sensores registran la información requerida y la envían al PIC; el microprocesador crea un archivo .dat y la envía al ordenador a través del puerto USB; el ordenador crea una base de datos por medio de un software en Visual Basic Microsoft® que puede ser leído y procesado por cualquier programa de graficación y cálculo, como Excel®, Origin®, Matlab®, MAPLE® (Figura 1).

2.1. Hardware

El sistema de control y adquisición de datos, consta de un microcontrolador PIC 16F870, siendo uno de los más comerciales, genéricos y económico. Este, presenta varias características que se adaptan a las necesidades del laboratorio. Algunas de ellas es que posee cinco entradas analógicas además de cinco digitales, y un oscilador externo de 20 MHz. El diseño del

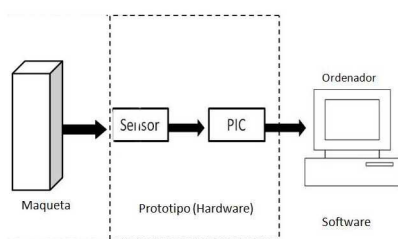


Figura 1: Configuración del sistema de Medición. Incluye la maqueta de experimentación, el prototipo (Hardware) y el programa en Visual Basic (software).

sistema de control que discutiremos más adelante puede, con muy ligeras modificaciones, adaptarse a cualquier otro microprocesador similar al 16F870.

Como característica de diseño se consideró que el PIC solo ejecutará las operaciones básicas de coleccionar y transmitir los datos de los sensores hacia el computador (en formato .dat), dejando las operaciones de manipulación, cálculos y obtención de gráficas a los programas de usuario (Excel, MatLab, etc). Con ello, se evita tener que reprogramar el PIC cada vez que se redefina la maqueta de experimentación o situación física particular donde quiera emplearse el hardware, y adicionalmente mejora el rendimiento del dispositivo.

La comunicación entre el microprocesador (PIC) y el ordenador (PC) se realiza a través del bus serial universal (USB), en función de su versatilidad de aplicación en las tecnologías actuales de comunicación. Vale recordar que los ordenadores de fabricación posteriores al año 2010 ya no cuentan con puerto serial. Adicionalmente, la comunicación vía USB permite la alimentación del PIC directamente desde la PC sin necesidad de fuentes adicionales, garantizando la sobrevivencia del dispositivo ante fluctuaciones de la red doméstica.

Para la interfaz de comunicación entre el PIC y la PC se utilizó el integrado FT232RL en su configuración estándar (Figura 2). Donde los terminales 1 y 5 del FT232RL reciben y transmiten respectivamente la señal al PIC, y los terminales 15 y 16 se comunican al puerto USB. El capacitor C7, funge como un capacitor de desacoplo de

componentes alterna de la tensión de alimentación +5V (terminal 19).

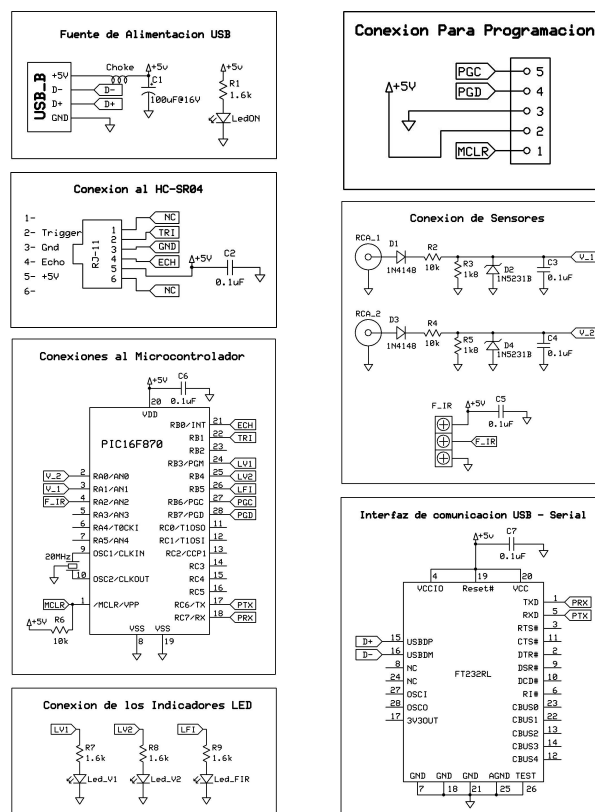


Figura 2: Diagrama en bloque del sistema de control y adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos permite coleccionar en función del tiempo, simultáneamente las señales enviadas por un sensor ultrasónico de movimiento HC-SR04 (terminales 21 y 22 del PIC), un sensor analógico de voltaje (terminal 4 del PIC) y dos sensores de voltaje digitales (terminales 2 y 3 del PIC). Estas últimas permiten medir tensiones discreta en el rango de 0-255, para ello se emplea un circuito divisor de tensión elemental (Figura 2) provistos de un circuito de protección del PIC ante sobretensiones.

Las entradas de voltaje (V_1 y V_2) al dispositivo se efectúan a través de conectores RCA y cables coaxiales que minimizan el ruido instrumental. Fueron provistos de puntas de prueba para su uso en protoboard, con pinzas para el aterramiento, incorporándolo dentro del dispositivo circuitual interno junto al PIC. Como quiera que el sensor analógico de tensión F_IR está alimentado por la

misma fuente del PIC, su conexión no requiere de los componentes de protección y la señal se envía directamente al PIC.

Todo el dispositivo está encapsulado en una caja de proyectos, como se observa en la Figura 3. Los cuatro LED indicadores, corresponden a la señal on-off del equipo, las entradas V_1 y V_2 y a la señal del sensor analógico de tensión F_{IR} respectivamente, que se encienden al momento de la conexión de los plug correspondientes. Tanto el plug USB, como los plug de los sensores de movimientos y los plug ya referidos son de distinto tipo, con la finalidad didáctica de prever daños al equipo por una mala conexión durante la operatividad.

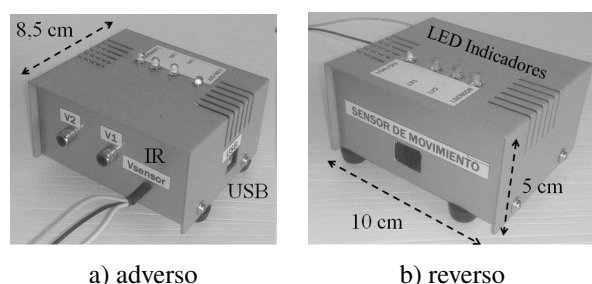


Figura 3: Cajetín y conexiones del Sistema de Control y Adquisición de datos.

2.2. Software

Para conectar y desconectar el sistema de control y adquisición de datos se necesita de un ordenador como se mostró en la Figura 1. Para la activación se creó una interfaz gráfica para que el usuario active o desactive tal sistema y el PIC envía la información de los sensores que luego se transmite directamente al ordenador, en un archivo de texto. Esta interfaz es un programa ejecutable, donde el usuario podrá conectar y desconectar el sistema de control seleccionando el ícono correspondiente, iniciando así la captura de datos de los sensores instalados. Podrá además, seleccionar la velocidad de muestreo, cuyos valores ya están predefinidos (2 s, 1 s, 500 ms, 250 ms y 100 ms) y el puerto COM de comunicación en la PC donde se halla instalado ver Figura 4.

Al desconectar la interfaz el sistema inmediatamente generará un archivo .dat, que contiene

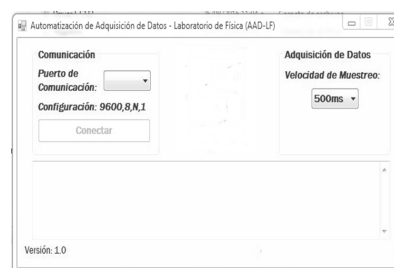


Figura 4: Pantalla de inicio de la interfaz gráfica AAD-LF.

información (dividido en columnas) de las medidas realizadas en unidades de centímetro o volt, según sea el caso, y el intervalo temporal de cada medida. Para visualizar y procesar los datos, el usuario podrá seleccionar cualquier otro software que permita la lectura de este formato (por ejemplo Excel, Matlab entre otros) para la obtención de las curvas, cálculos y gráficas de acuerdo a los objetivos planteados en cada uno de los trabajos prácticos de laboratorio, como se verá en la sección 3.

2.3. Sensores

Se emplean multisensores de respuesta diversa para cada aplicación del dispositivo en situaciones físicas particulares, dependiendo de las Prácticas de Laboratorio a ejecutar, como se discutirá específicamente en la sección 3. Los sensores a emplear son:

- de posición (ultrasónico)
- de tensión eléctrica o voltaje DC
- de intensidad lumínica o fotométrico
- de temperatura (v) de flexión o tensión mecánica
- de efecto Hall.

El sensor ultrasónico (HC-SR04) permite, por un sistema de transmisión y recepción, utilizar dicha señal para captar la distancia. El HC-SR04 registra el lapso entre emisión y recepción del pulso ultrasónico. El PIC contiene un programa que traducirá estos lapsos de retardo como posición del móvil. En sentido estricto hay un error sistemático

debido a que la velocidad del sonido en el aire es finita; lo que acarrea un retardo, del orden del tiempo de respuesta del sensor sónico (ver ecuación (1)).

$$t_s = \frac{2d}{v_{\text{sonido}}} \quad (1)$$

Sin embargo, como los desplazamientos (d) considerados en las prácticas de laboratorio a realizar son del orden de las decenas de centímetros; este error es solo del orden de los milisegundos, despreciable cuando los tiempos característicos del sistema (tiempo de recorrido del móvil) son del orden de la decena de segundos. Las posiciones y tiempo son leídas por un programa de usuario como Matlab o similar para elaborar las gráficas requeridas en cada situación física particular de acuerdo al trabajo práctico de laboratorio considerado.

Las entradas de voltaje (V_1 y V_2) permiten medir tensiones discretas en el rango de 0-255. Para realizar el cálculo y obtener los valores de voltaje medidos, debe aplicarse la relación:

$$V = 0,54V + \left[\frac{V_{PC}}{1023} A_i f_s \right] \quad (2)$$

Donde:

V: denota el voltaje aplicado a las entradas V_1 y V_2 (expresada en voltios).

V_{PC} : el voltaje de alimentación, este es entregado por el puerto USB, típicamente es 5,06 V.

A_i : el valor entregado por el equipo al computador, es el equivalente digital del voltaje que se está midiendo (magnitud adimensional).

f_s : es el factor equivalente del divisor de tensión para cada entrada. $6,59 \pm 0,01$ para el canal 1 y $6,55 \pm 0,01$ para el canal 2.

La ecuación (2) resulta de la resolución de la malla de entrada de los sensores RCA_1 y RCA_2 en el circuito de la Figura 2. Obsérvese que las medidas de voltaje mínimamente detectadas están limitadas por la tensión de disparo del diodo de protección 1N4148 por lo que las tensiones medidas serán siempre mayores a 0,54 V.

El sensor fotométrico (S) es un fotoresistor 21K1130 de respuesta lineal en el rango visible, se conecta al cajetín del sistema de control y

adquisición de datos, usando la entrada “Vsensor” (Figura 4), a través de entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3). Está alimentado por el PIC por medio de un divisor de tensión constituido por el fotoresistor (R_p) y un resistor R_0 en el orden de $1k\Omega$, en paralelo a la alimentación. En ausencia de luz $R_p \gg R_0$ y la señal que llega al PIC es del orden de 0 voltios, en iluminación, cuando $R_p < R_0$ la señal transmitida es (R_0/R_p) 5 V.

Se usa como sensor de temperatura un LM35 (transistor marca Texas Instruments), de respuesta lineal en el rango -55 a 150 °C, con exactitud de 0.5 °C a la temperatura ambiente. El LM35 es fundamentalmente un fotómetro infrarrojo, que se conecta directamente al PIC usando la entrada “Vsensor” (Figura 4), a través de la entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3) para obtener los cambios de temperatura en función del tiempo.

Como sensor de flexión mecánica se emplea un LDT0-028K, que es piezoeléctrico, donde la flexión crea una tensión dentro del piezopolímero y se generan picos de voltajes del orden de centenares de milivoltios. El microprocesador (PIC) registra las variaciones temporales de voltaje del LDT0-028K, como respuesta a la tensión mecánica o flexión, su alimentación es a través del PIC por medio de la entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3).

El sensor de inducción magnética A3141 consiste en un transistor CMOS, que emplea el efecto Hall, a través de la tensión colector abierto; cuya conexión y alimentación es a través de la entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3) sin necesidad de modificar la electrónica ni la programación interna del PIC.

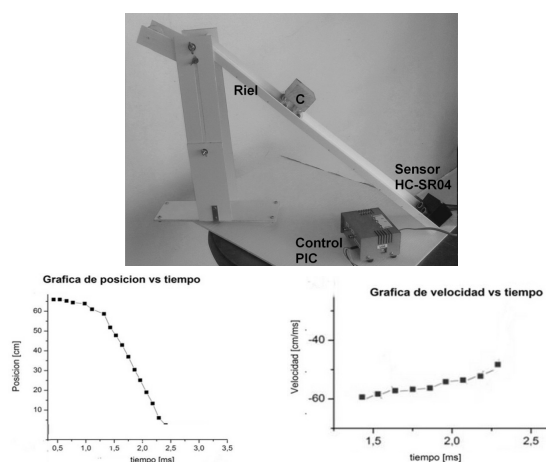
3. Resultados y discusión

Se describen a continuación la implementación del sistema de adquisición y procesamiento de datos en diversas prácticas de laboratorio de los cursos Universitarios de Física General.

3.1. Cinemática (plano inclinado)

Un trabajo práctico de laboratorio, frecuente en casi cualquier laboratorio de física general, consiste en medir la aceleración de un cuerpo que cae sobre

un plano inclinado, bajo la acción de la gravedad. Básicamente, se obtiene la gráfica de posición versus tiempo variando el ángulo de inclinación del plano y la masa del móvil. En las prácticas tradicionales no automatizadas, se obtiene de forma discreta estas gráficas, repitiendo innumerables veces las medidas. Además de monótono, la práctica suele resultar larga en duración y con muchos errores de apreciación. En este caso, el empleo del sistema propuesto (ver Figura 5) permite obtener la gráfica de posición-tiempo en forma automatizada y continua. La mayor actividad de los estudiantes, será discutir y analizar las gráficas obtenidas, según las variables involucradas (masa, ángulo, altura) y no en la repetición de la misma situación física.

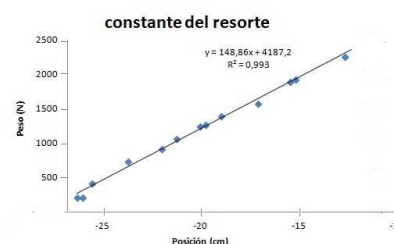
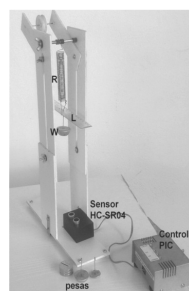


El sensor registra la posición del móvil C en cada instante t y el software genera las gráficas correspondientes.

Figura 5: Diseño experimental de la práctica de cinemática en el plano inclinado.

3.2. Dinámica (Ley de Hooke)

El prototipo puede emplearse para estudiar la Ley de Hooke, en este caso el sensor ultrasónico determina la posición final del sistema. El sensor registra la posición de equilibrio para cada masa. El estudiante varía la masa W para un mismo resorte S de constante de elasticidad k , desconocida. Y a partir de la gráfica de elongación versus masa se determina la constante k . Los estudiantes pueden cambiar el resorte y obtener varios ejemplos para su discusión y comparación. La función de la lámina acrílica (L) es reflejar el eco del sensor y determinar la elongación del resorte para cada pesa.



La experiencia permite la evaluación de la constante de elasticidad del resorte, del orden de $k = 148\ 860\ [\text{N/m}] \pm 10$

Figura 6: Diseño experimental de la práctica de Ley de Hooke.

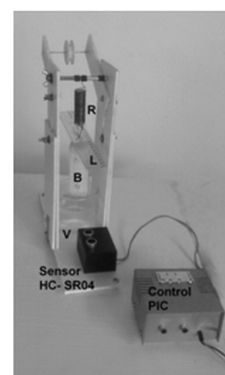


Figura 7: Diseño experimental de la práctica de empuje hidrostático.

3.3. Empuje hidrostático

La configuración experimental usada para la experiencia de Dinámica (Ley de Hooke), puede emplearse para estudiar el principio de Arquímedes y la noción de peso “aparente”. Así, como se muestra en la Figura 7, se sumerge un bloque de madera (B), en un fluido de densidad desconocida (vaso V), puede determinarse el empuje hidrostático, si se conoce la constante del resorte (R), el volumen de la masa sumergida y el desplazamiento del bloque respecto a su posición inicial de equilibrio Δy , medido por el sensor HC-SR04. Análogamente pueden realizarse experimentos donde el estudiante verificará la validez del principio de Arquímedes y probará la dependencia del empuje hidrostático para distintos fluidos.

3.4. Corriente y resistencia

Una práctica de laboratorio usual en los contenidos de corriente y resistencia es la elaboración de la gráfica de corriente versus voltaje para dispositivos óhmicos y no óhmicos (semiconductores). La configuración experimental es la usual (Figura 8), donde el elemento al que se realiza la curva característica (corriente versus voltaje) se denota con z y R_0 es un resistor para medir indirectamente la corriente que circula en z . Típicamente se realiza esta experiencia para evaluar la curva característica de un diodo semiconductor. Para la realización de la curva característica basta con variar el potenciómetro R_p mientras se adquieren los datos, el dispositivo registra automáticamente las tensiones V_1 y V_2 , con las cuales se obtiene la caída de tensión y la corriente en z . Adviértase que el registro ocurre en lapso del orden de los milisegundos, por lo cual no es relevante la rapidez en la variación manual del potenciómetro R_p durante la adquisición de los datos. Además se puede cambiar el elemento z (diodo semiconductor) por un resistor Ohmico (del orden de 20 a 100 Ω) para comparar la curva característica con un conductor óhmico.

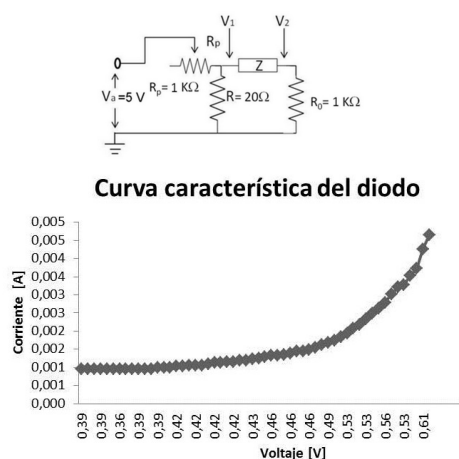


Figura 8: Diseño experimental de la práctica de corriente y resistencia para un diodo 1N4001.

3.5. Capacitancia y circuito RC

Para estudiar la carga y descarga de un capacitor, se empleará un circuito simple RC en serie, constituido por un Resistor de 1k Ω y un capacitor

de 1 mF; alimentado por una fuente DC de 5V como muestra la Figura 9. Los resultados de la carga y descarga del capacitor se muestran en la Figura 10 al registrar las tensiones en V_1 y V_2 para cada milésima de segundo.

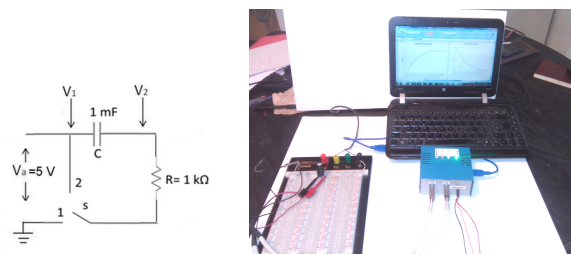


Figura 9: Diseño experimental de la práctica de capacitancia y circuito RC.

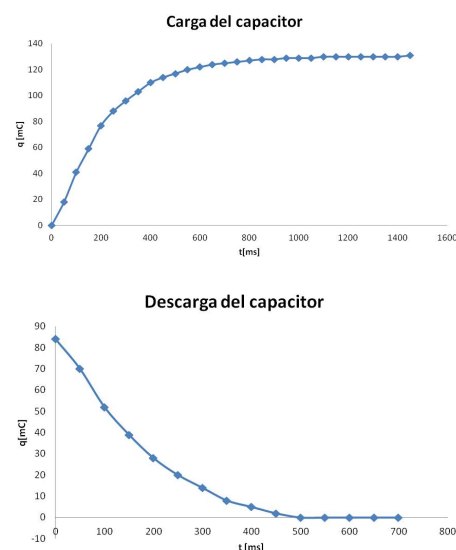


Figura 10: Resultados de la práctica de capacitancia y circuito RC.

3.6. Difracción

El dispositivo también puede usarse para mostrar los experimentos estándar de interferencia y difracción. En la Figura 11 se observa el diseño experimental producido al iluminar con un láser una red de difracción (R). En esta aplicación el sensor ultrasónico (D) guarda la posición del fotómetro (s) cuando se desplaza a lo largo de la pantalla de observación (P), constituida por una lamina de vidrio de 0,2 mm de espesor, permitiendo

obtener automáticamente la curva normalizada de intensidad versus posición del patrón de difracción (Figura 11). A diferencia de las prácticas estándar de difracción de doble rendija, el sistema propuesto permite obtener una gráfica casi continua de posiciones e intensidades.

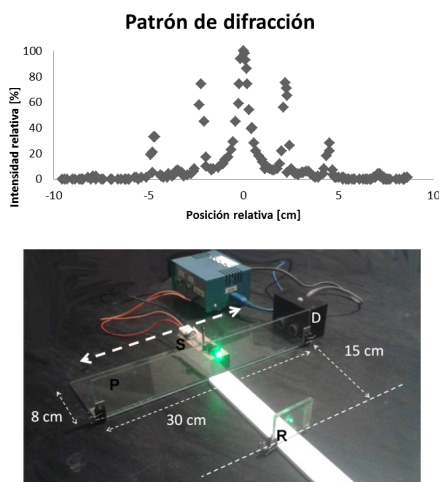


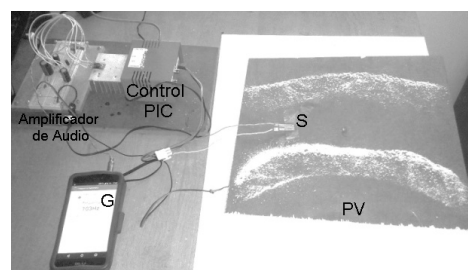
Figura 11: Difracción para una red de 300 líneas/mm iluminada con luz láser verde de 100 mW y longitud de onda 532 nm.

3.7. Resonancia y Patrones de Chladni

En una placa vibrante pueden generarse ondas estacionarias a ciertas frecuencias determinadas (resonancia). Su visualización se suele presentar a través de un medio dispersivo o granular que se acumula en los nodos sobre la placa vibrante. Las figuras generadas por la distribución de material granular sobre las placas se denominan Patrones de Chladni. En esta aplicación se ilustra la generación de tales Patrones siguiendo la configuración propuesta por González [8], tal y como se muestra en la Figura 12, donde además se presenta la curva de resonancia para la placa cuadrada utilizando el sensor de vibración LDT0-028K, que remplazará la sal utilizada como medio dispersivo en la visualización de los nodos y antinodos de la oscilación acústica.

3.8. Cuerpo negro y ley de Stephan–Boltzmann

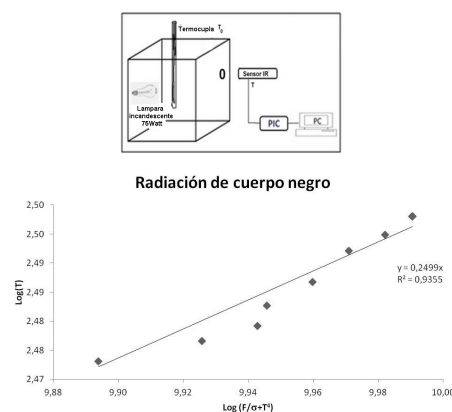
Puede emplearse el sistema para graficar la variación de temperatura en función del tiempo



Se muestran las amplitudes relativas de la oscilación, medida con el sensor de vibración LDT0 028 K (S), para una frecuencia de resonancia de 74 Hz.

Figura 12: Patrones de Chladni.

de un cuerpo negro construido en forma simple, mediante un cubo de madera de 0,3 m de lado, en cuyo interior hay un bombillo incandescente de tungsteno que emite al exterior a través de un pequeño orificio (Figura 13). Para ello se



La pendiente de 1/4 obtenida permite comprobar la ley de Stephan–Boltzmann.

Figura 13: Montaje experimental de la radiación de cuerpo negro.

emplea una termocupla que mide la temperatura termodinámica (T_0) en el interior de la caja enviando la respuesta al PIC a través del sensor de voltaje digital V_I del dispositivo, simultáneamente el sensor infrarrojo LM35 mide la temperatura de la radiación a través de la emisión del

orificio del cuerpo negro. Empleando el software de graficación se construyen diferentes gráficas, como $\log(T)$ versus t y/o $\log(T)$ versus $\log\left(\frac{F}{\sigma} + T_0^4\right)$ donde F es el cociente entre la potencia del bombillo (75 Watt) y el área de la caja $0,09 \text{ m}^2 \pm 0,001 \text{ cm}^2$. En este último caso la pendiente de la recta obtenida deberá ser del orden de $1/4 = 0,25$; que equivale a la Ley de Stephan-Boltzmann (Figura 13).

3.9. Oscilaciones amortiguadas

Para estudiar las oscilaciones amortiguadas en un sistema masa-resorte vertical, sometido a la aceleración de gravedad, basta con registrar la posición instantánea de la masa oscilante, de acuerdo a la configuración de la Figura 6. El sensor HC-SR04 registra la posición durante la oscilación y podrá obtenerse las gráficas que se muestran en la Figura 14.

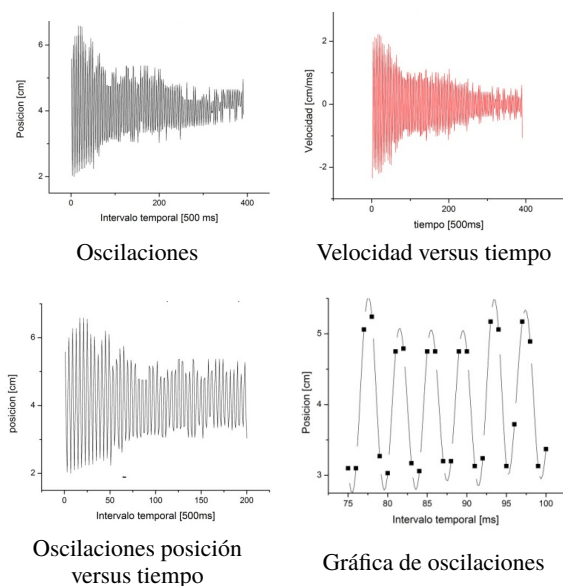


Figura 14: Gráficas del muestreo de 400 datos para el movimiento oscilatorio amortiguado en un lapso de 2 minutos.

3.10. Fuerza magnética y solenoides

Se puede ejemplificar el efecto de la fuerza magnética ejercida por un solenoide, empleando el dispositivo para registrar la inducción magnética de un solenoide de 265 espiras de cobre y con embobinado de longitud $L \approx 0,055 \text{ m} \pm$

$0,001$ y radio medio $r_{\text{espiras}} \approx 0,63 \text{ cm} \pm 0,01$, que es alimentado por una fuente DC variable (Figura 15). Para ello se conecta un divisor de tensión entre la fuente y el solenoide, con un potenciómetro de $1 \text{ k}\Omega$ y un resistor de 20 Ohmios . El sensor digital de tensión V_1 registrara la caída de tensión en el resistor mientras el sensor inducción magnética mide las variaciones de voltaje debidas al efecto Hall a través de la entrada F_IR del PIC. La variación de la tensión de alimentación del solenoide, por medio del potenciómetro, permite graficar la tensión Hall en función de la caída de tensión en el solenoide, y con ello la dependencia lineal entre Inducción magnética y corriente en el solenoide.

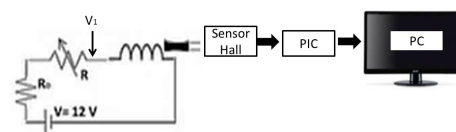


Figura 15: Diseño experimental para ilustrar el campo magnético de un solenoide.

4. Conclusiones

El prototipo elaborado mostró su eficacia como sistema automatizado de adquisición de datos en los trabajos prácticos de laboratorio de física para la enseñanza universitaria, como se mostró en la sección 3. En particular su empleo para las determinaciones de las variaciones temporales de posición, mediante el uso del sensor HC-SR04, mostró ser suficientemente sensible incluso para variaciones tan pequeñas como $0,2 \text{ cm}$ en rango de distancias de 1 a 60 cm de longitud; como se evidenció en las experiencias de cinemática (sección 3.1), Ley de Hooke (sección 3.2) y Empuje Hidrostático (sección 3.3). Se destaca las prestaciones del sensor en cuanto a su empleo en cualquier condición de iluminación y para móviles en trayectorias cortas, del orden de los centímetros, que difícilmente pueden ser alcanzadas con similar prestación por los sensores optoelectrónicos, basados en interruptores de luz infrarrojos.

Así mismo, el uso del dispositivo evidenció su bondad en la colección rápida y eficiente de muchos datos en lapsos de tiempo muy breves, como se mostró en los experimentos de corriente y resistencia (sección 3.4), capacitancia y circuito RC (sección 3.5), Difracción (sección 3.6) y oscilaciones amortiguadas (sección 3.9). Además de su fácil implementación para trabajos prácticos de Laboratorio más elaborados como los correspondientes a Cuerpo negro y ley de Stephan–Boltzmann (sección 3.8) y de resonancia y patrones de Chladni (sección 3.7).

Destaca que el empleo y uso del microcontrolador PIC y el diseño del circuito propuesto (Figura 2) evidenció varias ventajas en su implementación: i) permitió rápida comunicación con la interfaz de usuario al emplear como canal de comunicación el puerto USB en lugar de los puertos serial-paralelo con el ordenador, ii) su versatilidad puesto que los registros de salida del PIC son tipo texto; pudiendo ser leídos y procesados por casi cualquier software de graficación sin requerir la programación interna del PIC y iii) su adaptabilidad y facilidad de implementación para diversas maquetas de experimentación en los laboratorios de física universitaria, al coleccionar simultáneamente el registro de dos o más sensores de diferentes características estímulo respuestas.

5. Referencias

- [1] Lyle D. Feisel and Albert J. Rosa. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. *Journal of Engineering Education*, 94(1):121–130, 2005.
- [2] Richard T. White. The link between the laboratory and learning. *International Journal of Science Education*, 18(7):761–774, 1996.
- [3] Olga Lucía Castiblanco and Diego Fabián Vizcaíno. La experiencia del laboratorio en la enseñanza de la física. *Revista Educación en Ingeniería*, 3(5):68–74, 2008.
- [4] Juan Carlos Cruz Ardila and Vanesa Espinosa Arroyave. Reflexiones sobre la didáctica en física desde los laboratorios y el uso de las TIC. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (35):105–127, 2012.
- [5] J. C. Cruz Ardila. Importancia de usar tecnología en el desarrollo de prácticas de laboratorio de física mecánica. *Revista Educación en Ingeniería*, (11):1–11, 2011.
- [6] S. Pinto, L. Silva, C. Tenório de Carvalho, and Ciro Jose Egoavil Montero. Pêndulo simples utilizando tecnologia embarcada de baixo custo aplicado ao ensino da física. *Latin American Journal of Science Education*, 2(1):1–6, 2015.
- [7] Leonardo Bohórquez, Sebastián Martínez, and Hugo Armando Gallego. Diseño y construcción de un prototipo autónomo para la práctica experimental de laboratorios de física. *Scientia et technica*, (52):155–164, 2012.
- [8] Yubiry González. Diseño de prototipos para la enseñanza de la acústica musical a través de patrones de Chladni. *Acta Científica Venezolana*, 66(3):128–133, 2015.

Characterization of the red mud calcined to different temperatures

Darwin López^{*,a} y C. Linares^b

^a*Departamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela*

^b*Departamento de Química, Facultad de Ciencia y Tecnología, Unidad de Síntesis de Materiales y Metales de Transición, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

Abstract.- No calcined red mud samples and calcined between 600 and 800 °C were characterized by techniques such as: X-ray diffraction (XRD), Fourier Transformed infrared spectroscopy (FT-IR), and diffuse reflectance of UV-visible (RD-vis) of the solid state. In addition, the color coordinate in CIEL*a*b space, and the particle size by using the Scherrer equation were determined. Results showed the decomposition of vaterite (CaCO_3) and the transformation of goethite to hematite at superior temperature higher at 600 °C. Moreover, few variations in the color coordinates of samples were observed for temperatures superior to 600 °C. The redness index maximum was determined at 600 °C. The crystal size was dramatically decreased with the calcination process, and then the crystal size was constant with the increment of calcination temperature. Obtained results could be used for uses futures of the red mud.

Keywords: red mud; calcination; characterization.

Caracterización del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas

Resumen.- Muestras de lodo rojo no calcinado y calcinado en el intervalo entre 600 y 800 °C fueron caracterizadas por las técnicas de difracción de rayos X (DRX), espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), y reflectancia difusa de UV-visible (RD-vis) del estado sólido. Adicionalmente, se determinaron las coordenadas de color en el espacio CIEL*a*b* y el tamaño de partícula, mediante la ecuación de Scherrer. Los resultados obtenidos indicaron la descomposición de la vaterita (CaCO_3) y la transformación de la goethita a hematita a temperaturas superiores de 600 °C. Adicionalmente, se observó poca variación en las coordenadas de color de la muestra por encima de la mencionada temperatura, obteniéndose el mayor índice de enrojecimiento a 600 °C. El tamaño promedio de cristal disminuyó considerablemente al calcinarlo; luego, el tamaño de cristal se mantiene constante con el aumento de la temperatura. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para usos futuros del lodo rojo.

Palabras claves: lodo rojo; calcinación; caracterización.

Recibido: septiembre 2017

Aceptado: marzo 2018

1. Introducción

El lodo rojo es el residuo generado durante la producción de alúmina (Al_2O_3) a partir de la bauxita. De acuerdo al proceso de producción se pueden tener diferentes tipos de éste, el Bayer, el sinterizado, y el que resulta de un proceso combinado. Por cada tonelada de Al_2O_3 se genera entre 0,8 y 1,5 toneladas de lodo rojo. Cada año, alrededor del mundo se descargan más de 50

millones de metros cúbicos de este residuo [1]. En Venezuela se tenía una producción acumulada de 14 millones de toneladas acumuladas entre los años 1983 y 2000 [2].

Los problemas asociados con la disposición de este material incluyen su alto pH (entre 12 y 13), la filtración de álcali en las aguas subterráneas, la seguridad en el almacenamiento, y el polvo alcalino suspendido en el aire que impacta sobre la vida de las plantas [3]. El accidente registrado en Ajka, Hungría (2010), donde el lodo rojo altamente alcalino inundó colinas y zonas agrícolas adyacentes, intensificó la necesidad de buscar alternativas para su uso compresivo en diversas actividades [4]. Entre ellos se pueden destacar, la recuperación de metales (Fe, Al, Ti,

* Autor para correspondencia:

Correo-e: delopez22@gmail.com (Darwin López)

V), en la producción de materiales de construcción (cemento, ladrillos, bloques de concreto aireado), material de relleno (plásticos, minería y base para vías), tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad de retener diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, y en el control de la contaminación (mejora de los suelos y tratamiento de efluentes gaseosos que contienen óxidos de azufre) [5].

Se han realizado diferentes estudios con el propósito de mejorar la comprensión sobre la utilización del lodo rojo, muchos de ellos empleando tratamiento térmico para observar su efecto sobre las propiedades físicas y químicas del residuo [1]. De la misma forma se han analizado en las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM): el diámetro promedio de partícula, la densidad y la resistencia del material [1].

La presente investigación tiene como propósito estudiar el efecto de la temperatura sobre las características colorimétricas de un lodo rojo venezolano y su tamaño de cristal, además se analizó su composición mediante las técnicas de DRX, FT-IR y RD-vis.

2. Materiales y métodos

Materiales. La muestra de lodo rojo utilizada es proveniente de la planta refinadora de alúmina CVG Bauxilum C.A., ubicada en Guayana, Venezuela, la cual fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico, del tipo casual o accidental. Se calcinó aproximadamente 1 g del residuo, a temperaturas de 600, 700 y 800 °C por tres horas. Los sólidos fueron extraídos de la mufla, y enfriados a temperatura ambiente.

Método experimental. La composición elemental del lodo rojo original se determinó mediante el método de fluorescencia de rayos X (XRF), empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva EDAX modelo 8400. El análisis de difracción de rayos X (DRX), se realizó mediante un difractómetro Phillips PW 3442 con una radiación de cobre $\text{CuK}\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$, en un intervalo de 5° a 80° (2 θ), con un paso

de 0,1°. El espectro obtenido se contrastó con la base de datos libre de información cristalográfica (COD, por sus siglas en inglés).

La presencia de grupos funcionales, que permiten tener una idea de algunos enlaces de los compuestos, se obtuvieron mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), utilizando un espectrofotómetro SHIMATZU FTIR-4800S, trabajando en un intervalo de barrido de 4000 a 400 cm^{-1} , la muestra sólida se diluyó en bromuro de potasio anhidro (KBr) para la formación de una fina pastilla.

Adicionalmente, se obtuvo el espectro de reflectancia difusa (RD) y las coordenadas en el espacio de color CIE 1976 ($L^*a^*b^*$), mediante un espectrofotómetro MiniScan XE Plus modelo N° D/8-S, utilizando un campo de visión de 10° (CIE 1964) y un iluminante D65 (correspondiente a la luz del día a 6500 K). La señal producida se registró en forma de reflectancia R cubriendo un intervalo entre 400 y 700 nm.

Finalmente, el espectro fue suavizado y parametrizado mediante la ecuación de Kubelka-Munk, para la posterior estimación de su segunda derivada (SD) respecto a la longitud de onda aplicando el algoritmo Savitzky-Golay. En la curva de la SD se identificaron los mínimos que corresponden a las transiciones electrónicas del hierro, en la capa 3d⁵. A partir de las coordenadas de color se determinó el índice de enrojecimiento del lodo rojo, mediante el cual se estimó el contenido de hematita en las muestras [6], según la siguiente ecuación (1).

$$R_{Lab} = \frac{a^* \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} 10^{10}}{b^* L^{*6}} \quad (1)$$

Donde:

R_{Lab} : índice de enrojecimiento, adim

L^* : luminosidad, adim

a^* : coordenada rojo/verde

b^* : coordenada amarillo/azul

El tamaño de cristal se estimó mediante la ecuación de Scherrer [7] (vea la ecuación (2)).

$$\beta = \frac{k\lambda}{FWHM(S) \cos(\theta)} \quad (2)$$

Donde:

β : tamaño promedio del cristal.

k : factor de forma del cristal, su valor es de 1,0.

λ : longitud de onda de la radiación utilizada (λ_{Cu}).

$FWHM(S)$: ancho a la altura media del pico de difracción de la muestra.

La calcinación a las temperaturas de 600, 700 y 800 °C, se realizó en una mufla Barnstead / Thermolyne 6000 con una rampa de calentamiento de 5 °C/min.

3. Resultados y discusión

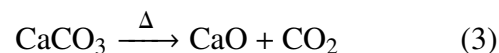
Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF). El lodo rojo bajo estudio, está compuesto de varios elementos entre los que resaltan silicio, calcio, manganeso, bismuto, cinc, estaño, aluminio e hierro (Tabla 1). Sin embargo, se esperaba una menor concentración de aluminio, ya que, este elemento es el extraído en la síntesis de alúmina [8], por lo que, el valor observado puede atribuirse a factores operativos durante la fase de extracción; el segundo elemento de mayor concentración es el hierro, seguido del silicio. Es importante resaltar que la composición del lodo rojo es dependiente de la fuente de bauxita usada [9], lo que a su vez influirá en el comportamiento de éste en los tratamientos posteriores.

Tabla 1: Composición elemental del lodo rojo proveniente de la industria CVG Bauxilum C.A..

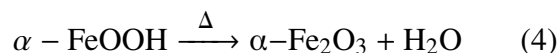
Elemento	Composición $\pm 0,001$ %
Aluminio (Al)	43,944
Hierro (Fe)	36,432
Silicio (Si)	13,111
Titanio (Ti)	3,315
Calcio (Ca)	2,480
Circonio (Zr)	0,281
Azufre (S)	0,199
Manganeso (Mn)	0,060
Cromo (Cr)	0,049
Bismuto (Bi)	0,031
Niobio (Nb)	0,025
Galio (Ga)	0,023
Estaño (Sn)	0,022
Cobre (Cu)	0,014
Cinc (Zn)	0,012

Difracción de rayos X (DRX). El análisis elemental y la caracterización de las fases del lodo rojo se ha reportado muchas veces [1, 8, 10]. No obstante, estos datos no son uniformes [1]. Entre las principales fases identificadas para el lodo rojo generado por CVG Bauxilum C.A (Figura 1), se encuentra la sílice SiO_2 (COD: 9013321), α -FeOOH goethita (COD: 9002158), α -Fe $_2$ O $_3$ hematita (COD: 9009782), gibbsita (COD: 1011081), anatasa (COD: 9008216), ilmenita (COD: 9010915), carbonato de calcio (COD: 9013565), cancrinita (COD: 9004054) y albita (COD: 9001634).

El pico ubicado a 26,63 presenta una intensidad apreciablemente significativa en la muestra original, debido a la presencia de diversas sustancias; una vez calcinada por encima de 600 °C, hay una disminución apreciable en su magnitud, lo que puede atribuirse a la descomposición de la vaterita ($CaCO_3$), de acuerdo a la ecuación (3).



La línea de difracción identificada a 68,28 se asociaba a la suma de las señales correspondientes a la anatasa, la cancrinita y la goethita presentes normalmente en el lodo rojo [8]; no obstante su ausencia a temperaturas superiores de 600 °C permite relacionarla únicamente a la goethita que se deshidrata a hematita (ecuación (4)), las dos primeras sustancias no tienden a descomponerse bajo esta condición.



Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR). El espectro obtenido (Figura 2), presenta una banda ancha en el intervalo entre 2700 cm^{-1} y 3700 cm^{-1} , que puede atribuirse a los diferentes grupos OH solapados, en especial aquellos asociados a los metales y al agua [11]; mientras que la mostrada a 1585 cm^{-1} se debería a las vibraciones de flexión de la molécula de agua [12]. Al calcinar la muestra, se observó que la primera banda disminuye al aumentar la temperatura de calcinación, y la segunda está ausente a temperaturas superiores de 600 °C, a

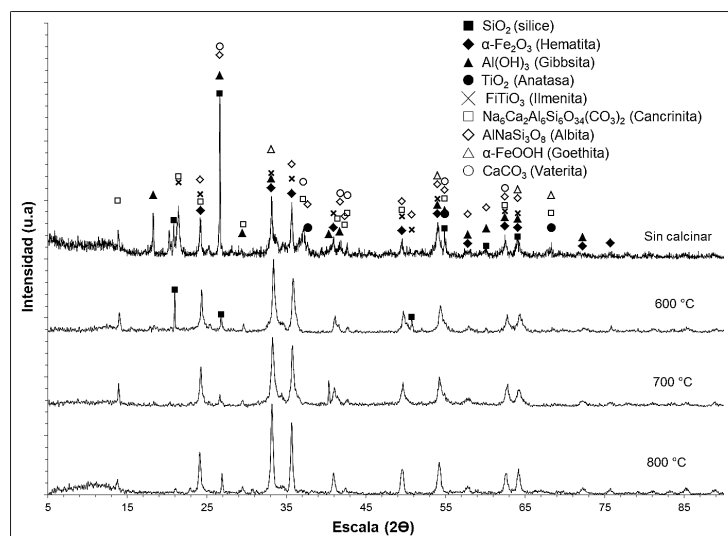


Figura 1: Patrón de DRX del lodo rojo sin calcinar y de las muestras calentadas a 600, 700 y 800 °C.

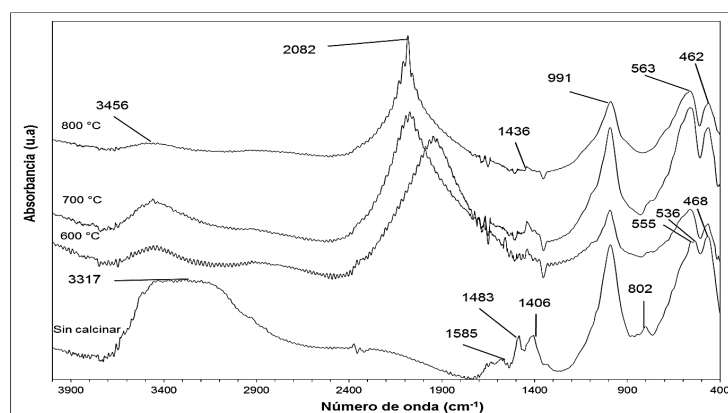


Figura 2: Espectro FT-IR del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

consecuencia de la pérdida de agua físicamente absorbida y aquella enlazada químicamente [1].

Las bandas observadas cerca de 1406 y 1483 cm^{-1} se deben a las vibraciones del ion carbonato (CO_3^{2-}) [13], su disminución a temperaturas superiores de 600 °C es atribuible a la pérdida de dióxido de carbono (CO_2), por la conversión del carbonato de calcio (CaCO_3) a óxido de calcio (CaO). Por otra parte, la cancrinita se descompone totalmente a temperaturas superiores de 949 °C [14], lo que justifica la existencia de la banda alrededor de 1436 cm^{-1} a la temperatura de 800 °C, asociada a las vibraciones del CO_3^{2-} presentes en dicha sustancia. En la región inferior a 1000 cm^{-1} , se observan bandas correspondientes a vibraciones de tensión de Si(Al)-O, posiblemente asociados a la cancrinita presente como fase mineralógica

detectada en el lodo rojo [11], así como también aquellas asociadas a los metales presentes en la muestra hierro (Fe) y calcio (Ca).

De acuerdo a Gotić [12], la goethita presenta vibraciones de flexión cerca de 802 cm^{-1} , y debido a su conversión a hematita cuando se sometió el lodo rojo a calcinación explica que no se observara en los respectivos espectros (por encima de 600 °C). Cornell [15] indican que la hematita presenta bandas en 345, 470 y 540 cm^{-1} las que corresponden a las observadas en 536 y 468 cm^{-1} . Finalmente, se puede notar que la banda situada en 555 cm^{-1} y solapada por las anteriores, se debe a las vibraciones de tensión de Al-O [16]. Sin embargo, por encima de 600 °C sólo se puede ver una banda a 462 cm^{-1} que se asocia a la hematita, y otra a 563 cm^{-1} que representa al enlace Al-O. Es importante

destacar que, la banda observada alrededor de 2082 cm^{-1} representa una interferencia del equipo de medición.

Espectroscopia de reflectancia difusa (RD). Al analizar las gráficas obtenidas (Figura 3), se puede observar que presenta un cambio de pendiente entre 500 y 600 nm, que es característico de sustancias con colores rojizos [17]. En el mismo orden de ideas, las mencionadas curvas presentan pocas variaciones al aumentar la temperatura de calcinación. Sin embargo, estas curvas, por si solas, brindan muy poca información sobre las características de la mezcla [18].

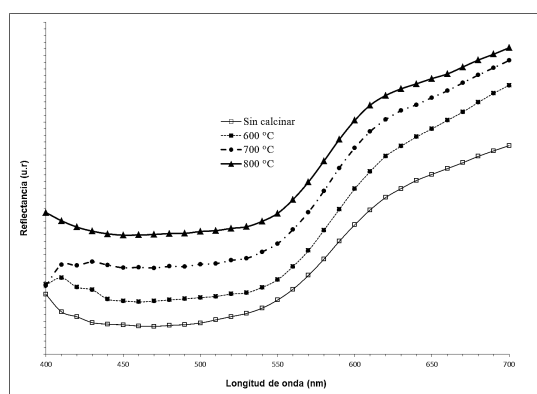


Figura 3: Espectro de reflectancia difusa (RD) para el lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

Posteriormente, una vez parametrizada la curva con la función de Kubelka – Munk y aplicada la segunda derivada respecto a la longitud de onda (Figura 4), se identificó un mínimo bastante pronunciado a ≈ 610 nm, el cual se puede asociar a la transición de pares electrónicos, $2(^6A_1) \rightarrow 2(^4T_1)$, en la hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) presente en la muestra; no obstante se observó un desplazamiento de ésta desde ≈ 529 nm, lo que podría deberse a la composición química del lodo rojo (Tabla 1), donde se identificaron diferentes metales como el manganeso y vanadio. Los mencionados elementos pueden sustituir al hierro en la estructura de la hematita influenciando la posición de las bandas [15].

Por otra parte, la banda observada a ≈ 490 nm para las muestras calcinadas a 600 °C y 700 °C, podría ser asignada a la transición electrónica, $^6A_{1g} \rightarrow ^4T_{1g}$ (4G) la cual es característica de

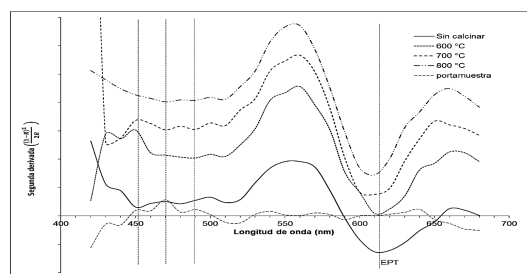


Figura 4: segunda derivada de la función de remisión para el lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

complejos octaédrica del manganeso (II) [19]. Finalmente, las observadas a ≈ 450 nm para la muestra sin calcinar y la de ≈ 470 nm para aquella obtenida 700 °C, se asignan a la transición $^6A_1 \rightarrow ^4E^4A_1$, en la hematita. Los mínimos restantes, se asociaron a la interferencia del portamuestra utilizado.

Caracterización colorimétrica. Las coordenadas de color para cada muestra, en el sistema CIEL*a*b* (Tabla 2), en general presentan valores similares a los valores reportados por Comell y Schwertmann [15], para la hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), lo que permite evidenciar el alto contenido de este óxido de hierro en el lodo rojo; adicionalmente se observó un incremento en los valores correspondiente al rojo (a^*) y amarillo (b^*) al calcinar la muestra a 600 °C; sin embargo al aumentar la temperatura no se presentó una correlación en la coordenada b^* . En el caso de a^* , se evidenció una ligera disminución. Mientras que, la luminosidad (L^*) presentó variaciones muy leves ($\approx 5\%$).

Para explicar este comportamiento, se pueden considerar los posibles cambios en la composición del lodo rojo al incrementarse la temperatura, el aumento inicial en el índice de enrojecimiento se justifica por la conversión de la goethita a hematita (II). Sin embargo, las descomposición de otras sales al aumentarse la temperatura, como es el caso de la gibsita [1] pudo contribuir en el incremento de la concentración de otras especies, como es el caso del manganeso (Mn) y el vanadio (V) las cuales presentan sus propias bandas, que llevan cambios de color hacia el verde [15]; en consecuencia el

valor de a^* disminuye, afectando de esta manera al índice de enrojecimiento (1). En este sentido, la mayor concentración de hematita corresponde a la muestra calcinada a 600 °C (Tabla 2).

Tabla 2: Coordenadas de color CIEL*a*b* e índice de enrojecimiento para el lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

Muestra	$L^* \pm 0,01$	$a^* \pm 0,01$	$b^* \pm 0,01$	$R_{ab} \times 10^{-3} \pm 0,03$
Sin calcinar	24,81	17,95	17,45	1,10
600 °C	23,55	22,04	19,74	1,94
700 °C	24,13	21,67	22,03	1,54
800 °C	23,49	21,26	20,86	1,81
Hematita	37	21,55	19,40	
(Estándar ⁺)	25 – 45	8,40 – 22,87	3,23 – 35,22	

⁺: Adaptado de Cornell [15].

Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación recomendada del valor promedio, los valores fueron transformados desde el espacio CIEL*C*H*.

Tamaño de cristal. El tamaño promedio de partícula estimado (Tabla 3), evidencia una disminución cuando la muestra se calcinó a 600 °C, esto se puede asociar a la descomposición de sustancias como el carbonato de calcio (CaCO_3), y a la pérdida de agua absorbida en los cristales (Figura 2). Una vez calcinada la muestra, no se observó un efecto significativo de la temperatura sobre esta variable, manteniéndose en el orden de los ≈ 20 nm.

Tabla 3: Tamaños de cristal estimados el lodo rojo a diferentes temperaturas de calcinación mediante el método de Scherrer.

Muestra	Tamaño de cristal ± 1 nm
Sin calcinar	71
600 °C	27
700 °C	22
800 °C	28

4. Conclusiones

Al calcinar la muestra de lodo rojo se observó la descomposición de la vaterita (CaCO_3) y la conversión de goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$); lo cual se evidenció mediante un incremento significativo del índice de enrojecimiento del lodo rojo. De la misma forma hubo un cambio significativo en las coordenadas de color y en el tamaño de cristal. Sin embargo, una vez calcinada la muestra, por encima de 600 °C no se observó una variación significativa en las mencionadas propiedades. Estos resultados pueden ser utilizados en estudios futuros que pretendan explorar las aplicaciones del lodo rojo en catálisis, síntesis de pigmentos, materiales de construcción, entre otros.

5. Referencias

- [1] Chuan-sheng Wu and Dong-yan Liu. Mineral phase and physical properties of red mud calcined at different temperatures. *Journal of Nanomaterials*, 2012:1–6, 2012.
- [2] Ricardo Alfredo Galarraga, Rodrigo R. Carneiro, Robert E. Keane, and Giao Nguyen. CVG-bauxilum red mud neutralization. In *Light Metals-Warrendale-Proceedings*, pages 133–140. TMS, 2002.
- [3] Pascale Vachon, Rajeshwar D. Tyagi, Jean Christian Auclair, and Kevin J. Wilkinson. Chemical and biological leaching of aluminum from red mud. *Environmental science & technology*, 28(1):26–30, 1994.
- [4] S. Ruyters, J. Mertens, E. Vassilieva, B. Dehandschutter, A. Poffijn, and E. Smolders. The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil. *Environmental Science & Technology*, 45(4):1616–1622, 2011.
- [5] Harekrushna Sutar, Subash Chandra Mishra, Santosh Kumar Sahoo, Ananta Prasad chakraverty, and Himanshu Sekhar Maharana1. Progress of red mud utilization: An overview. *American Chemical Science Journal*, 4(3):255–279, 2014.
- [6] Vidal Barrón and Jose Torrent. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *European Journal of Soil Science*, 37(4):499–510, 1986.
- [7] Ma. Luisa Ramón García. *Determinación del tamaño de cristal utilizando el software Jade 6.5*. Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- [8] Velásquez Rincones Alejandra José. Efecto de las condiciones de predesilicación y digestión sobre el nivel

de sílice usando bauxita los Pijiguaos durante el proceso Bayer en CVG-Bauxilum. Trabajo Especial de Grado, Departamento de Química, Escuela de Ciencias, Núcleo de Sucre, Universidad de Oriente, Venezuela, 2008.

- [9] Edilson Marques Magalhães, Emanuel Negrão Macedo, Danielly Da Silva Quaresma, Jose Antonio da Silva Souza, and João Nazareno Nonato Quaresma. Extraction of iron oxide and concentration of titanium compounds in red mud. In *EPD Congress 2012*, pages 345–352. Wiley Online Library, 2012.
- [10] Yan-Na Zhang and Zhi-Hua Pan. Characterization of red mud thermally treated at different temperatures. *Journal of Jinan University (Science and Technology)*, (4):293–297, 2005.
- [11] Wentao Liang. Characterisation and reuse of solid wastes. Master's Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2014.
- [12] Marijan Gotić and Svetozar Musić. Mössbauer, FT-IR and FE SEM investigation of iron oxides precipitated from FeSO_4 solutions. *Journal of Molecular Structure*, 834-836:445 – 453, 2007. MOLECULAR SPECTROSCOPY AND MOLECULAR STRUCTURE 2006.
- [13] Alexander Becker, Ulrich Bismayer, Matthias Eppel, Helge Fabritius, Bernd Hasse, Jianmin Shi, and Andreas Ziegler. Structural characterisation of X-ray amorphous calcium carbonate (ACC) in sternal deposits of the crustacea *Porcellio scaber*. *Dalton Transactions*, pages 551–555, 2003.
- [14] I. Hassan. The thermal behavior of cancrinite. *The Canadian Mineralogist*, 34:893–900, 1996.
- [15] R. M. Cornell and Udo Schwertmann. *The Iron oxides : structure, properties, reactions, occurrences, and uses*. Wiley-VCH, 2 edition, 2003.
- [16] Christian Ignacio Morgan Villela. Síntesis, desarrollo y optimización de un catalizador para la producción verde de biodiesel. Tesis de Maestría, Escuela Superior de Química y Ciencias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México, 2011.
- [17] CIE. Colorimetry. Technical report, International Commission on Illumination, 2004. 3rd Edition.
- [18] J. Torrent and V. Barrón. Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides. In Arthur T. Hubbard, editor, *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, pages 1438–1446. Marcel Dekker, 2002.
- [19] Marie-Louise Gerwien, HeLga Hartwig, Uwe NohL, Hans-Jurgen Richter-Ditten, PauL VeLic, and RudoLf Warncke. *Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry*. Springer-Verlag, 8th edition, 1983.

Fire effect on the tensile resistance of slabs steel reinforcement

Angel Bepin^a, Nerio Pérez^a, Edson Martínez^{*,b} y Salvador Scola^c

^aEscuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bLaboratorio de Materiales y Ensayos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^cInstituto Autónomo Municipal Cuerpo de Bomberos de Valencia, Valencia, Venezuela.

Abstract.- This paper resume the results of the evaluation of the slabs steel reinforcement performance under the fire action, with the variation of the bar recoverment, studying the positive reinforcement steel tensile resistance. 9 slabs models were elaborated with 50cm × 70cm × 20cm dimensions, with 1, 3 y 5 centimeters of concrete recoverment ; additionally 6 steel bars were tested, 3 of them were directly exposed to fire, and the rest were non fire exposed and were used like a model reference to compare the obtained tensile resistance. Every slabs were exposed to fire for 60 minutes, heated over a 400°C temperature, after that the steel bars were extracted and tested. The results showed an excellent performance of the concrete like an isolating material, because all of the tested bars showed a similar stress-deformation diagram.

Keywords: steel reinforcement; slab; fire exposition; tensile resistance.

Efecto del fuego sobre la resistencia a tracción del acero de refuerzo en losas

Resumen.- En el presente trabajo se evaluó el comportamiento del acero de refuerzo en losas nervadas bajo la acción del fuego, variando el espesor del recubrimiento, estudiando la resistencia a tracción del acero de refuerzo positivo. Se construyeron 9 modelos de losas nervadas de dimensión 50cm × 70cm × 20cm variando el espesor de recubrimiento en 1, 3 y 5 centímetros; adicionalmente se ensayaron 6 probetas de acero 3 de ellas se sometidas a fuego de forma directa, mientras las otras 3 se dejaron de patrón con el fin de establecer comparaciones en la resistencia a tracción. Todas las losas se sometieron a fuego constante durante 60 min a una temperatura mayor a 400°C para luego extraer el acero de refuerzo y ensayarlas a tracción. Los resultados arrojaron un excelente comportamiento del concreto como aislante, ya que se obtuvieron diagramas de esfuerzo-deformación similares entre todas las probetas ensayadas.

Palabras claves: acero de refuerzo; losa; exposición al fuego; resistencia a la tensión.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: abril 2018

1. Introducción

Los incendios pueden producir efectos no deseados en las características de los elementos tanto estructurales como no estructurales de las edificaciones de concreto armado, ya que se ven afectadas sus principales características físico- mecánicas bajo la acción de las elevadas temperaturas. De acuerdo a Vidaud [1] “Por lo general, las construcciones se proyectan y construyen de modo tal que en caso de producirse

un incendio, la capacidad resistente de la estructura se mantiene durante un periodo determinado.”

Las teorías de diseño de estructuras de concreto se fundamentan entre sus hipótesis en la adherencia existente entre el acero de refuerzo y el concreto que lo rodea; sin embargo esto puede verse afectado durante la exposición al fuego así como otros aspectos importantes que puedan comprometer el buen desempeño estructural, tales como modificación de las características mecánicas del concreto y el acero, pérdida significativa del espesor del recubrimiento del concreto, desarrollo de esfuerzos por deformaciones impuestas y por diferenciales térmicos, destrucción de juntas y sellados, entre otros.

Dentro de las estructuras de concreto uno de los elementos más vulnerables durante la

* Autor para correspondencia:

Correo-e:edsontmartinez@gmail.com (Edson Martínez)

ocurrencia de un incendio lo constituyen las losas, particularmente las nervadas, ya que en este tipo de losas el volumen de concreto es menor, por lo que existe menos aislamiento ignifugo y por consiguiente mayor riesgo de afectación al acero de refuerzo, el cual puede verse afectado si no se cumplen los requerimientos mínimos de recubrimiento de concreto, o si se genera el desprendimiento del mismo durante el incendio.

La característica principal del acero de refuerzo la constituye la resistencia a la tracción, siendo de suma importancia estudiar su comportamiento bajo cualquier tipo de acción que pudiera afectarla. En este trabajo se evaluó la resistencia a tracción de probetas de acero de refuerzo de losa nervada tradicional, con diferentes valores de recubrimiento al ser expuestas al fuego, simulando un incendio real.

2. Desarrollo de la investigación

Esta investigación se puede clasificar como experimental, ya que la metodología utilizada consiste en experimentos y ensayos sobre una muestra determinada ampliando la información que existe sobre el efecto del fuego sobre barras de acero de refuerzo en losas nervadas.

Muestra

Con respecto a la muestra de cabillas a ser evaluadas, se decidió elaborar nueve modelos de losas nervadas con dimensiones que simulan la franja de diseño de estos elementos, cumpliendo con los requerimientos establecidos en el capítulo 8 de la Norma Venezolana 1753-2006 [2], cuya sección transversal se muestra en la Figura 1

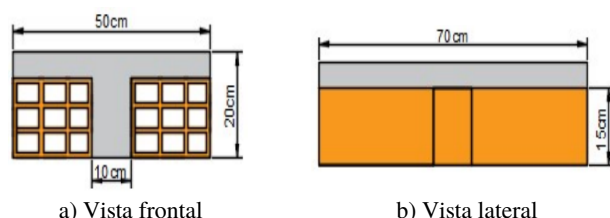


Figura 1: Vista frontal y lateral de los especímenes evaluados.

Las losas fueron reforzadas con acero longitudinal positivo consistente en una cabilla de 1/2" de

diámetro, fabricada en la Republica Dominicana, y el concreto utilizado se diseñó para una resistencia cilíndrica $f'_c : 250 \text{ Kg/cm}^2$, elaborado con agregados provenientes del sector El Playón de la población de Barbacoas, al sur del estado Aragua.

Se usaron tres valores de espesor de recubrimiento del acero inferior, a saber $e=1\text{cm}$, 3cm , 5cm , para lo cual se elaboraron 3 losas por cada valor de recubrimiento., identificadas de la siguiente manera: 1 A, 1 B, 1 C; 3 A, 3 B, 3 C; 5 A, 5 B, 5C. Cada una de las losas fue sometida a la acción del fuego, para luego extraer las probetas de acero de 60 cm de longitud que sumadas a tres probetas sin exposición (A,B y C) y tres probetas expuestas directamente sin ningún tipo de protección (AQ, BQ y CQ), constituyen la muestra de estudio, es decir quince (15) probetas de acero que fueron evaluadas a tracción pura en el Laboratorio de Materiales y Ensayos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma COVENIN 299-1989 [3].

Construcción de los modelos

Tal como se expuso con anterioridad, para simular de una mejor manera las losas nervadas, se construyeron modelos que asemeja la franja de diseño de este tipo de elementos, (ver Figura 2), utilizando para tal fin encofrado de madera, bloque de arcilla y cabilla estriada. Por otro lado se colocaron láminas de anime para facilitar la separación entre franjas, una vez fraguado el concreto.

Una vez colocados los bloques y el acero de refuerzo correspondiente con separadores que garantizaran el espesor de recubrimiento definido se procedió a vaciar la mezcla de concreto, enrasando a una altura predeterminada de cinco centímetros de espesor de loseta. Se desencofraron luego de 24 horas y se dispusieron en un lugar protegidas de la intemperie, hasta cumplir la edad de 28 días de vaciado.

Selección del tiempo de exposición

A la edad de 28 días, se procedió a realizar los ensayos en el Campo de Prueba de la Estación



Figura 2: Construcción de modelos de losas.

Central del Cuerpo de Bomberos de Valencia. El ensayo consistió en la exposición de los modelos de losa a fuego directo fuego, por un lapso de tiempo de 60 minutos para cada ensayo, este tiempo fue seleccionado de acuerdo a lo establecido en el documento Seguridad frente al fuego de estructuras de hormigón de Vega y Buron [4]. De acuerdo a estos autores, para 60 minutos la temperatura alcanzada para un recubrimiento de 3 cms se estima en 370°C, mientras que para temperaturas de 400°C se estima en 15 % la pérdida de resistencia del acero de refuerzo.

3. Desarrollo experimental

Caracterización de agregados

Los ensayos para determinar la calidad de los agregados, así como los parámetros necesarios para realizar el diseño de mezclas a utilizar, se rigieron bajo la normativa correspondiente a cada ensayo, establecidas en el Manual para la realización de prácticas de laboratorio en la asignatura “Materiales y Ensayos” de la carrera de Ingeniería civil en la Universidad de Carabobo elaborado por Lugo, S. [5].

Ensayo de exposición al fuego

El ensayo de exposición al fuego se llevó a cabo utilizando uno de los simuladores ubicados en el campo de prueba del Cuartel General de los Bomberos de Valencia, estado Carabobo,

alimentado por gas metano. Una vez separada cada franja de losa, se procedió a colocarla sobre apoyos de concreto, simulando un elemento simplemente apoyado, colocado a un lateral del simulador, cerca de la boca de salida del gas, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3: Colocación de modelos en simulador de incendio.

Se utilizó una presión de treinta (30) psi, para luego inducir la llama haciendo uso de una chispa externa, (Ver Figura 4), posterior al momento de que la llama actuara de forma envolvente sobre la probeta se registró el tiempo establecido mediante la utilización de un cronómetro. Por otro lado para estimar la temperatura alcanzada por el elemento, se utilizó un termómetro digital de láser, midiendo temperatura en el concreto antes e inmediatamente después de los 60 minutos de exposición.



Figura 4: Ensayo de exposición al fuego de losas.

Luego de haber realizado cada ensayo, se procedió a la extracción cuidadosa de la cabilla, para luego llevar a cabo el ensayo de determinación de la resistencia a tracción. Este proceso se llevó a

cabo de forma manual con cuidado de no golpear el acero durante su extracción.

Ensayo para la determinación de la resistencia a la tracción del acero

Las probetas de acero extraídas de las losas sometidas al fuego, así como las probetas expuestas directamente al fuego y las barras no expuestas fueron ensayadas en la máquina de tracción universal, de acuerdo al procedimiento establecido en la norma COVENIN 299-89 Materiales metálicos ensayo a tracción, con el fin de tener un patrón de comportamiento del material a la hora de establecer las comparaciones. Con los datos obtenidos se elaboraron las gráficas esfuerzo deformación, así como la comparación de los esfuerzos y porcentajes de alargamiento evidenciados por cada una de las barras.

4. Análisis y discusión de resultados

En la siguiente grafica se muestran las envolventes correspondientes a las curvas esfuerzo deformación de las probetas ensayadas a tracción, agrupadas en muestras de 3 probetas por espesor de recubrimiento, pudiéndose observar el mismo patrón de comportamiento independientemente de la condición de recubrimiento, mientras que las probetas expuestas directamente al fuego presentaron una marcada modificación en sus propiedades traduciéndose en menor módulo de elasticidad, menor esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo y una reducción considerable de la tenacidad.

Tabla 1: Porcentajes de variación del esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia con respecto a las probetas PA, PB y PC (muestras patrones).

Probetas	F_{su} (Kg/cm ²)	F_y (Kg/cm ²)	% variación F_{su}	% variación F_y
PA-PB-PC	7696,75	4933,33		
P1A-P1B-P1C	7736,22	4983,33	0,51	1,01
P3A-P3B-P3C	7736,22	4955,00	0,51	0,44
P5A-P5B-P5C	7696,75	4983,33	0,00	1,01

En la Tabla 1 se presentan los valores promedios obtenidos para los esfuerzos máximos y de fluencia, observándose que las probetas expuestas directamente al fuego (PAQ,PBQ y PCQ) presentaron una disminución de 14,19 % del esfuerzo máximo y de un 6,96 % del esfuerzo de fluencia con respecto a la muestra patrón (probetas PA,PB y PC). Por otro lado las probetas embutidas en las losas no sufrieron ninguna variación significativa en dichas propiedades mecánicas.

Así mismo la norma COVENIN 316:2000 [6] en su sección 8.2.1.5.1. establece que el esfuerzo de fluencia real no debe exceder al esfuerzo de fluencia nominal es más de un 30 %, donde cada una de las probetas ensayadas cumplieron con el artículo. Por otra parte desde el punto de vista de la relación entre el Esfuerzo máximo real ($f_{su} *$) y el Limite fluencia real ($f_y *$), todas las barras presentaron valores mayores a la indicada por la Norma 316-2000 en su artículo 8.2.1.5.2. para este tipo de acero, ya que establece que el valor de esa relación debe ser mayor a 1,25.

Otra característica estudiada correspondió al porcentaje de alargamiento, el cual se muestra en la Tabla 2 para cada una de las barras ensayadas. Estos resultados evidencian que las probetas PB, P1A, P3A y P5B cumplen con el porcentaje mínimo de alargamiento del 12 % referido en la Norma COVENIN 316:2000, para una longitud entre marcas de 200 mm incluyendo la zona de estricción; mientras que el Reglamento técnico dominicano RTD 458 [7] establece un porcentaje mínimo de alargamiento entre 20 marcas incluyendo la estricción de la barra de 9 %, no aceptado para las barras PAQ y PCQ.

5. Conclusiones

El diagrama esfuerzo-deformación obtenido para el acero evaluado difiere del diagrama típico para un acero S-60, identificación rotulada en las cabillas. Al realizar el ensayo los diagramas reflejan el comportamiento de un acero especial y no de un acero ordinario debido a que los diagrama esfuerzo deformación no presentaron un escalón de relajamiento, además de presentar valores más altos en cuanto sus esfuerzos alcanzados.

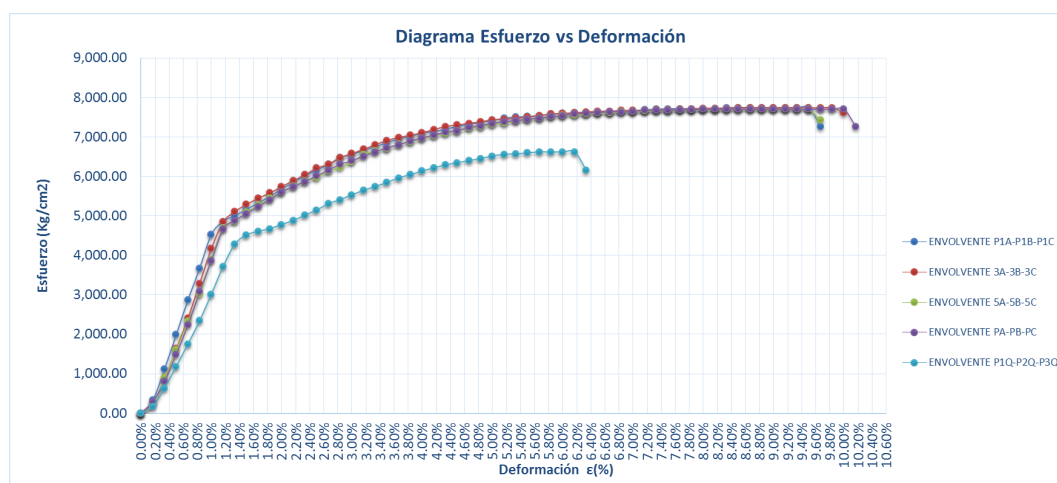


Figura 5: Curvas esfuerzo-deformación de probetas ensayadas.

Tabla 2: Porcentajes de alargamiento de cada uno de las probetas.

Probeta	L_o (cm)	L_f (cm)	$\epsilon\%$
PA	20,00	21,90	9,50
PB	20,00	22,60	13,00
PC	20,00	21,50	7,50
P1A	20,00	22,50	12,50
P1B	20,00	21,70	8,50
P1C	20,00	22,30	11,50
P3A	20,00	22,50	12,50
P3B	20,00	22,30	11,50
P3C	NULO	NULO	NULO
P5A	20,00	21,20	6,00
P5B	20,00	22,40	12,00
P5C	20,00	22,00	10,00
PAQ	20,00	21,40	7,00
PBQ	20,00	21,80	9,00
PCQ	20,00	21,70	8,50

Como resultado del ensayo de resistencia a la tracción de las probetas extraídas de las losas sometidas al fuego, se evidencio un comportamiento muy similar al de las barras no expuestas, por otro lado en las probetas expuestas al fuego directamente se pudo apreciar un cambio notable en el diagrama esfuerzo-deformación en comparación con las barras usadas como refuerzo, observándose una caída en la curva característica de este tipo de acero.

Por ultimo de acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que el concreto actuó como un excelente aislante térmico protegiendo al acero

de refuerzo de las losas nervadas, ya que una vez realizados los diagramas esfuerzo-deformación y calculados sus propiedades mecánicas más importantes no se apreció ninguna modificación con respecto a las probetas que no fueron sometidas al fuego.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2017.

6. Referencias

- [1] I. Vidaud and E. Vidaud. La acción del fuego sobre las estructuras de concreto. *Construcción y tecnología en concreto*, (5), Agosto 2011.
- [2] FONDONORMA 1753-2006, Proyecto y construcción de obras en concreto estructural. Fondo Norma, 2006.
- [3] COVENIN 299-89, Materiales metálicos. Ensayo de tracción. COVENIN, 1989.
- [4] Luis Vega Catalán and Manuel Burón Maestro. Seguridad frente al fuego de las estructuras de hormigón. *Cemento Hormigón*, (899):44–51, 2007.
- [5] Sandra M. Lugo L. Manual para la realización de prácticas de laboratorio en la asignatura ‘Materiales y Ensayos’ para la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad de Carabobo. Trabajo de Ascenso, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2006.
- [6] COVENIN 316:2000, Norma venezolana. Barras y rollos de acero con resaltes para uso como refuerzo estructural. COVENIN, 2000.

- [7] Reglamento Técnico Dominicano RTD 458. Materiales de construcción–barra de acero corrugadas y lisas para el refuerzo del hormigón–especificaciones. DIGENOR, 2012.

Evaluation of the mechanical behavior of an AISI 1045 steel subjected to thermal treatments

Francisco Bolaños^a, José Caicedo^a, Carlos Alfonzo^{*,b}, Anahi Santeliz^b y Argel Porrello^b

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bCentro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- The purpose of this investigation is to evaluate the mechanical torsional behavior of AISI 1045 steel in the delivery state (cold drawn) and with annealing thermal treatments at 860°C and standardized at 915°C. Tensile, torsion and hardness tests were applied to the material in the three mentioned conditions, in the tensile tests, the stress-strain curves were obtained and in the torsion test the shear stress-angular deformation curves were determined tensile and torsional mechanics (creep stress, maximum stress, breaking stress, etc.), as well as the respective hardness in each case. It was evidenced that the mechanical properties of the material were affected by the thermal treatments, obtaining the highest values of mechanical resistance to the cut for the material in delivery condition. The relationships obtained in the torsion and traction tests were determined, these were compared with the von Mises-Hencky and Tresca failure criteria.

Keywords: torsion test; cutting effort; AISI 1045 steel.

Evaluación del comportamiento mecánico de un acero AISI 1045 sometido a tratamientos térmicos

Resumen.- El propósito de esta investigación consiste en la evaluación del comportamiento mecánico a torsión del acero AISI 1045 en estado de entrega (trefilado en frío) y con tratamientos térmicos de recocido a 860°C y normalizado a 915°C. Se aplicaron ensayos de tracción, torsión y dureza al material en las tres condiciones mencionadas, en los ensayos de tracción se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación y en el ensayo de torsión las curvas de esfuerzo de corte-deformación angular, se determinaron las propiedades mecánicas a tracción y torsión (esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de rotura, etc.), así como la dureza respectiva en cada caso. Se evidenció que las propiedades mecánicas del material fueron afectadas por los tratamientos térmicos, obteniéndose los mayores valores de resistencia mecánica al corte para el material en condición de entrega, y en el comportamiento a torsión, se observó la presencia de mesetas de fluencia solo en las condiciones de tratamientos térmicos de normalizado y recocido. Se determinaron las relaciones obtenidas en los ensayos de torsión y tracción, estos se compararon con los criterios de falla de Von Mises-Hencky y Tresca.

Palabras claves: ensayo de torsión; esfuerzo de corte; acero AISI 1045.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: abril 2018

1. Introducción

En la actualidad, el desarrollo de la tecnología, combinado con el estudio detallado del efecto de diferentes metales adicionales en la aleación Hierro-Carbono, ha dado paso a una gama de aceros bastante amplia presente en la mayoría de los catálogos de venta nacionales e internacionales,

en los cuales se encuentran desde aceros de bajo carbono hasta aceros inoxidables, entre otros. [1] A pesar de la gran cantidad de aceros disponibles en el mercado y la documentación detallada que ofrecen los proveedores en sus catálogos de venta, gran cantidad de ellos proporcionan esta información basados solamente en datos teóricos, para verificar estos datos de manera precisa es necesario realizar ensayos. Una alta cantidad de los diversos aceros, aun poseen propiedades desconocidas a nivel experimental para ciertas condiciones de fabricación y ensayo. Uno de los casos que posee pocas referencias bibliográficas directas en revistas tecnológicas, libros de texto

* Autor para correspondencia:

Correo-e:calfonzo@uc.edu.ve (C. Alfonzo)

y catálogos de venta es la evaluación de las propiedades mecánicas en ensayos a torsión del acero AISI 1045. Esto representa un aspecto de suma importancia en la consideración de este material en el diseño y elaboración de piezas de vehículos y maquinarias, como lo son ejes, árboles de levas, chavetas y partes expuestas al desgaste por fricción en general, donde están siempre presentes estados de esfuerzos triaxiales que deben considerarse, como también los efectos de diversos momentos torsores que tendrán que soportar dichos elementos sin presentar fallas [2].

La finalidad de esta investigación es verificar y documentar el comportamiento mecánico del acero AISI 1045 sometido a torsión, tracción y pruebas de dureza en diferentes condiciones: entrega, tratamiento térmico de recocido y tratamiento térmico de normalizado.

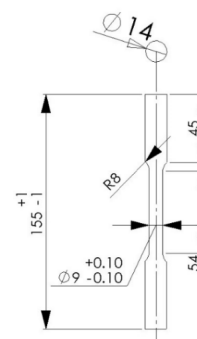
2. Metodología

2.1. Material

Para el presente trabajo se utilizó un acero AISI 1045 en forma de barras cilíndricas de 1 pulg. de diámetro y 6 metros de longitud elaboradas por medio de un proceso de trefilado en frío. En el caso de las probetas necesarias para los ensayos de tracción, fueron elaboradas con las dimensiones especificadas por las normas ASTM A370 y ASTM E8M-04 [3]. Por otra parte, las probetas para los ensayos de torsión a realizar fueron fabricadas bajo las regulaciones establecidas por la norma COVENIN 907-1997 [4], como lo son el diámetro de la probeta y su longitud. Sin embargo, específicamente la longitud, está limitada por las medidas de la máquina para ensayos de torsión a utilizar.

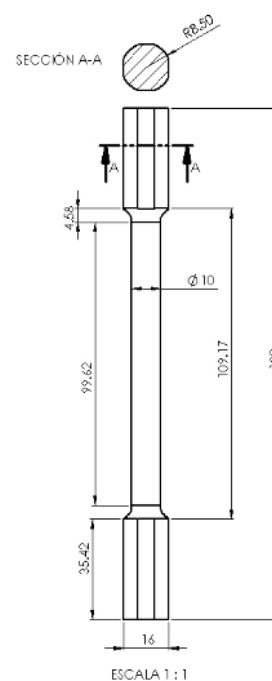
En cada condición de estudio, se ensayaron cinco (5) probetas a tracción, seis (6) probetas a torsión y para ensayo de dureza dos (2) probetas. Teniéndose un total de treinta y nueve (39) probetas, cuyas dimensiones se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

Además, las probetas necesarias para los ensayos de dureza fueron elaboradas partiendo de barras del mismo diámetro (1 pulg.) que las utilizadas para las probetas de los ensayos de tracción y torsión, siguiendo las especificaciones de la norma



Medidas en milímetros.

Figura 1: Dimensiones de probeta de acuerdo a la norma ASTM E8M-04 [3].



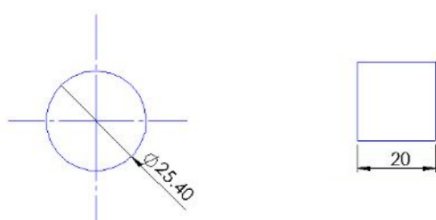
Medidas en milímetros.

Figura 2: Dimensiones de probeta para ensayo de torsión.

ASTM E18-02 [5], la cual establece los métodos y lineamientos para ensayos de dureza Rockwell en materiales metálicos.

2.2. Aplicación de tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos aplicados en esta investigación son los de recocido y normalizado, los cuales fueron aplicados a todas las probetas respectivamente empleando el horno del Laborato-



Medidas en milímetros.

Figura 3: Dimensiones de probeta para ensayo de dureza, todas las medidas en mm.

rio de Materiales de la Universidad de Carabobo, marca Thermolyne, modelo FURNACE 48000.

2.2.1. Recocido

El tratamiento térmico de recocido en las probetas de tracción, torsión y dureza, fueron sometidas a una temperatura de 860 °C, durante un tiempo de 28 minutos, para luego dejarse enfriar por completo en el interior del horno, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM, E18-02 [5].

2.2.2. Normalizado

Para aplicar el tratamiento térmico de normalizado en las probetas de tracción, torsión y dureza, se calentaron a una temperatura de 915 °C durante un tiempo de 28 minutos, para luego ser extraídas del horno y dejar que se enfríen al aire tranquilo hasta temperatura ambiente, aproximadamente 25°C.

2.3. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción para esta investigación fueron realizados utilizando la maquina universal para ensayos de tracción marca METROCOM Engineering S.P.A., la cual se encuentra en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación del Instituto Universitario Tecnológico de Puerto Cabello. Las probetas ensayadas tienen las dimensiones mostradas en la Figura 1, según la norma ASTM A370 para la realización de ensayos de tracción en materiales metálicos.

2.4. Ensayo de torsión

Para la realización del ensayo se sometieron seis probetas por cada condición de tratamiento térmico incluyendo también la condición de entrega del material, este número de ensayos se implementó

para reducir lo más posible cualquier error en los resultados. Fueron ensayadas empleando la máquina para ensayos de torsión marca RIEHLE, presente en el Laboratorio de Resistencia de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José De Sucre”, Barquisimeto. A cada probeta (Figura 2) se le aplicó un par torsor alrededor de su eje longitudinal hasta llegar a su punto de ruptura, dicho par fue aplicado a cada probeta a través de la mordaza giratoria, el cual actúa en conjunto con la mordaza fija de la máquina para generar un estado de esfuerzos cortantes sobre las probetas.

2.5. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza fue realizado según la norma ASTM E18-02 [5] la cual regula los ensayos de dureza Rockwell y dureza superficial en materiales metálicos, además se establecen parámetros tales como los tipos de indentadores a utilizar según la escala, La carga a ser utilizada, las tolerancias dimensionales en la fabricación de los indentadores y las desviaciones permitidas en el ensayo, entre otros aspectos.

En las probetas de dureza descritas anteriormente (Figura 3.) se empleó un durómetro digital marca Buehler presente en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. La dureza se midió en la escala Rockwell B, con su correspondiente carga de 100 kg y un indentador tipo esfera de acero de 1/16pulg. de diámetro.

En cada condición de estudio se estudiaron dos muestras en las cuales se realizaron cinco mediciones.

2.6. Relación entre las propiedades a tracción y torsión

Una vez obtenidas todas las propiedades mecánicas a tracción y a torsión de cada una de las condiciones del material en estudio, se procedió a determinar la relación que existe entre dichos valores para así compararla con la relación teórica de los criterios de fluencia según Tresca (teoría del esfuerzo cortante máximo) y Von Mises-Hencky (teoría de la energía de distorsión). Los criterios de fluencia se deben aplicar a cualquier sistema de

esfuerzos. En donde se involucran los tres esfuerzos principales en un estado de esfuerzo simple (ensayo uniaxial) y a un ensayo de torsión.

En el caso del estado de esfuerzos correspondiente al ensayo de tracción, el sistema de esfuerzos es un esfuerzo uniaxial puro y, es conocido que la fluencia tiene lugar para el valor Y . De este modo: $\sigma_1 = Y$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, al comienzo de la deformación plástica. Entonces, el criterio de Von-Mises [6] resulta:

$$6GA = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

En el caso del sistema de esfuerzos correspondiente al ensayo de torsión, la fluencia tiene lugar a un valor que usualmente se representa por k . Entonces, al comenzar la deformación plástica en un ensayo de torsión: $\sigma_1 = +k$, $\sigma_2 = 0$ y $\sigma_3 = -k$. De modo que, del criterio de Von Mises resulta:

$$6GA = k^2 + k^2 + 4k^2$$

Los valores de A deben ser iguales, ya que, A es una constante y el criterio tiene validez general. Esto implica que, de acuerdo con Von-Mises:

$$2Y^2 = 6k^2; 2k = \frac{2}{\sqrt{3}}Y = 1,155Y \quad (1)$$

Si ahora se aplica a estos dos sistemas de esfuerzos (tracción y torsión) el criterio de Tresca [6], se obtienen resultados ligeramente diferentes. En la torsión pura la fluencia aparece cuando:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2}(k + k) = k$$

Y en tracción pura:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{Y}{2}; \sigma_1 - \sigma_3 = Y$$

Por tanto, de acuerdo con Tresca:

$$2k = Y$$

Usando la relación de Von-Mises entre Y y k ecuación (1), se tiene:

$$S = 2k = 1,155Y$$

3. Resultados y discusión

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de material mediante espectroscopia de emisión óptica (OES): Carbono(%) = 0,477, Manganeso(%) = 0,70, Fosforo(%) = 0,007, Azufre(%) = 0,025, Silicio(%) = 0,135, Cromo(%) = 0,058, Níquel(%) = 0,123, Molibdeno(%) = 0,020, cobre(%) = 0,164.

3.1. Ensayos de tracción

Se establece una comparación entre los valores típicos encontrados en referencias bibliográficas y los resultados experimentales obtenidos. Es necesario observar las diferencias entre las propiedades mecánicas a tracción del acero en sus distintas condiciones, para así analizar los efectos de cada tratamiento térmico aplicado en el material. Las curvas de esfuerzo – deformación ingenieril para cada condición se muestran en la Figura 4.

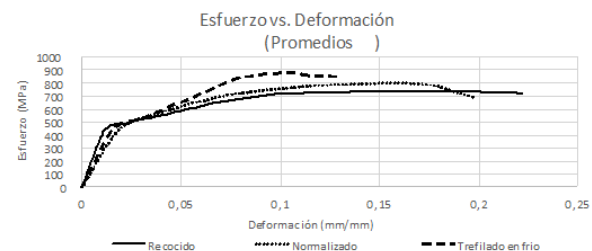


Figura 4: Gráficas de esfuerzo-deformación ingenieril (promedios) para cada condición del acero AISI 1045 ensayado.

Las curvas de la Figura 4 denotan un comportamiento en la zona elástica bastante similar del material en su condición de entrega (trefilado en frío) y en las condiciones de tratamiento térmico de normalizado y recocido. Se observa que las probetas con tratamiento térmico de normalizado presentaron esfuerzos máximos mayores a las probetas con tratamiento térmico de recocido. Además, el acero en su condición de entrega (trefilado en frío), muestra esfuerzos máximos mayores a las condiciones de los tratamientos térmicos aplicados, así como una considerable menor ductilidad, lo que refleja el gran efecto que tiene el trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del material.

Tabla 1: Valores de dureza típicos y experimentales promedio obtenidos para el acero AISI 1045 en sus tres (03) condiciones.

Propiedad	Condición de entrega (Trefilado en frío)	Material con tratamiento térmico de normalizado	Material con tratamiento térmico de recocido
Valor Experimental (HRB)	92,6 ($\sigma = 1,46$)	94,3 ($\sigma = 1,25$)	75,5 ($\sigma = 2,25$)
Valor Experimental (HB)	198 ($\sigma = 7,89$)	207 ($\sigma = 6,98$)	138 ($\sigma = 5,77$)
Valor típico [7] (HB)	179	179	170

σ : Desviación estándar.

Uno de los aspectos más notables al analizar la Figura 4, es que el área bajo las curvas para las probetas con tratamientos térmicos es mayor a la del material trefilado en frío, esto indica que los tratamientos térmicos aumentan notablemente la tenacidad del material, siendo este en efecto la capacidad para soportar esfuerzos superiores al esfuerzo de fluencia, sin que se produzca su fractura.

El aumento en la tenacidad es una de las causas del incremento de la ductilidad, que pasa de un 9 % de alargamiento a la ruptura en la condición de entrega (trefilado en frío) a un 17 % en las probetas tratadas térmicamente.

3.2. Ensayos de Dureza

Una forma de medir la resistencia de un material a la deformación plástica es con el ensayo de dureza. Para la aleación de acero estudiada se llevó a cabo este ensayo en cinco (5) ocasiones por cada probeta en cada condición del material, en la escala Rockwell B.

Debido a que los valores típicos de dureza encontrados en las referencias bibliográficas se encuentran como dureza Brinell, estos resultados experimentales deben ser convertidos a dicha escala, empleando la tabla de conversiones presentes en la norma ASTM E-140 Tablas de conversión de durezas normales para metales, con el fin de comparar estos valores a una misma escala. La Tabla 1 muestra los valores promedios de dureza obtenidos mediante los ensayos y los valores típicos para cada condición del material.

La Figura 5 presenta los valores promedios experimentales de dureza para cada condición en un gráfico de columnas.

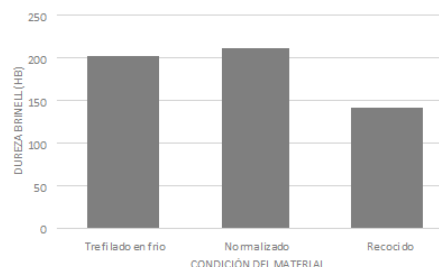


Figura 5: Gráfico de resultados promedios de dureza Brinell para cada condición de estudio del acero AISI 1045.

La Figura 5 indica que el material con tratamiento térmico de normalizado presenta la dureza de mayor magnitud, sin embargo, este solo posee una diferencia ligera con respecto al resultado de la probeta en su condición original que representa un 4,11 % y con respecto al material con tratamiento térmico de recocido posee una diferencia de 33,17 %. Estos tratamientos térmicos se realizan con la finalidad de disminuir la resistencia del material a la deformación, aumentando así su ductilidad, a pesar de esto anteriormente mencionado cabe destacar que respecto a la propiedad de dureza, el acero AISI 1045 no presenta una varianza significativa entre los valores de las condiciones de trefilado en frío y con tratamiento térmico de normalizado, mientras que la dureza para el caso del tratamiento de recocido si disminuyó significativamente.

3.3. Ensayos de torsión

Al realizar los ensayos de torsión se conocieron los valores de las propiedades mecánicas del material en estudio para cada una de las condiciones antes mencionadas; estas propiedades

Tabla 2: Propiedades mecánicas (promedios) a torsión para cada condición del material.

Propiedad	Condición de estudio del material		
	Trefilado en frío (Entrega)	Normalizado	Recocido
Coefficiente de endurecimiento por deformación (n)	0,0319 ($\sigma = 0,013$)	0,1554 ($\sigma = 0,016$)	0,2461 ($\sigma = 0,003$)
Coefficiente de correlación (R^2)	0,8345 ($\sigma = 0,037$)	0,9410 ($\sigma = 0,008$)	0,9683 ($\sigma = 0,004$)
Módulo de corte G (GPa)	29,26 ($\sigma = 2,52$)	20,65 ($\sigma = 3,39$)	13,99 ($\sigma = 0,12$)
Esfuerzo de fluencia (τ_y) (MPa)	495,06 ($\sigma = 29,39$)	355,12 ($\sigma = 44,034$)	252,62 ($\sigma = 4,68$)
Esfuerzo último (τ_{max}) (MPa)	675,51 ($\sigma = 8,99$)	664,36 ($\sigma = 9,308$)	592,38 ($\sigma = 12,79$)
Deformación angular a la rotura (γ_{max}) (rad/rad)	0,28 ($\sigma = 0,02$)	0,78 ($\sigma = 0,07$)	0,77 ($\sigma = 0,04$)

σ : Desviación estándar

definen el comportamiento del material tanto elástica como plásticamente cuando es sometido a esfuerzos mecánicos de corte (Ver Figura 6).

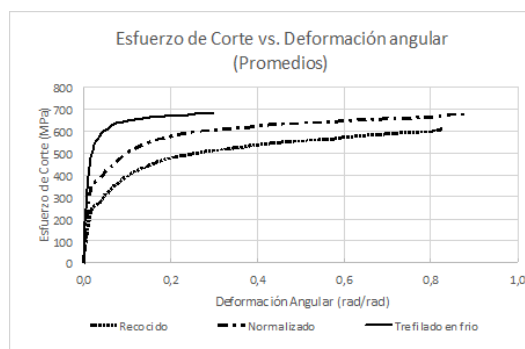


Figura 6: Curvas del ensayo de torsión para el acero AISI 1045 en cada condición del material.

En el ensayo de torsión a medida que aumenta el esfuerzo de corte aplicado al material, aumenta la deformación angular, esto se debe a la respuesta que genera el material al aplicársele las condiciones de carga variable creciente, almacenando dicha energía aplicada mediante la deformación. Las curvas presentan en su inicio una zona lineal, esta zona representa la región elástica del material, la cual establece que la deformación unitaria es directamente proporcional al esfuerzo aplicado.

Posterior a la zona elástica, en el caso de las condiciones de normalizado y recocido se genera la llamada meseta de fluencia, la cual indica la región

donde el material fluye deformándose sin aumento de la carga y donde inicia el comportamiento plástico del mismo, en el caso de las probetas del material en estado de entrega (trefilado en frío) no se presenta esta meseta debido a que el material se encuentra endurecido por deformación debido a su proceso de fabricación, por ende esto evita la aparición de la meseta de fluencia [8]. Finalmente, se tiene que en la zona plástica es necesario aplicar mayor carga para deformar el material a medida que este se deforma, este comportamiento se debe a que la deformación genera dislocaciones dentro del material, lo que se refleja en un endurecimiento del mismo [9].

En la Tabla 2 se muestran de igual forma los valores comparativos (promedios) de las propiedades mecánicas a torsión del material en cada una de sus condiciones.

Para el caso del coeficiente de endurecimiento por deformación se obtuvo que el valor más alto es para el caso del recocido, seguidamente de las probetas en condición de normalizado y para finalizar el valor más bajo se obtiene para las probetas trefiladas en frío (estado de entrega); la razón por la cual el coeficiente de endurecimiento por deformación en el caso de la condición de entrega es el menor se debe a que este material ya posee un endurecimiento por deformación causado por el proceso de fabricación

al que fue sometido, generando que la densidad de dislocaciones internas del material aumente, lo que hace más difícil deformar el material, es decir, se genera un aumento de la resistencia mecánica, de igual forma esto también aumenta la fragilidad y disminuye la tenacidad del material.

En el caso de las probetas con tratamientos térmicos de recocido y de normalizado, se tiene que las probetas de recocido poseen un mayor coeficiente de endurecimiento por deformación, lo que indica su mayor capacidad para deformarse y endurecerse, propio de una estructura más estable y ordenada a consecuencia de su enfriamiento muy lento, mientras que las probetas con tratamientos térmicos de normalizado, debido a su mayor velocidad de enfriamiento, se produce una estructura menos estable, que debe generar una microestructura con menos ferrita y mas perlita en el material, aumentando su dureza y disminuyendo su capacidad de deformación, en comparación a la condición de recocido.

La propiedad de esfuerzo de fluencia al corte tiene un valor máximo para la condición de trefilado en frio, seguido por el valor de la condición de normalizado y finalmente la condición de recocido; en el caso de trefilado en frio, presenta los mayores valores de resistencia mecánica, lo cual es ocasionado por el trabajo en frio previo que posee; en el caso de la condición de normalizado, esta posee un mayor esfuerzo de fluencia que la condición de recocido, lo que corresponde con la explicación del enfriamiento y microestructura señalada en el párrafo anterior.

Caso similar ocurre en el caso del esfuerzo último cortante, teniendo el menor valor para la condición de recocido, aumentando para la condición de normalizado y trefilado, siendo ligeramente mayor para la condición de trefilado en frio respecto al tratamiento de normalizado.

El valor de la deformación angular a la rotura en el caso de la condición de trefilado en frio es el más bajo de las tres condiciones, y es similar en ambas condiciones de tratamiento térmico, esto coincide con el comportamiento de la ductilidad obtenida a tracción, lo que confirma lo mencionado anteriormente, el endurecimiento que posee el material en la condición de entrega aumenta su

dificultad para deformarse (disminución de la ductilidad). Entre las condiciones de tratamiento térmico de normalizado y recocido esta propiedad no se ve afectada, es decir se mantiene.

Para finalizar, en cuanto al comportamiento mecánico a torsión, en el caso del módulo de corte se tiene que este presenta un valor más elevado en el caso de la condición de trefilado en frio, seguido del normalizado y por último la condición de recocido, En la Figura 6, se observa, la zona elástica de las tres condiciones y se aprecia la misma pendiente, igualmente con esfuerzos de tracción se observa este comportamiento en la Figura 4, aunado a esto, se conoce que en esta zona solo ocurre el estiramiento de los enlaces entre los átomos, por lo que sucede solo deformación elástica. En las tres condiciones de estudio, la microestructura debe estar formada por las mismas fases pero en cantidades ligeramente distintas, debido a que estos tratamientos no cambian el tipo de fase presente, es de esperarse que el tipo de enlace sea el mismo, lo que hace pensar que el comportamiento observado en cuanto al módulo de corte no debería variar, por todo lo anteriormente expuesto, no son concluyentes estos resultados, por lo que se sugiere confirmar con otros estudios.

3.4. *Relaciones entre las propiedades obtenidas de los ensayos de tracción y torsión*

Al aplicar las relaciones entre el esfuerzo de fluencia obtenido en el ensayo de tracción y el esfuerzo de fluencia obtenido a partir del ensayo de torsión se puede observar que dichas relaciones se mantuvieron aproximadamente constantes y con una dispersión entre estos valores de alrededor de un 14 %. Al comparar estos resultados con los respectivos criterios de falla de Von Mises-Hencky y Tresca se puede determinar los errores obtenidos referentes a cada criterio tal como se muestra en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se puede observar en general que para todas las condiciones en estudio bien sea trefilado en frio, normalizado o recocido, se obtienen valores más aproximados a las relaciones teóricas de fluencia cuando se aplica el criterio de Von Mises que al aplicar el criterio de Tresca, ya que la desviación con respecto a lo que indica la

Tabla 3: Errores obtenidos al aplicar las relaciones teóricas de los criterios de fluencia.

Error	Estado		
	Trefilado frio	en	Normalizado
Von Mises	44,95 %		21,80 %
Tresca	52,33 %		32,27 %
			6,15 %
			7,50 %

teoría de Von Mises resulto menor en todos los casos que las desviaciones obtenidas al aplicar el criterio de Tresca.

4. Conclusiones

Las propiedades mecánicas a tracción y a torsión en el acero AISI 1045 varían según el tratamiento térmico aplicado.

El esfuerzo máximo a tracción y de ruptura disminuyen significativamente al aplicar tratamientos térmicos de normalizado y recocido, en tanto que la ductilidad y tenacidad aumentan significativamente respecto a la condición de trefilado en frío.

La dureza del material con estado de trefilado en frío, no varía al aplicarse un tratamiento térmico de normalizado, sin embargo, disminuye un 20 % al aplicar un tratamiento térmico de recocido.

El coeficiente de endurecimiento por deformación a torsión presenta un aumento para la condición de normalizado de hasta 5 veces al valor del material en condición de entrega, igual en el caso de recocido donde hay un aumento de hasta 8 veces este valor.

En condición de trefilado en frío el esfuerzo de fluencia cortante disminuye un 28 % al aplicar un tratamiento térmico de normalizado y disminuye un 48 % al aplicar un tratamiento térmico de recocido. El comportamiento a torsión del AISI 1045 trefilado en frío no presenta mesetas de fluencia, mientras que con los tratamientos térmicos de normalizado y recocido sí.

El esfuerzo cortante máximo no varía con el tratamiento térmico de normalizado, sin embargo, disminuye un 11 % con el tratamiento térmico de recocido.

La relación entre el esfuerzo de fluencia a tracción del material y su esfuerzo de fluencia a corte fueron relativamente similares a los criterios de fluencia de Von Mises y Tresca, generando errores máximos de 43,46 % en el caso de Von Mises y de hasta 51,04 % en el caso de Tresca, ambos para la condición de Entrega.

Recomendaciones

Promover las investigaciones sobre el comportamiento mecánico y micro estructural de otros materiales (metálicos y no metálicos).

Realizar el estudio avanzado de esta misma aleación (acero AISI 1045) con distintos tratamientos térmicos y a distintas temperaturas, para así generar una mayor base de datos sobre este ensayo y analizar como varían sus propiedades mecánicas según el tipo de material y las condiciones aplicadas.

Promover el diseño de una máquina para realizar ensayos de torsión con capacidad para ensayar metales poco dúctiles, que permitan realizar estudios dentro de torsión a metales duros dentro del laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo.

Realizar ensayos de torsión en una máquina que posea elementos de medición adecuada en la zona elástica, es decir con galgas extensiométricas que permitan realizar mediciones más exactas en esta zona y así poder determinar la influencia de los tratamientos térmicos en el estudio sobre el módulo de corte.

5. Referencias

- [1] Donald R Askeland and Pradeep P Phulé. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Thomson,, 4^{ta} edition, 2004.
- [2] Luis Gómez and Andrés González. Evaluación del comportamiento mecánico a torsión de un acero de bajo carbono tratado térmicamente. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2010.
- [3] ASTM E8M-04(2004), Standard test methods for tension testing of metallic materials [metric] (withdrawn 2008), 2004.
- [4] VICSON, BRIVENSA, and IVES. COVENIN 907:1997, Alambres de acero. Método de ensayo de torsión simple. (2^{da} Revisión). COVENIN, 1997.

- [5] ASTM E18 - 02(2002), Standard test methods for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials, 2002.
- [6] Sandra Bivieska Cabello Sequera. Tópicos sobre conformado de metales. Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, Venezuela, 2009.
- [7] ASM International Handbook Committee. *ASM Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, volume 1. ASM International, 1990.
- [8] Gennifer Aparicio, Heber D'Armas, and Marco Ciaccia. Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *Revista Ingeniería UC*, 14(1):57–63, 2007.
- [9] W. Smith. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw-Hill, 1998.

Design of a high availability cluster for a university virtual educational environment

Herney Perafan^a, Nazareth Guia^a, Demetrio Rey^b y David Duarte^{*,c}

^aEscuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

^bInstituto de Matemática y Computo Avanzado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

^cDirección de Tecnologías de Información y Comunicación, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

Abstract.- The present research focuses on presenting the design of a high availability cluster, under the linux CentOS 7 free distribution software platform, for the Virtual Classroom Environment of the Faculty of Engineering of the University of Carabobo, with the purpose of preventing eventual losses of time and resources, which are suffering in the present. This goal was achieved by adding redundancy to the Virtual Classroom server, creating a mirror of the main server, that manages the same information which is kept constantly updated. From this way, if for any reason the main server ceases to provide the service, the mirror server takes control of the requests, thus granting the goal of the high availability. The design was carried out using virtual machines to its subsequent implementation in test nodes in the University of Carabobo.

Keywords: availability; servers; virtual; cluster; linux.

Diseño de un cluster de alta disponibilidad para un entorno educativo virtual universitario

Resumen.- La presente investigación se enfoca en presentar el diseño de un clúster de alta disponibilidad, bajo la plataforma de software de distribución gratuita, linux CentOS 7, para el Ambiente del Aula Virtual de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, con el objetivo de prevenir eventuales pérdidas de tiempo y recursos, que están sufriendo en la actualidad. Este objetivo se logró al agregar redundancia al servidor de Aula Virtual, creando un espejo del servidor principal, que administra la misma información y, así, se mantiene constantemente actualizada. De esta manera, si por alguna razón el servidor principal deja de proporcionar el servicio, el servidor espejo toma el control de las solicitudes, lo que garantiza el objetivo de la alta disponibilidad. El diseño se llevó a cabo utilizando máquinas virtuales para su posterior implementación en nodos de prueba en la Universidad de Carabobo.

Palabras claves: disponibilidad; cluster; servidores; linux.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: abril 2018

1. Introducción

La necesidad de dar respuesta efectiva a la demanda de servicios web de manera continua se incrementa constantemente con la migración de múltiples tareas y servicios a entornos virtuales, siendo delegados a aplicaciones capaces de atender las peticiones de los clientes y devolverles una respuesta en concordancia a su solicitud [1]. Dichas aplicaciones «no están pensadas para ser instaladas

en el computador del cliente, sino que se coloca en un servidor al que acceden los mismos. De este modo se convierte en un servicio que está disponible desde cualquier punto del planeta por medio del uso del Internet»

El autor [2] indica que como todos los sistemas, un servidor web puede presentar fallas, ya sean temporales o prolongadas que perjudiquen el acceso al medio, ocasionadas por infinidad de factores inesperados como fallas en el hardware, anomalías ambientales, fallas de potencia, una caída por recalentamiento, una ruptura lógica o física en las conexiones de red, rupturas de seguridad catastróficas o fallas en el sistema operativo, aplicaciones y middleware. Los sistemas

* Autor para correspondencia:

Correo-e:deduarte1@uc.edu.ve (David Duarte)

de alta disponibilidad permiten a las aplicaciones seguir operando a pesar que el hardware o software falle, atendiendo las peticiones de los usuarios.

Un clúster, según autor [3], es un conjunto de computadores pertenecientes a una misma red, que se comportan como una única computadora de alta velocidad, permitiendo aumentar el número de tareas que puede realizar un computador común. Cada ordenador conectado a la red se denomina nodo. La existencia de más de un nodo disponible para brindar un mismo servicio ininterrumpido otorga al clúster la virtud de la alta disponibilidad, garantizando que las aplicaciones estén en línea cuando el cliente lo requiera. En caso de producirse alguna falla de software o hardware en un nodo, otro puede tomar el control de manera imperceptible para el usuario, y el servicio seguirá disponible.

Por otro lado, en octubre del 2014, en la Universidad Nacional Experimental del Táchira se llevó a cabo el diseño de un clúster para dar alta disponibilidad a la gran cantidad de aplicaciones web existentes en la casa de estudios y mejorar su rendimiento, mediante arquitecturas redundantes y tolerantes a fallas [4].

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo desde el año 2005, cuenta con un entorno virtual denominado Aula Virtual de Ingeniería, para dar acceso tanto a profesores como a alumnos, a recursos compartidos de las materias impartidas, como contenido programático, calificaciones, tareas pendientes y mensajes privados, facilitando y dinamizando la comunicación entre estos. El Aula Virtual de Ingeniería actualmente se encuentra funcionando a través de un único servidor, ubicado en el Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA) en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo [5]. Por medio de una entrevista realizada al Licenciado Luis DeSousa, profesor del Departamento de Química de la Dirección de Estudios Básicos de la Facultad de Ingeniería, quien es el encargado directo del control y mantenimiento del servidor del Aula Virtual de Ingeniería, se pudo conocer el estado actual del mismo, el cual es constantemente afectado por imprevistos como cortes eléctricos o fallas de hardware, que imposibilitan temporalmente el

acceso a los recursos a profesores y alumnos al no contar con un sistema preventivo que permita mantener la prestación del servicio, ocasionando retrasos en las asignaciones y avance del curso e incomodidades, además de repercutir en costos, tiempos, esfuerzos y en la confianza e insatisfacción de la población de la Facultad de Ingeniería en general. «La disponibilidad promedio del servicio ha sido de un 40 % en los últimos dos periodos lectivos» (Entrevista personal con el Profesor Luis De Sousa), habiendo permanecido totalmente fuera de servicio durante todo un mes de los periodos evaluados. En busca de solventar los inconvenientes mencionados, se propone un proyecto de investigación, que abarque el diseño e implementación de un clúster de alta disponibilidad bajo el sistema operativo de código abierto Centos 7, basado en la distribución de Red Hat Enterprise Linux. La clusterización del Aula Virtual de Ingeniería garantizará la permanencia del servicio web a los usuarios, aún cuando el nodo principal deje de funcionar, pues existirá un nodo secundario donde se replicarán los datos ingresados al nodo principal de manera instantánea. Como consecuencia, si el nodo principal falla el nodo secundario tomará el control de los recursos y el servicio se mantendrá disponible.

2. Metas de la Investigación

Bajo la presente investigación, se pretende diseñar un clúster de alta disponibilidad bajo la plataforma de software de distribución libre, para el Aula Virtual de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. En el esquema a utilizar, como primer paso debemos diagnosticar las condiciones actuales del servicio que presta el Aula Virtual de Ingeniería para conocer el nivel de disponibilidad existente, ya que se tiene conocimiento de las diversas dificultades de disponibilidad que esta tiene. Luego vamos a definir la topología de alta disponibilidad adecuada para proporcionar constante accesibilidad al Aula Virtual de Ingeniería, mediante el uso de un prototipo virtual de un cluster sobre la plataforma de distribución libre de linux CentOS 7, utilizando dos nodos. Por último vamos a ejecutar pruebas pilotos del

diseño de cluster de alta disponibilidad en la red de la Universidad de Carabobo para demostrar su operatividad, evaluando así el desempeño del cluster una vez implementado en la red.

3. Conceptualización

3.1. Cluster

El término cluster proviene del inglés y tiene diversos sentidos según distintos autores, aunque todos se relacionan entre sí.

La definición más extendida y conocida del término clúster en general es la de Michael Porter, llamándolo una herramienta de competitividad basada en la cooperación de sus miembros [6].

En el ámbito de la informática, un cluster representa un conjunto de computadoras independientes, interconectadas entre sí, que actúan como una sola computadora.

Como consecuencia se logra aumentar el rendimiento, al trabajar varios equipos juntos y sumar sus potenciales.

3.1.1. Tipos de clúster según la necesidad.

Balanceo de Cargas. Cuando se presta un servicio a un gran número de clientes, puede llegar un momento en el cual un nodo primario se sature debido al número de peticiones a las que se encuentra respondiendo simultáneamente. Un clúster de balanceo de carga se compone de dos o más servidores que trabajan en conjunto mediante la división de tareas, donde los llamados nodos maestros reciben la petición y la envían a un nodo denominado esclavo para que la ejecute. La elección del nodo esclavo que ejecutará la tarea se realiza evaluando cual de estos se encuentra ocioso o con un menor número de tareas por llevar a cabo, evitando de esta manera que algún nodo se sature.

3.1.2. Alto Rendimiento

La finalidad de un clúster de alto rendimiento viene dada por el aumento de la capacidad de procesamiento al utilizar los nodos para ejecutar cálculos simultáneos. Así, es posible mejorar el rendimiento en problemas que necesiten de una gran cantidad de potencia computacional [7].

3.1.3. Alta Disponibilidad

Finalmente, los clúster de alta disponibilidad se encargan de proveer los servicios de manera ininterrumpida al cliente, independientemente de las fallas que puedan ocurrir en el sistema. El principio de la alta disponibilidad es la redundancia, pues al existir más de un nodo redundante (que maneja la misma data que el primario) es posible, en caso de ocurrir alguna falla en el nodo primario, trasladar el servicio desde el nodo de cluster erróneo a otro nodo completamente funcional y de esta manera continuar prestando el servicio. Este procedimiento ocurre de manera imperceptible para el usuario. Generalmente, los servicios en los cluster de alta disponibilidad leen y escriben datos a través de la lectura y escritura a un sistema de archivos montado. Así, un cluster de alta disponibilidad debe mantener la integridad de los datos cuando un nodo recibe el control del servicio desde otro nodo [7]. Debido a que el presente trabajo de grado está basado en la implementación de un cluster de alta disponibilidad, se debe profundizar algunos conceptos y fundamentos relacionados a este tipo de clústeres.

3.2. Sistema de Alta Disponibilidad

Los sistemas de alta disponibilidad están formados por componentes de hardware y software que integrados y configurados para trabajar en conjunto, proporcionan el acceso continuo a los datos y aplicaciones.

3.2.1. Componentes de Software

Sistema Operativo. El sistema operativo representa el principal programa que se ejecuta en toda computadora, pues es el software básico que provee una interfaz entre el resto de los programas del computador y el usuario, siendo además el único programa capaz de interactuar con el hardware. Sus funciones primarias son:

-Administración de recursos: Un sistema de cómputo puede tener a su disposición una gran cantidad de recursos (memoria, espacio de almacenamiento, tiempo de procesamiento, etc.), y los diferentes procesos que se ejecuten en él compiten por ellos. Al gestionar toda la asignación de recursos, el sistema operativo puede

implementar políticas que los asignen de forma efectiva y acorde a las necesidades establecidas para dicho sistema [8].

-Aislamiento: En un sistema multiusuario y multitarea cada proceso y cada usuario no tendrá que preocuparse por otros que estén usando el mismo sistema. Idealmente, su experiencia será la misma que si el sistema estuviera exclusivamente dedicado a su atención (aunque fuera un sistema menos poderoso). Para implementar correctamente las funciones de aislamiento hace falta que el sistema operativo utilice hardware específico para dicha protección [8].

Servidor web Apache. El servidor web se encarga de atender a las solicitudes de los clientes y dar una respuesta en concordancia. Dichas peticiones son realizadas mediante un navegador que maneja el protocolo de hipertexto, mejor conocido como HTTP. El protocolo HTTP está diseñado para la transferencia de páginas web o páginas en código HTML, que incluyen figuras, textos complejos con enlaces, botones y objetos incrustados como animaciones. El servidor HTTP Apache es un servidor web de código abierto, es decir de software libre desarrollado por la ASF para plataformas UNIX, Windows, Macintosh y otras. Apache presenta entre sus características la estabilidad, capacidad de extensión y multiplataforma. Se considera estable debido a su probada robustez que impide cambios inesperados en el servidor, la disposición de una gran cantidad de módulos que permiten ampliar sus funciones lo hacen extensible [9]. Cuenta con una estructura modular, que permite emplear diversos lenguajes en el lado del servidor, como PHP, Python o Perl, así como incorporar características como la compresión de datos, las conexiones seguras y la utilización de URLs amigables lo que lo ha catalogado como el servidor más utilizado desde el año 2009, según la compañía inglesa Netcraft [10].

Servidor de Bases de Datos. Las bases de datos permiten coleccionar datos interrelacionados que se encuentran almacenados en un entorno informático. En estos entornos, los datos son persistentes, lo que significa que se mantienen sin ser afectados por problemas inesperados de

software o hardware (excepto casos graves de bloqueos de disco). Tanto el gran volumen de datos y la persistencia, dos características principales de las bases de datos, están en contraste con la información manipulada por los lenguajes de programación, que es lo suficientemente pequeño en volumen para residir en la memoria principal y que desaparece una vez finalizado el programa [10]. Una base de datos puede verse como uno o varios archivos almacenados en algún dispositivo de memoria, como un disco. Aunque sería posible realizar aplicaciones que accedan directamente a estos archivos, tal arquitectura generaría problemas relacionados con la seguridad, la concurrencia y la complejidad de la manipulación de datos. Entre la base de datos física y los usuarios del sistema, hay una capa de software conocida como servidor de base de datos o más comúnmente como sistema gestor de base de datos (SGBD). El SGBD se encarga de procesar las solicitudes de acceso a la base de datos, como manipulación, eliminación o consulta de datos pertenecientes a una base de datos organizada en uno o varios ficheros. En este sentido, una de las principales funciones del gestor de bases de datos consiste en ocultar a los usuarios de la base de datos los detalles a nivel de hardware, proporcionando así, una independencia total de la implementación de los datos y de la plataforma hardware sobre la que éstos se apoyan. Todo SGBD dispone de algún mecanismo para manipular la información de la base de datos normalmente basado en algún lenguaje de consulta de alto nivel. El Lenguaje de Consulta Estructurado (Structured Query Language, SQL) es un lenguaje declarativo de acceso a bases de datos relacionales que permite especificar diversos tipos de operaciones sobre las mismas [10].

Sistema de Archivos. Al trabajar con un sistema redundante dónde es importante controlar cómo se almacenan y recuperan los datos en caso de producirse alguna falla en el servidor, se debe utilizar un sistema de archivos. Se conoce como un sistema de archivos a todos los métodos y estructuras de datos utilizadas por el sistema operativo para inspeccionar la organización de los archivos almacenados en un disco o partición [11].

Mediante el sistema de archivos se hace posible aislar e identificar la información almacenada, en grupos de datos que son denominados archivos. Existen distintos tipos de sistemas de archivos, diseñados con características como velocidad, flexibilidad, tamaño, seguridad o aplicaciones diferentes.

3.2.2. Componentes de hardware.

Nodos. Se da el nombre de nodo a un componente que forma parte de una red. Un cluster representa una red compuesta por computadores y por lo tanto, cada computador que integra el cluster recibe el nombre de nodo [12].

Procesador. Uno de los componentes de hardware más importantes para implementar un cluster de alta disponibilidad es el procesador, de quien dependerá la velocidad de ejecución de cada una de las instrucciones a realizar para llevar a cabo las tareas asignadas por el sistema [13].

Disco. En el sistema redundante planteado, se utilizará una partición de disco en cada nodo para realizar la replicación y sincronización de datos. Además, es necesario disponer de un sistema de almacenamiento que permita conservar toda la información presente en el sistema, luego de reiniciar o apagar el computador. De esta importante labor se encarga el disco duro.

Red. La red de interconexión entre los nodos es la que permite que puedan comunicarse y trabajar como un solo sistema. Además, proporciona el acceso remoto al cluster y a sus servicios.

Originalmente, fue posible crear clusters linux debido a la disponibilidad de tecnología de red de bajo costo y ancho de banda moderado. Ethernet fue el protocolo por excelencia utilizado en los inicios de los cluster, pero en la actualidad existe una gran variedad de tecnologías de alta velocidad que pueden ser utilizadas para construir clusters linux como Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, Myrinet, InfiniBand, SCI, etc. Sin embargo, la relación costo-rendimiento de Fast-Ethernet proporciona la mejor opción para implementar la red de un cluster. Otra razón para seleccionar esta topología de red es la facilidad para proporcionar

escalabilidad a la hora de agregar nuevos nodos al cluster [14].

4. Procedimientos

4.1. Diagnóstico de las condiciones actuales

Para obtener un diagnóstico acerca de la calidad del servicio prestado por el servidor del Aula Virtual de Ingeniería, se acudió a los usuarios para conocer su percepción del servicio actual, recolectando los datos mediante encuestas. Además, fue necesario entrevistar al personal encargado del mantenimiento del servidor para conocer las fallas comunes del sistema y sus causas.

4.2. Estudio de los elementos que integran el cluster de alta disponibilidad

En esta fase se inició el estudio teórico del diseño de un cluster de alta disponibilidad, mediante la revisión de bibliografías especializadas en clusterización bajo software libre como la plataforma de Red Hat Enterprise de linux. También se determinó la topología más conveniente a utilizar.

4.3. Investigación y documentación

Se llevó a cabo un compendio con toda la documentación de contenido útil acerca del diseño y configuración de un cluster de alta disponibilidad y del sistema operativo CentOS 7. Entre los aspectos revisados se encuentran las distintas topologías de un cluster de alta disponibilidad, los tipos de cluster, elementos que lo conforman, los posibles software para realizar el diseño virtual, el manejo y configuración de servidores web y bases de datos, el funcionamiento de un sistema de replicación y del sistema de gestión de cursos Moodle.

4.4. Selección de la topología

Se consideraron las dos topologías de cluster principales, activo/activo y activo/ pasivo, como posible selección y al estudiar sus características, se realizó la toma de decisión en función de estas. En la topología activo/pasivo, sólo uno de los nodos proporciona los recursos en el rol de primario, evitando en mayor medida la corrupción de los datos al permitir la escritura sólo en el nodo con

el rol primario, siendo esta la mayor virtud de la misma.

Por lo contrario la topología activo/activo es más vulnerable a una posible corrupción, ya que la escritura se puede efectuar de forma simultánea en todos los nodos participantes en el cluster dando esto la posibilidad de discrepancia al momento de sincronizar la data de cada nodo. Otro factor de importancia de la topología activo/pasivo es la simplicidad de su implementación ya que es un solo nodo del cluster el que tomará el rol principal, en contraste a la topología activo/activo la cual para su óptimo funcionamiento requerirá de un balanceador de cargas debido a que todos los nodos del cluster participan en conjunto proporcionando los servicios.

En función de las características descritas, se seleccionó activo/pasivo como topología de trabajo del cluster, por presentar las características demandadas para realizar el diseño.

4.5. *Diseño del prototipo virtual del cluster*

El prototipo del cluster es el modelo de referencia que sirve como guía para llevar a cabo la implementación del mismo en nodos reales de prueba. En este sentido, el prototipo integra el servidor web con el servidor de base de datos, el sistema de ficheros del cluster y el dispositivo de replicación de datos, para dar continua disponibilidad de acceso a un entorno de prueba del Aula Virtual de Ingeniería, diseñado sobre la plataforma de aprendizaje Moodle.

4.5.1. *Selección del virtualizador*

Entre los diversos programas de virtualización existentes, los más populares al momento de realizar la búsqueda vía web son VMware, VirtualPC y VirtualBox.

Para la selección del software adecuado según las necesidades del prototipo a realizar VirtualPC quedó descartado puesto que sólo virtualiza sistemas operativos Windows.

Tanto VMware como VirtualBox permiten virtualizar sistemas linux, sin embargo poseen características de rendimiento y potencia distintas.

VMware sólo es gratuito para ejecutar máquinas virtuales ya creadas y para el desarrollo del proyecto no será útil.

Para efectos del diseño del prototipo, VirtualBox cumplió con los requerimientos mínimos necesarios; la aplicación es de uso libre, verdaderamente rápido, ligero y ocupa poco espacio en disco.

4.5.2. *Instalación y configuración de CentOS*

El sistema operativo CentOS 7 es una distribución de linux completamente gratuita y para su instalación en VirtualBox se descargó la imagen ISO versión Minimal desde el portal web oficial de CentOS [24].

Instalación de CentOS. Al iniciar la instalación y dar la elección del idioma, se procedió a reservar un espacio de disco en cada máquina, el cual será necesario para crear los volúmenes de replicación de los datos. Ingresando a la sección “destino de instalación”, se seleccionó “configurar el particionamiento”. En la pantalla siguiente se debe elegir la opción para crear particiones automáticamente, seleccionar la raíz y reducir la capacidad que se desea liberar. En “modificar” se debe cambiar la política de tamaño a “Tan grande como sea posible” para que el espacio liberado esté disponible en el grupo de volúmenes LVM.

Configuración de red y nombre de host. Se seleccionó el dispositivo de red y al pasar el interruptor para encenderlo, momentáneamente se aceptó la configuración predeterminada, ya que las máquinas del cluster nunca deben obtener una dirección IP vía DHCP, porque la renovación periódica de la dirección del DHCP interferirá con el Corosync. En esta pantalla se le asigna el nombre de host a cada una de los nodos; siendo estos nodo1 y nodo2.

5. **Resultados: Evaluación del desempeño del cluster de alta disponibilidad en la red de la Universidad de Carabobo**

Bajo la colaboración y coordinación del Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA) de la Universidad de Carabobo, se realizó la instalación e implementación del diseño de cluster de alta disponibilidad, con dos servidores reales.

5.1. Evaluación del diseño del cluster implementado

Al culminar la fase de implementación, funcionando el cluster de alta disponibilidad, se llevó a cabo una revisión del sistema por medio de la monitorización de los elementos de hardware para evaluar el desempeño del mismo y su interacción con los recursos del cluster.

Para cada uno de los nodos se evaluaron el uso de CPU, uso de memoria, el espacio libre en disco y para el sistema de alta disponibilidad se valoró el rendimiento de red, estado de actividad de las aplicaciones instaladas como recursos: Apache, MySQL, DRBD y el tiempo de migración de recursos al ocurrir la detención del el servidor con el rol principal.

5.2. Evaluación de Parámetros de Hardware

Esta actividad se concretó haciendo uso de la aplicación Monitor del Sistema, instalada por defecto en la interfaz gráfica MATE y ubicada en el menú de Aplicaciones ->Herramientas del Sistema. Por medio de este último se logró medir en tiempo real el rendimiento del equipo; permitiendo identificar en cualquier momento, si existiera, algún proceso que pueda ocasionar que el nodo empiece a ir inusualmente lento o llegue a colgarse.

La herramienta Monitor del Sistema divide la información contenida, cuatro pestañas. En la primera despliega información del sistema del nodo tanto de software y hardware. La siguiente se denomina Procesos, y permite visualizar una lista con todos los procesos de ejecución y ordenarlos según el porcentaje de CPU que están utilizando. La pestaña de mayor interés para esta evaluación tiene el nombre de Recursos, y expone el porcentaje de CPU, memoria RAM, disco duro y red que está utilizando el nodo. De última se ubica la pestaña de Sistema de Archivos, en la cual se observa cuánto espacio se tiene ocupado en el disco duro.

5.3. Evaluación del Cluster

El desempeño del cluster de alta disponibilidad, se evaluó en términos de la fiabilidad y accesibilidad al servicio que se presta. En este sentido, las pruebas realizadas se basaron inicialmente en constatar su accesibilidad desde una estación

cliente, donde por medio del browser de un explorador se intentó ingresar al Aula Virtual de prueba a través de la dirección IP (190.170.97.230) del cluster.

Seguidamente, se verificó la disponibilidad del servicio al dar de baja al nodo primario, haciendo ping a la IP del cluster desde un equipo cliente.

La siguiente prueba, consistió en acceder al IP (190.170.97.230) por medio del explorador del equipo cliente, luego de detener al nodo con el rol principal para confirmar si la conexión con el servidor (190.170.97.230) se mantiene. De esta manera se verificará si el nodo que poseía el rol secundario alcanzó el rol primario exitosamente, manteniendo la sincronización de archivos entre los nodos del cluster y la disponibilidad de los recursos.

Así mismo, se ensayó el funcionamiento del cluster no solo apagando el nodo principal, sino también desconectando los cables de la interfaz de red para simular un problema de hardware. Como última prueba, se realizó la medición del tiempo de migración de recursos del nodo principal al nodo secundario, al dejar en modo de espera al nodo primario, y se verificó por medio del estatus del cluster el tiempo de transcurrido en el proceso de entrega y adquisición de los recursos entre los nodos del cluster. Esta transición es conocida como failover.

6. Conclusiones

Las múltiples fallas en el servicio prestado por el Aula Virtual de Ingeniería ocasionan un deterioro en la calidad del sistema educativo, además de la insatisfacción de los usuarios y dilaciones en las actividades académicas. Atendiendo a estas demandas, se hace necesaria la implementación del cluster de alta disponibilidad diseñado, en la red de la Universidad de Carabobo.

La implementación de un clúster de alta disponibilidad para una versión de prueba del Aula Virtual de Ingeniería permitió proporcionar alta disponibilidad para dos servidores de prueba utilizados, mediante aplicaciones de uso libre.

Al realizar el diseño del cluster de alta disponibilidad para el Aula Virtual de Ingeniería

se dispone de los códigos base que dan origen al sistema, lo que hace de este un diseño escalable a través de la posibilidad de añadir características o atributos adicionales al cluster, modificar la cantidad de nodos integrantes o incluir recursos que cubran nuevas necesidades surgientes.

La topología Activo/Pasivo, fue la seleccionada para el diseño del cluster por diversos factores que la hacen una configuración segura, robusta y altamente flexible, esto debido a que permite la actualización de software de forma gradual dejando un servidor como principal a la vez que en el otro se realiza el mantenimiento programado.

La alta disponibilidad de la base de datos es un atributo principal de la clusterización y es la configuración Activo/Pasivo la que da protección ante posibles vulnerabilidades en la corrupción de los datos. La escalabilidad es un factor significativo ya que se presta comodidad en la adición de otro nodo al cluster, permitiendo crecer en función de su robustez y la gran capacidad del sistema de seguir funcionando, aún en caso de producirse alguna falla.

El manejo de recursos por el sistema de clusterización fue un aspecto fundamental de comprensión para el correcto funcionamiento del proyecto, ya que esto no es algo común. El manejo de servicios como Apache, Mysql o el sistema de replicación DRBD en un servidor común denominado LAMP cambia en muchos aspectos al momento de ser controlados por Pacemaker y Corosync, arrastrando consigo un cambio en la administración de estos programas los cuales pasan de ser servicios a ser recursos de un cluster; inhibiendo a los servidores de la posibilidad de iniciar estos servicios de forma individual y entregarle esta potestad al sistema de clusterización siendo esto uno de los puntos más álgidos en el desarrollo del trabajo especial de grado.

El tiempo de migración de recursos es una función de dos variables como son el hardware de los servidores participantes en el cluster y de la congestión de la red. Ambos son participes en el aumento y disminución del tiempo de transición de recursos, pero como se demostró en el presente trabajo de grado donde se trabajó con equipos de poca capacidad de procesamiento, no es un factor

de tan elevado peso en esta evaluación. Por lo contrario, la red se puede ver congestionada cuando ésta tiene más tráfico que el que puede soportar y esto incide de forma directa en el tiempo de migración de recursos causando el incremento de este tiempo. En la red universitaria de la Facultad de Ingeniería se observó que este fenómeno de congestión no ocurrió frecuentemente, causando que el prototipo de cluster de alta disponibilidad para el Aula Virtual de Ingeniería trabaje de forma óptima en su tiempo de migración de recursos.

El Cluster de Alta Disponibilidad desarrollado en el presente trabajo especial de grado, se utilizó para efectuar pruebas en la red de la Universidad de Carabobo y ambos nodos se instalaron en la Facultad de Ingeniería debido a limitaciones de acceso a otras Facultades o instancias de la Universidad, lo cual imposibilitó la evaluación del sistema de Alta Disponibilidad en distintos puntos geográficos pertenecientes a la red universitaria.

Para solventar los inconvenientes ocasionados al servidor del Aula Virtual de Ingeniería por las fallas en el suministro eléctrico que producen de forma inevitable la caída de los servidores, se deben distribuir los nodos del cluster en distintos puntos geográficos para asegurar el constante funcionamiento de los servicios.

El sistema diseñado provee una solución óptima a los problemas de disponibilidad acarreados por el servidor del Aula Virtual de Ingeniería, al combinar la solución de almacenamiento DRBD con el gestor de recursos de cluster Pacemaker.

El proceso de migración de los recursos a un nodo saludable una vez que Pacemaker detecta una falla en el nodo primario demora aproximadamente un segundo y DRBD se reconfigura en menos de 30 segundos, resultando en un tiempo total de failover medido durante las pruebas realizadas, de entre 10 a 15 segundos.

La Universidad de Carabobo como sistema de enseñanza superior, investigación y creación de cultura científica y humanística, debe ser pionera en el campo de la investigación y desarrollo tecnológico. Debido a múltiples factores se ve atrasada en campo de desarrollo de tecnologías autónomas que resguarden y conserven unos de los recursos informáticos más importantes como

son los datos almacenados en su gran variedad de servidores.

Es por esto que el diseño e implementación de un cluster de alta disponibilidad es trascendental no solo para el Aula Virtual de Ingeniería, sino para todos los servidores que sean considerados críticos para el óptimo funcionamiento de la red universitaria y ser este más que un salva vidas, una estrategia de seguridad informática y una puesta a punto para cada uno de los servidores que en ella funcionan, consiguiendo que la Universidad de Carabobo se eleve a la vanguardia tecnológica en el campo de la informática, comunicaciones y seguridad.

7. Recomendaciones

Expandir el proyecto y realizar la implementación en el resto de los servidores encargados de manejar datos de relevancia de la Universidad de Carabobo.

En la implementación del diseño, prestar especial atención a los campos que contengan nombres de host, direcciones IP, direcciones de ficheros o nombres de dispositivos, pues estos varían dependiendo de la disponibilidad de la red y las preferencias del administrador.

Verificar el estado de la sincronización de DRBD debido a que se puede presentar un problema denominado “Split-Brain”.

Una vez implementados de manera exitosa los sistemas activo/pasivo en la Facultad de Ingeniería y en el resto de los servidores que integran la red universitaria, el próximo paso sería experimentar con un sistema de alta disponibilidad activo/activo con balanceo de cargas, a efectos de mejorar no solo la disponibilidad sino la capacidad y velocidad de respuesta a la demanda de servicios.

8. Referencias

- [1] José de Jesús Rocha Quezada, Salvador Botello Rionda, José Miguel Vargas Félix, and Iván Agustín Munguía Torres. Diseño e implementación de un clúster de cómputo de alto rendimiento. *Acta Universitaria*, 21(3), 2011.
- [2] Red Hat. *Red Hat Enterprise Linux 6. Visión general de adición de alta disponibilidad*. Red Hat, USA, 2017.
- [3] Rafael García Leiva. Instalación y configuración de un cluster de alta disponibilidad bajo linux. Reporte técnico, Universidad Autonoma de Madrid, España, 2003.
- [4] Jhonangel Mireles and Javier Maldonado. Diseño de un cluster orientado a servicios para aplicaciones WEB en la Universidad Nacional Experimental del Táchira. *Telematique*, 14(1):79–96, 2014.
- [5] Nazareth Guia and Herney Perafan. Diseño de un cluster de alta disponibilidad para el aula virtual de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2017.
- [6] Michael E. Porter. *Ser Competitivo: Edición actualizada y aumentada*. Deusto, 2017.
- [7] Red Hat. *Red Hat Enterprise Linux 5. Sinopsis de la suite para Cluster*. Red Hat, USA, 3^{era} edition, 2017.
- [8] Gunnar Wolf, Esteban Ruiz, Federico Bergero, and Erwin Meza. *Fundamentos de sistemas operativos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2015.
- [9] Red Hat. *Red Hat Cluster Suite for Red Hat Enterprise Linux 5.2*. Red Hat, Inc., USA, 2008.
- [10] Mohammed J. Kabir. *La biblia del servidor Apache 2*. Anaya Multimedia, 2003.
- [11] José Bernal Rivas Fernández. La gerencia de informacion: el caso de los archivos. *Biblios*, 4(16), 2003.
- [12] Reema Khosla. *Oracle Fail Safe Concepts and Administration Guide, Release 4.1.1 for Microsoft Windows*. Oracle, USA, 2015.
- [13] Philippe Rigaux, Michel Scholl, and Agnes Voisard. *Spatial databases: with application to GIS*. Elsevier, 2001.
- [14] Miquel Albert Orensa and Gerard Enrique Manonellas. *Estructura de computadores*. Universitat Oberta de Catalunya, 2011.

Volumen 25 Número 2

Editorial

La Revista Ingeniería UC en su edición de su número dos (2) correspondiente al periodo de mayo a agosto del año 2018 de su volumen 25, muestra su capacidad de mantenerse al día y dando investigaciones de altísima calidad dentro y fuera del país, mediante una política de auto gestión basado en donaciones para hacer posible su edición y montaje en los tiempos previsto en los cuales debe salir cada número de la Revista en línea. De esta manera cumplimos con todos los autores que nos confían sus productos de investigación y con la puntualidad que se espera de la Revista por parte de todos los índices internacionales y nacionales donde se encuentra indexada nuestra Revista Ingeniería UC. Tenemos una trayectoria de 25 años y una gran responsabilidad sobre nuestros hombros con todos aquellos que han trabajado arduamente para hacer de la Revista una ventana de nuestra Ilustre Universidad de Carabobo y por ende de la Facultad de Ingeniería a toda la comunidad científica Nacional e Internacional.

Abrimos la presente edición con dos revisiones del estado del arte aportadas por Bullón y su grupo del Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos - FIRP de la Universidad de los Andes - ULA y otra presentada por Contreras y Urdaneta de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia – Luz; en la primera se realiza una revisión sobre la formación de películas monomoleculares de sustancias tensoactivas (surfactantes) en las interfases aire-agua y aceite – agua mediante el empleo de la técnica de la bandeja de langmuir. La segunda revisión presenta un extenso estudio de las características técnicas y estructurales de las antenas de banda ultra ancha (UWB) para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas.

Yaguaratty y colaboradores desarrollaron un modelo matemático para evaluar las variables de operación de evaporadores verticales por medio de una herramienta computacional. Muñoz y López en su investigación presentan un modelo simplificado de la piel humana adulta como un medio turbio de tres capas para estudiar el comportamiento de la absorbancia en este tejido mediante una simulación basada en el método de Monte Carlo e implementando un algoritmo paralelo. Guevara-Pérez expone en su trabajo un análisis resumido sobre la gestión integral de los recursos hídricos en el Perú.

Medina y colaboradores estudiaron el comportamiento mecánico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS) las cuales son de vital importancia para el desarrollo de nuevos productos que sean amigables con el ambiente. Sáenz, García y Guzmán focalizan su investigación en evaluar el comportamiento de un acero inoxidable dúplex SAF 2304 frente a la corrosión por picadura en un medio clorado. Hurtado y su grupo desarrollaron una herramienta computacional a fin de determinar las condiciones óptimas de extracción en ciclos regenerativos a partir de cálculos térmicos asociados a cada uno de los elementos del sistema. Guerra y co-trabajadores emplearon el análisis espectral de torque electromagnético con la finalidad de determinar fallas de excentricidad en motores de inducción trifásicos mediante el discriminante canónico.

Robledo nos presenta en su trabajo un análisis de la normativa técnica de la radiodifusión sonora AM vigente en Venezuela y además aporta una propuesta de matriz de distancias mínimas entre estaciones transmisoras AM para el país. Valor y su equipo enfatizan la importancia de la planificación del parámetro “Physical Cell ID” (PCI), pues constituye un paso muy importante en el despliegue de toda la red LTE (tecnológica móvil de alta capacidad). Otro aporte del grupo de Medina y trabajadores fue la degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos de interés en el entorno medioambiental. Linares, Figueredo y Ocanto nos exponen sus estudios de catalizadores sulfurados de Fe-Mo soportados en Zn-hidroxiapatitas y su aplicación en la reacción de hidrodesulfuración

de tiofeno.

Dos tesis premiadas de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de nuestra Facultad de Ingeniería de nuestra ilustre Universidad de Carabobo forman parte de esta edición Perretti y Fernández nos exponen su investigación sobre el desarrollo de una instrumentación virtual aplicada a los laboratorios de telecomunicaciones usando Red Pitaya. Ascensio y Zapata también son reconocidos con su trabajo Clasificación de Nevus mediante el cálculo de la dimensión fractal y el análisis armónico del contorno extraído de imágenes multiexpectrales para la detección temprana de melanomas en piel, aportes muy valiosos en el campo de la medicina. Felicitaciones a estos nuevos profesionales y a los profesores que guiaron sus trabajos.

Finalmente, ya para finalizar la exposición de las diferentes investigaciones que conforman este número 2 de nuestra Revista, Camacaro y colaboradores en su trabajo nos plantean la obtención de un colorante liposoluble para la industria de alimentos a partir de la Bixa Orellana L. comúnmente conocido como Onoto. Y cerramos con Pilares y co-investigadores donde nos presentan sus estudios sobre la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano Peruano bajo diferentes escenarios climáticos regionales.

Nos despedimos deseando como es costumbre en nosotros invitando muy cordialmente 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, ciencias afines

Profesor *José Luís Nazar*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesora *Lisbeth Manganiello*, PhD
Editora – Jefe

Review on asphaltene films at air – water and oil – water interfaces

Yasmín Tatá, Franklin Salazar – Rodríguez, Ana M. Forgiarini, José G. Delgado-Linares y Johnny Bullón*

Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP), Universidad de los Andes, Mérida 5101, Venezuela

Abstract.- The formation of mono-molecular films (monolayers) of surfactants, at air – water and oil – water interfaces, is possible by using the Langmuir trough technique. This technique is very important in the oil industry, because it allows the study of characteristics and behavior of films formed by asphaltenes, resins and other interfacially active components of crude oil, also it is a tool for determining the influence of physico-chemical variables (temperature, pH, initial surface concentration, type of solvent and addition of chemicals) on films. The information obtained on molecular interactions at interfaces, molecular orientation and rigidity of films, help to understand the role played by surfactant compounds of crude oil in the stability of the water-in-oil emulsions (W/O) generated during the operations of petroleum production and transportation. The analysis of the effect of solvent aromaticity and addition of demulsifiers and alcohols on the rigidity of the films contributes to the development of new methods to break up crude oil emulsions or prevent their formation.

Keywords: Langmuir films; asphaltenes; petroleum; surfactants; demulsifiers.

Revisión sobre películas de asfaltenos en las interfases aire – agua y aceite – agua

Resumen.- La formación de películas mono-moleculares de sustancias tensoactivas (surfactantes) en las interfases aire – agua y aceite – agua es posible mediante el empleo de la técnica de la Bandeja de Langmuir. Su uso es muy importante en la industria petrolera, debido a que permite el estudio de las características y del comportamiento de las películas formadas por asfaltenos, resinas y otros componentes interfacialmente activos del crudo y determinar la influencia que tiene sobre las películas la modificación de variables como la temperatura, el pH, la concentración superficial inicial, el tipo de disolvente y la adición de otras sustancias químicas. La información obtenida sobre las interacciones moleculares en las interfases, la orientación de las moléculas y la rigidez de las películas, ayudan a comprender el papel que desempeñan los compuestos tensoactivos del crudo en la estabilidad de las emulsiones de agua en aceite (W/O), generadas durante su extracción y transporte, las cuales constituyen uno de los principales problemas de esta industria. El análisis del efecto de la aromaticidad de los disolventes y la adición de demulsificantes y alcoholes sobre la rigidez de las películas, contribuye al desarrollo de métodos para romper las emulsiones o prevenir su formación.

Palabras claves: películas de Langmuir; asfaltenos; petróleo; surfactantes; demulsificantes.

Recibido: abril 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

Las dos propiedades más importantes en la ciencia de los surfactantes o tensoactivos (sustancias con doble afinidad, polar – apolar) son la adsorción en las interfaces y la asociación de las moléculas entre sí, ambas promovidas por la necesidad de llevar al mínimo su energía

libre. La adsorción de surfactantes en la interfase disminuye la tensión interfacial y favorece procesos como la emulsificación, la recuperación de crudo y la generación de espumas. La asociación de moléculas depende de la estructura del surfactante y de la interacción que existe entre ellas mismas y con el medio solvente que las contiene, favoreciendo la formación de estructuras ordenadas tanto en el seno del solvente como en las interfaces, como es el caso de la formación de micelas, hemimicelas, monocapas, bicapas y cristales líquidos.

* Autor para correspondencia:

Correo-e: jbullon@ula.ve (Johnny Bullón)

La estructuración interfacial de las moléculas de

surfactantes genera películas de espesor y rigidez variable que constituyen un factor fundamental en la estabilidad de dispersiones de uso común doméstico e industrial [1, 2]. Estas películas pueden tener el espesor de una (monocapa) o varias moléculas de surfactante.

El tipo de película que puede formar un surfactante en una interfase agua – aire (superficie) dependerá de la solubilidad de los tensoactivos en la fase acuosa. Así, si la solubilidad es elevada o muy baja, formará una película de Gibbs o una película de Langmuir respectivamente. Cualquiera sea el caso, el conocimiento de las propiedades fisicoquímicas de la película permite el desarrollo de nuevos materiales (tales como: recubrimientos, sensores químicos y biológicos, etc.) así como de estrategias de control para situaciones indeseables en muchas ramas de la práctica ingenieril.

Venezuela, por ser un país que cuenta con cuenta con cerca del 90 % de las reservas de crudo extrapesados del mundo [3], debe hacer serios esfuerzos en orientar la investigación básica y aplicada hacia el aprovechamiento integral de tan vastos recursos energéticos. En este sentido, la fracción del petróleo conocida como *asfaltenos* es la responsable de formar películas en la interfase agua – aceite y estabilizar las emulsiones indeseables de agua – en – petróleo que se forman en las diferentes etapas de la producción petrolera. Así mismo, se ha demostrado que los asfaltenos tienen un rol fundamental en la estabilización de espumas en sistemas petroleros [4, 5, 6, 7, 8]. Por lo tanto, los métodos de control de espumas y de emulsiones principalmente involucran la desestabilización de la película asfáltica interfacial a través de la variación de parámetros físicos (calentamiento, dilución, aplicación de campos eléctricos, centrifugación, etc.) y de la adición de sustancias químicas (fundamentalmente formulaciones surfactantes) en las etapas tempranas del tratamiento de petróleo una vez que deja el pozo productor [4, 9].

El efecto que sobre la interfase agua – crudo tiene cada uno de estos métodos puede estudiarse a través de varias técnicas experimentales. La Bandeja de Langmuir es uno de los dispositivos experimentales de mayor uso en los estudios de sistemas petroleros,

debido a la valiosa información que arroja sobre la rigidez de la película de surfactantes en las interfases aire – agua y aceite – agua.

El presente artículo constituye una revisión de la literatura de los aspectos fisicoquímicos más relevantes de las películas interfaciales de asfaltenos y otras fracciones petroleras y su relación con la estabilidad de emulsiones de agua en aceite (W/O), típicas en los procesos de extracción y transporte de crudo.

2. Películas mono – moleculares (monocapas)

Cuando una pequeña cantidad de una sustancia orgánica, no volátil y prácticamente insoluble en un líquido (conocido como líquido soporte), se coloca sobre su superficie, se pueden observar los siguientes comportamientos: a) la sustancia puede permanecer como una gota compacta, dejando el resto de la superficie del líquido limpio; o b) puede extenderse sobre la superficie del agua y ésta se cubre con una capa cuyo espesor es igual a la longitud de una molécula de soluto (monocapa). La formación de una monocapa insoluble o película mono–molecular, depende de un delicado balance de fuerzas intermoleculares atractivas y repulsivas y está determinada por las fuerzas de interacción entre la sustancia y el líquido soporte [10, 11].

Generalmente, las monocapas insolubles son preparadas depositando sustancias anfífilas orgánicas (sean o no surfactantes), de muy baja solubilidad en la fase que ofrece soporte, de tipo RX, siendo R una cadena hidrocarbonada y X un grupo polar, sobre una superficie acuosa. Dado que el agua es el líquido más usado como soporte en el estudio de monocapas de compuestos orgánicos, se restringe esta revisión a tales situaciones, a menos que expresamente se indique otra cosa.

Cuando existe una atracción débil entre las moléculas de la sustancia orgánica y las moléculas de agua, la película no se formará o su estabilidad será muy baja. Si, por el contrario, hay interacciones entre los grupos polares de la sustancia y las moléculas de agua, a través de enlaces de hidrógeno, y fuerzas laterales de Van der Waals entre las cadenas carbonadas, se formará la película. Las interacciones intermoleculares entre

la sustancia orgánica y el líquido soporte, lo mismo que la temperatura, son factores de primer orden en la formación de películas superficiales, que determinan la distribución de las moléculas a nivel de la interfase. Así, se forma una monocapa estable cuando el trabajo de adhesión entre la sustancia y el agua (W_A) es mayor que el trabajo de cohesión (W_C) de las moléculas de la sustancia entre si [10, 11].

Como medida del poder de extensión de una sustancia se emplea el parámetro de extensión, el cual corresponde a la diferencia entre el trabajo de adhesión y el trabajo de cohesión [12].

$$S = W_A - W_C \quad (1)$$

El parámetro de extensión se puede expresar en términos de cantidades medibles [12].

$$S = \gamma_2 - \gamma_1 - \gamma_{12} \quad (2)$$

donde, S : parámetro de extensión, γ_1 : tensión superficial del líquido que se esparce (líquido 1), γ_2 : tensión superficial del líquido soporte (líquido 2) y γ_{12} : tensión interfacial entre los líquidos 1 y 2.

Si el coeficiente de extensión es mayor que cero ($S > 0$), un líquido se puede extender sobre la superficie del otro formando una película, cuando es menor que cero ($S < 0$) el líquido que sobrenada simplemente formará gotas [12, 13].

Materiales de diferente naturaleza han sido identificados como formadores de películas insolubles, tal es el caso de surfactantes, polímeros y petróleo y sus fracciones; los cuales se disuelven en un solvente orgánico volátil e insoluble en agua (cloroformo, hexano o tolueno) y se depositan sobre la superficie de un líquido con una tensión superficial relativamente alta (como el agua). Al evaporarse el solvente se forma una película, que modifica significativamente las propiedades físicas de la región interfacial [10, 14].

En general, para que se forme una monocapa insoluble en la interfase aire – agua, las cadenas hidrocarbonadas de las sustancias utilizadas deben tener 10 o más carbonos [1]. Si la cadena es más corta, pero el anfífilo es insoluble en agua, pueden formarse micelas en la fase acuosa. Por el contrario,

si la longitud de la cadena es demasiado larga, el anfífilo tiende a cristalizar en la superficie del agua. Determinar la longitud óptima de la cadena del hidrocarburo no es tarea fácil, ya que la capacidad de formación de una película también depende de la parte polar del anfífilo [14].

2.1. Presión superficial

Uno de los parámetros más usados para estudiar las propiedades estructurales de películas de anfífilos en interfases líquido – gas es la presión superficial (π), definida como la diferencia entre la tensión superficial del líquido soporte puro (γ_0) y la del líquido con una película adsorbida (γ), así:

$$\pi = \gamma_0 - \gamma \quad (3)$$

En el caso de películas depositadas en interfases líquido – líquido, las tensiones indicadas en la ecuación 3, serán interfaciales.

Tal y como está definida en la ecuación 3, la presión superficial representa una especie de presión de expansión ejercida por la película y que se opone a la tensión superficial (de contracción) del líquido puro (ver Figura 1) [15].

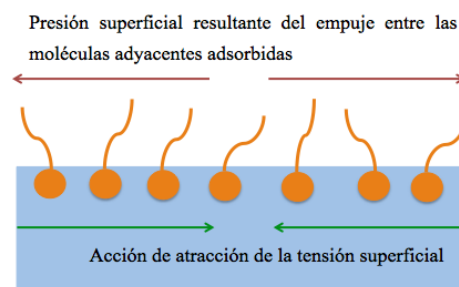


Figura 1: La presión superficial visualizada como opuesta a la acción de la tensión superficial.

2.2. Construcción de las isothermas presión superficial versus área. Bandeja de Langmuir

Uno de los dispositivos empleados para estudiar el comportamiento de las películas o monocapas en interfases aire – agua y agua – aceite es la Bandeja de Langmuir (denominada así en honor a Irving Langmuir, pionero en el estudio de la química de

superficies), cuyo principio de acción es la medida de la presión superficial del sistema en estudio a medida que se modifica el área ocupada por las moléculas de la película en la interfase. Cuando en una sustancia volátil e insoluble en agua se disuelve un anfífilo y se coloca sobre una superficie de agua, la solución se propaga rápidamente para cubrir el área disponible y al evaporarse el disolvente, se forma una película (monocapa o no). Monitoreando la presión superficial de la superficie formada por el aire, la película de anfífilo y el líquido soporte, a medida que se reduce el área superficial (interfacial) de la película, a una velocidad de compresión y temperatura constante, es posible construir una Isoterma de Langmuir. El estudio de tales isotermas permite el análisis de las propiedades estructurales y características de las películas superficiales (interfaciales) y proporciona información útil acerca del tamaño, la forma, la disposición molecular y las interacciones entre ellas y el líquido soporte [10, 14, 16].

El área superficial del líquido soporte en la Bandeja de Langmuir es variable y depende de la capacidad volumétrica del dispositivo. Normalmente, las bandejas comerciales constan de dos barreras móviles que se mueven simétricamente sobre la superficie del líquido soporte y que permiten la compresión y descompresión de la película formada en la interfase agua – aire (o agua – aceite, si es el caso), modificando en consecuencia el área ocupada por las moléculas en la película (ver Figura 2). Por su parte, la tensión superficial del sistema (y en consecuencia su presión superficial) se determina mediante el método de la placa de Wilhelmy [10].

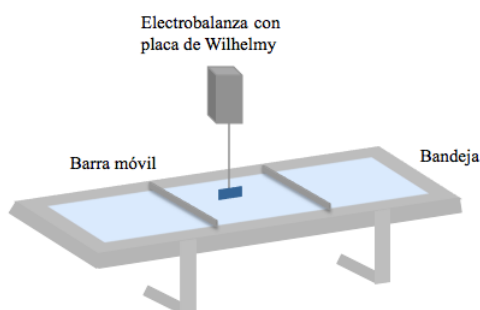


Figura 2: Esquema de la bandeja de Langmuir.

2.3. Estados de las monocapas

Las moléculas de anfífilos que forman una monocapa en la interfase líquido – gas, experimentan una serie de interacciones entre los distintos grupos de átomos que las integran, a saber, interacciones atractivas entre los grupos alquilo y entre los grupos polares y el líquido soporte (que como ya se dijo es por lo general agua) e interacciones repulsivas entre las cabezas polares de las moléculas en la monocapa. La atracción alquílica corresponde a las fuerzas de Van der Waals y por lo tanto se incrementa con la longitud de la cadena carbonada o con la reducción de la distancia intermolecular [17].

Cuando se reduce el área superficial, el empaquetamiento molecular cambia y en consecuencia la magnitud de las interacciones mencionadas, así, la variación de la presión superficial (π) en función del área molecular (A) configura una curva (isoterma) similar a la isoterma presión versus volumen típica de una sustancia pura. Se puede entonces hacer una analogía entre los diferentes arreglos moleculares en la monocapa de anfífilo y los estados físicos de la materia. Tal y como se muestra en la Figura 3, los estados (o fases) de las películas mono – moleculares se agrupan en: películas gaseosas, películas líquidas (expandidas y condensadas) y películas sólidas.

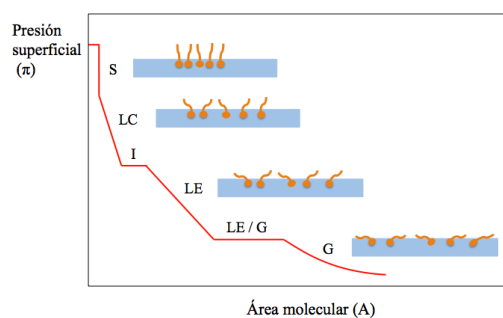


Figura 3: Isoterma de Langmuir de una sustancia anfífila, indicando los diferentes estados físicos.

En la fase gaseosa (G), las moléculas se encuentran bastante separadas unas de otras y se mueven de manera prácticamente independiente, su interacción mutua es casi nula. Esta región de la isoterma, que se encuentra a áreas superficiales

relativamente elevadas, puede modelarse con una relación matemática similar a la Ley del Gas Ideal:

$$\pi A = kT \quad (4)$$

donde k es la constante de Boltzmann y T la temperatura.

Por su parte, las fases o estados líquidos aparecen a menores áreas moleculares. El ordenamiento de las moléculas a nivel de superficie y las interacciones mutuas se hacen evidentes, las cadenas alquílicas comienzan a alinearse verticalmente y en dirección perpendicular a la superficie. El aumento progresivo de π , indica que el anfífilo incrementa su actividad superficial a medida que se reduce el área. Como es de esperarse, el líquido expandido (LE) se ubica a mayores áreas moleculares que el líquido condensado (LC), lo que da cuenta del mayor empaquetamiento de esta última fase y en consecuencia su menor compresibilidad.

Si se disminuye aún más el área molecular, aparece la fase sólida (S), en la cual la variación de la presión es muy marcada (casi una línea vertical en la curva π versus A), indicando un alto grado de empaquetamiento molecular y en consecuencia alta rigidez de la película. La orientación de las moléculas es prácticamente perpendicular a la superficie y la compresibilidad de la película es casi nula. Si en esta fase se extrapola la curva π versus A hasta intersectar el eje de las abscisas, se obtiene un área molecular muy cercana al área transversal de una sola molécula de la sustancia bajo estudio. Una futura reducción del área más allá del estado sólido, puede ocasionar una disminución brusca de π , indicando el colapso o ruptura de la película [1] [15, 17].

Tal y como se muestra en la Figura 3, pueden ocurrir fases o estado transicionales (LE/G, I) que marcan el cambio en la estructuración molecular a medida que las interacciones intermoleculares dominantes se van modificando.

Cabe resaltar que isoterma como la mostrada en la Figura 3 son típicas de ácidos carboxílicos de cadena larga, en las que se aprecia claramente los diferentes estados de la película superficial. No obstante, las isotermas de sistemas complejos (tal es el caso de las fracciones petroleras) normalmente no muestran todos los estados e

incluso la diferenciación entre los estados presentes no es clara; esto ocurre en sistemas con una amplia distribución de pesos moleculares, como la fracción *asfaltenos* del petróleo [18].

2.4. Compresibilidad de la Monocapa

Es un parámetro de suma importancia que se relaciona con la variación de la actividad superficial (interfacial) del anfífilo en la monocapa en función del cambio de área superficial (interfacial), de tal manera que para ciertas aplicaciones se toma la compresibilidad (C^S) como una medida de la “rigidez” de la monocapa [19]. Matemáticamente se tiene [11]:

$$C^S = \frac{-1}{A} \left(\frac{\partial A}{\partial \pi} \right) \quad (5)$$

Generalmente, la pendiente de la isoterma $\left(\frac{\partial A}{\partial \pi} \right)$ se toma en la región o estado cuya compresibilidad se desea analizar y el área molecular (A) constituye el área que se lee en el corte con el eje de las abscisas de la extrapolación de la región considerada para $\pi = 0$. En las isotermas de las películas de Langmuir de asfaltenos y otras fracciones petroleras, se toma como referencia la compresibilidad del estado de líquido condensado [20].

3. Asfaltenos

La fracción *asfaltenos* es la más pesada y polar del petróleo, cuya definición operacional se basa en su solubilidad. Los asfaltenos son insolubles en hidrocarburos no polares, tales como el *n*-heptano y el *n*-pentano, y solubles en hidrocarburos aromáticos como el tolueno, benceno y la piridina [21, 22, 23]. La estabilización de dispersiones multifásicas por parte de los asfaltenos responde a la formación de una película interfacial de alta resistencia mecánica que envuelve los fragmentos de fase dispersa (gotas o burbujas) y que retarda la coalescencia (emulsiones) y el colapso (espumas) de tales dispersiones [5, 24]. Por tal motivo, el estudio de las películas asfálticas es de vital importancia en el conocimiento de los factores que afectan la estabilidad de las dispersiones petroleras

y en consecuencia en el diseño de estrategias para su mitigación y tratamiento; la técnica de la Bandeja de Langmuir constituye una herramienta de gran valía que aporta información sobre la naturaleza y compresibilidad de las películas de asfaltenos y otras fracciones de petróleo en interfaces aire – agua y agua – aceite.

4. Isotermas presión superficial versus área de películas de asfaltenos

4.1. Isotermas en la Interface Aire – Agua

Al comprimir la película de asfaltenos en la interfase aire – agua, se aprecian las fases: gas (I), líquido expandido (II) y líquido condensado (III) y una especie de plegamiento (IV), como se muestra en la Figura 4 [25, 26].

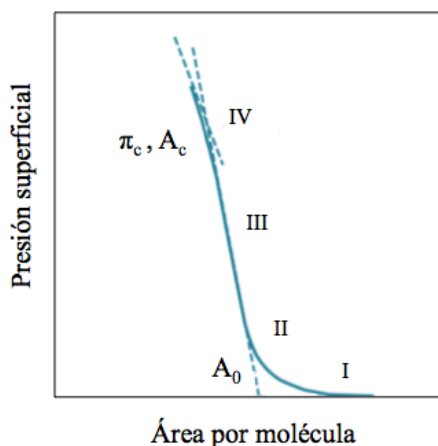


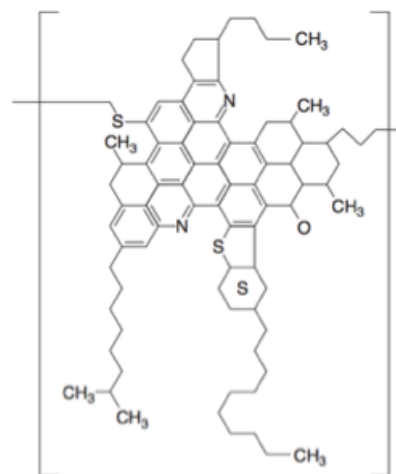
Figura 4: Isoterma presión superficial versus área molecular de asfaltenos del crudo Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco (modificado de la referencia [26]).

A muy baja compresión el área por molécula es grande y la película de asfaltenos se comporta como una fase gaseosa de dos dimensiones, donde las moléculas están muy separadas y presentan interacciones insignificantes unas con otras, estando orientadas al azar en la interfase. En esta etapa la energía libre y la tensión superficial de la fase acuosa (soporte) permanece sin alterar, por lo que no hay variación en la presión superficial de la película [18, 20, 27]. Cuando se comprime la

película, se reduce el área por molécula y éstas se acercan más y comienzan a interactuar unas con otras, creando una fase líquida expandida. La película tiene una compresibilidad baja y se presenta un aumento de la presión superficial y un cambio en la pendiente de la curva de la isoterma $\pi - A$, que se debe posiblemente a las interacciones entre las partes rígidas de los hidrocarburos aromáticos de los asfaltenos, los grupos polares están probablemente muy lejos para que interactúen. Las moléculas de asfaltenos se encuentran en la interfase con el anillo policíclico en posición casi paralela a la superficie del agua y a medida que aumenta la compresión sus cadenas laterales de alquilo se ubican verticalmente sobre la superficie del agua [18, 27, 28].

Al incrementar la compresión, las moléculas de asfaltenos se empaquetan estrechamente y sus cadenas laterales alifáticas se orientan ordenadamente y paralelamente unas respecto a las otras, conduciendo a una fase líquida condensada. Cuando el área por molécula se reduce más, hasta un valor de área crítica, la película de asfaltenos comienza a plegarse hacia arriba y probablemente se origina una nueva fase tridimensional a un valor crítico de presión superficial, en este punto la isoterma $\pi - A$ tiene un cambio sutil de pendiente y la presión superficial aumenta lentamente. Por encima de la presión superficial crítica (π_c) no se observa la fuerte reducción de la presión superficial debida al colapso abrupto de la película. Esto se ha observado en las monocapas de anfífilos típicos y sugiere que las moléculas de asfaltenos están enredadas, formando una película elástica en la interfase. Sin embargo, se forman betas de color marrón cerca de los bordes interiores de las dos barreras de compresión, cuya aparición es una indicación del colapso de la película y de que algunas moléculas de asfaltenos pasan a formar una fase tridimensional [18, 20, 25, 26, 28, 29]. En las isotermas no se observan transiciones de fases, debido a que los asfaltenos están compuestos por una mezcla de especies de distintos pesos moleculares, cada una con diferentes zonas de transición [18, 20, 25, 26, 29, 30].

En la interfase aire – agua, la forma de las isotermas de las películas de los asfaltenos y



asfaltenos.

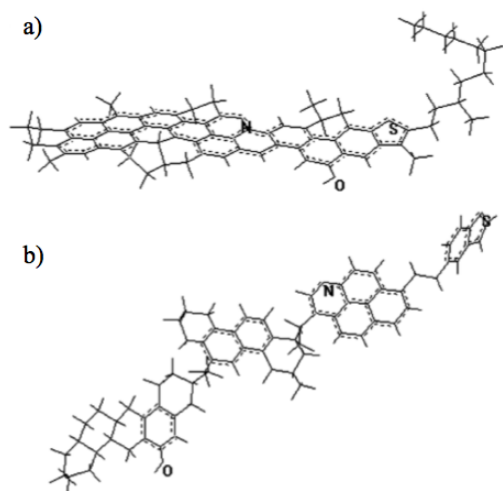


Figura 6: Modelos moleculares para las fracciones de asfaltenos a) fracción A1, b) fracción A2 (Tomada de la referencia [37]).

En estudios efectuados a las fracciones A1 y A2 del asfalto del crudo Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco (compuesto por 60 % de A1 y 40 % de A2 antes de su fraccionamiento), se encontró que la película de A1 es mucho menos compresible que la del asfalto y A2, esto demuestra que el asfalto se comporta de manera semejante que A2, la cual solapa el comportamiento de A1 [39]. En la Figura ??, se muestran de manera esquemática las isothermas para el asfalto y las fracciones A1 y A2.

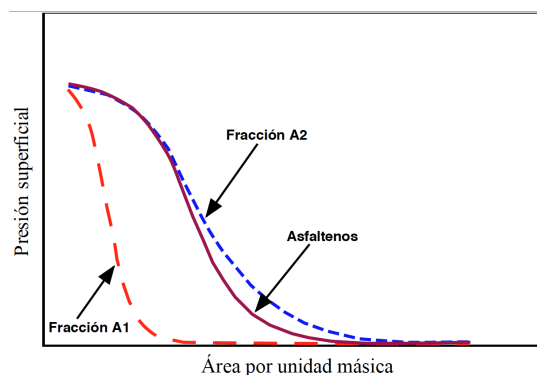


Figura 7: Isothermas presión superficial versus área de las fracciones A1 y A2 de los asfaltenos.

4.2. Influencia de distintos parámetros sobre las isothermas presión superficial versus área de películas de asfaltenos

4.2.1. Naturaleza y aromaticidad del disolvente

Las isothermas presión superficial – área y la espectroscopia UV – visible de películas de asfaltenos en la interfase aire – agua usando diferentes disolventes, indican que los nanoagregados se esparcen sobre la superficie del agua y la compresión de la película conduce a la formación de agregados más grandes, cuyo tamaño depende del solvente utilizado. La similitud de estos agregados en diferentes disolventes sugiere que su formación es una propiedad intrínseca de los asfaltenos y está probablemente relacionada con su estructura molecular [35, 41]. Igualmente, el estudio mediante microscopía de fuerza atómica de las películas de Langmuir – Blodgett formadas al transferir las películas interfaciales sobre un sustrato sólido, revelan la existencia de nanoagregados sobre la superficie del agua que coexisten con grandes agregados formados durante la compresión [33, 35]. La formación de estructuras de asociación con un área reducida por molécula, es la razón por la cual el área molecular de los asfaltenos no corresponde al tamaño esperado [27, 28]. El tamaño de los agregados de asfaltenos es mayor cuando disminuye la aromaticidad del disolvente. Empleando tolueno se obtiene una mejor dispersión por la presencia de los grupos polares en el disolvente aromático, que actúan como aceptores débiles de enlaces de hidrógeno, lo que facilita la disolución de los asfaltenos, las moléculas permanecen como monómeros y no forman agregados y se requiere una menor cantidad de asfaltenos para formar la película [27, 42, 43]. La actividad interfacial de una molécula de asfalto está inversamente relacionada con la solubilidad. Los asfaltenos cercanos a su punto de precipitación se adsorben más fuertemente en una interfase que los asfaltenos completamente solubles y por lo tanto, son más difíciles de desplazar de una interfase y más propensos a estabilizar una emulsión, ya que forman una red de agregados reticulados. La capacidad de los asfaltenos de estabilizar las emulsiones W/O, se puede reducir pero no eliminar al modificar la naturaleza del

disolvente [42, 43, 44]. Los experimentos de la Bandeja de Langmuir han revelado que la naturaleza y la aromaticidad del medio crudo es un factor primordial en el estado y la rigidez de las películas de asfaltenos. Con el incremento de la aromaticidad del disolvente, se reduce la actividad interfacial de los asfaltenos. Así, tanto la presión superficial que puede alcanzarse como la rigidez de la película disminuyen y se hacen más compresibles y el área por molécula aumenta [32, 45]. Los estudios realizados en la interfase aire – agua a las películas de asfaltenos del crudo Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco, empleando distintos disolventes, mostraron que la compresibilidad de las películas y el área por molécula son mayores al utilizar tolueno como solvente que al emplear benceno y ciclohexano. Las películas formadas con ciclohexano son más rígidas, ya que la solubilidad de los asfaltenos es relativamente baja y se forman agregados de mayor tamaño. Las películas de asfaltenos se hacen más flexibles a medida que disminuye el contenido de heptano en el heptol [45]. En la Figura 8, se representa el comportamiento esperado para las isothermas de los asfaltenos al incrementar la aromaticidad del disolvente.

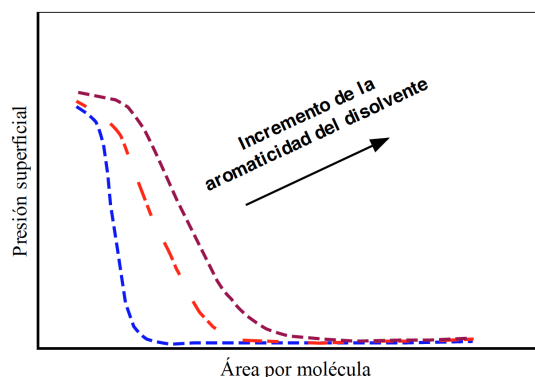


Figura 8: Isothermas presión superficial versus área molecular de los asfaltenos, variando la naturaleza del solvente.

4.2.2. Concentración superficial inicial

Las isothermas $\pi - A$ presentan el mismo comportamiento independientemente de la cantidad colocada de asfaltenos sobre la fase soporte para formar las películas. Sin embargo, a medida que la

cantidad de material se incrementa, las isothermas se desplazan hacia menores áreas específicas y la presión superficial aumenta para un área dada, lo que indica la presencia de más moléculas tensoactivas en la interfase. El estudio de las películas de asfaltenos formadas en la interfase agua – aceite, ha permitido demostrar que una vez que la interfase está completamente cubierta, el material sobrante permanece en la fase oleosa, ya que si se separa y analiza esta fase, se evidencia que hay actividad interfacial debido a la presencia de moléculas de asfaltenos que no migraron a la interfase, por lo tanto, el aumento de la concentración no conduce a un cambio en la hidrofobicidad, la morfología y el espesor de la película [18, 20, 27, 33].

4.2.3. Temperatura

En las monocapas de moléculas anfífilas típicas, el aumento de la temperatura ocasiona una expansión de la isoterma correspondiente, esto es debido a la mayor movilidad de las cadenas de alquilo con la temperatura, lo que produce una reducción de las fuerzas atractivas de Van der Waals. A presiones superficiales bajas, las isothermas de las películas de asfaltenos parecen regirse por este efecto, ya que se obtiene la tendencia esperada de mayores valores de área molecular a medida que se incrementa la temperatura. Cuando la película se comprime a presiones superficiales elevadas, a medida que aumenta la temperatura, las isothermas son desplazadas hacia valores de menores áreas específicas; a temperaturas altas, las cadenas hidrófobas de las moléculas de asfaltenos presentan una mayor flexibilidad, permitiendo de este modo una disposición intermolecular más densamente empaquetada que reduciría el área molecular correspondiente, y las películas son más compresibles [18, 20, 28].

4.2.4. pH de la Fase Soporte

El pH influye sobre la ionización de los grupos polares, lo cual podría causar la condensación de la película debido a la formación de sales. Sin embargo, las variaciones del pH de la fase soporte acuosa no afectan a las isothermas de las películas de asfaltenos, lo que sugiere que las interacciones

de los anillos poli – aromáticos y de las cadenas laterales alquilo dominan a las interacciones de los grupos ionizados de la parte hidrofílica de las moléculas y pueden ser las responsables del empaquetamiento de las películas [18, 20].

4.2.5. Adición de surfactantes. Aplicación en la deshidratación de crudo

Las propiedades de las películas de asfaltenos pueden alterarse con la adición de demulsificantes químicos, que son a su vez surfactantes hidrofílicos. El estudio de las isothermas de Langmuir de mezclas de asfaltenos con diferentes surfactantes, aporta información acerca de la estructura de las películas interfaciales y su estabilidad en procesos de importancia industrial como la demulsificación [25, 26, 46].

Las isothermas presentan las zonas correspondientes a las fases gas, líquido expandido, líquido condensado y cuando el área molecular es pequeña se produce el plegamiento de la película, similar a lo que ocurre en las isothermas de los asfaltenos. No se observan zonas de transición de fases, ni colapsos abruptos. Por encima de la presión superficial crítica, las películas siguen siendo compresibles y la presión superficial aumenta levemente, lo que sugiere que son elásticas. La presión superficial crítica de la película depende de la composición de la mezcla [25, 26, 29].

Con la adición de demulsificante a los asfaltenos en las interfases agua – aire y agua – aceite, se obtienen valores más altos de área crítica y de área molecular, la película se vuelve menos rígida y la compresibilidad aumenta. La compresibilidad de la película puede alterarse como consecuencia de la modificación del tamaño de los agregados y la formación de agregados mixtos, causada por interacciones de tipo Van der Waals y ácido – base entre los grupos funcionales presentes en los asfaltenos y el surfactante. La presencia del surfactante en la película de asfaltenos, genera una estructura menos compacta, con algunas regiones sin película asfáltica y se originan películas menos rígidas, disminuyendo así su capacidad de estabilizar emulsiones de agua en crudo, lo que favorece la demulsificación [25, 26, 29, 46, 47].

La disminución de la rigidez de la película también puede deberse a que los aditivos químicos restringen la formación de una película de asfaltenos en la interfase, debido a una adsorción más extensa de los surfactantes en comparación con los asfaltenos o a que dispersan a los asfaltenos en la fase oleosa. Esta variación en la rigidez de la película se observa con la adición de algunos demulsificantes de alto peso molecular y de resinas. La tasa de relajación aumenta significativamente con el incremento del peso molecular, lo que resulta en un drenaje más rápido de la película inter – gota y en consecuencia la velocidad de la coalescencia de las gotas de agua aumenta. Se ha demostrado que los demulsificantes altamente hidrófilos son menos adecuados para desestabilizar las emulsiones W/O, debido a una cinética de relajación más lenta [46, 47].

La Figura 9, muestra las isothermas para películas formadas por mezclas de ácido esteárico (ACES) y asfaltenos del crudo Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco en diferentes relaciones molares (Asfaltenos : ACES). Todas las películas de las mezclas exhiben mayor compresibilidad que las sustancias individualmente [25, 26]. En este caso, a pesar de que el ácido no es un surfactante, es un anfífilo cuyas interacciones con los asfaltenos en la interfase aire – agua arrojan una información importante y en cierto modo análoga a lo que ocurre en mezclas asfaltenos – demulsificante.

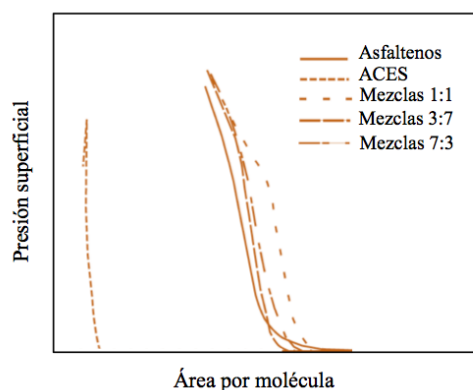


Figura 9: Isothermas presión superficial versus área molecular de la mezcla asfaltenos - ACES (ácido esteárico) en la interfase aire - agua (modificado de la referencia [26]).

La compresibilidad de la película está influenciada por la proporción empleada de la mezcla de asfaltenos y surfactante y la naturaleza del surfactante. En algunos casos cuando se utiliza un alto contenido de surfactante, se generan películas menos compresibles que las formadas por los asfaltenos puros, el área crítica y el área molecular son menores y la presión superficial crítica es mayor, por lo tanto, las películas son más rígidas. En consecuencia, el demulsificante debe emplearse en el petróleo sólo en determinadas concentraciones, ya que su sobredosificación puede ocasionar un efecto indeseado, disminuyendo su compresibilidad y causando un aumento de la estabilidad de las emulsiones [25, 26, 29, 45]. La adsorción del demulsificante en la interfase crudo – agua y la disminución de la tensión interfacial es una condición necesaria, pero no suficiente para que sea eficiente. La eficiencia de un demulsificante depende de la influencia que tiene sobre la rigidez y estabilidad de la película interfacial, así como de su capacidad para difundirse rápidamente a través del fluido para llegar a la interfase en las emulsiones W/O y lograr alcanzar su concentración efectiva, lo cual constituye una etapa crítica del proceso de deshidratación de crudo [46, 47].

4.2.6. *Adición de alcohol*

La presencia de moléculas de alcohol (2-propanol) en la película, debilita las interacciones entre las moléculas de asfaltenos y ocasiona un rearrreglo de las moléculas en la interfase, formándose agregados más grandes y una película interfacial menos rígida, lo que contribuye a desestabilizar las emulsiones W/O [30].

4.2.7. *Isotermas presión superficial versus área de películas de otras fracciones de petróleo*

Las resinas presentan un grado de asociación menor que el de los asfaltenos, debido a que sus interacciones moleculares son más débiles y la aromaticidad del disolvente solo produce pequeños cambios en sus estructuras de asociación. Las moléculas se empaquetan en áreas muy pequeñas y las películas formadas en la interfase aire – agua, son mucho más compresibles a altas presiones superficiales que las películas de

asfaltenos. A medida que se incrementa la presión superficial, las moléculas de resinas interactúan más entre ellas y puede ocurrir la formación de una multicapa [32, 20, 46, 33]. Las resinas no pueden estabilizar las emulsiones W/O porque las películas formadas no son suficientemente rígidas para evitar la coalescencia. Sin embargo, conocer las interacciones de los asfaltenos con las resinas es crucial para entender la estabilidad y rigidez de las películas interfaciales. La presencia de resinas reduce la adsorción de los asfaltenos y aumenta la compresibilidad de la película, lo que resulta en una menor rigidez [27, 33, 46].

Las moléculas de maltenos (mezcla de las fracciones Saturados, Aromáticos y Resinas) se empaquetan en áreas muy pequeñas sin alcanzar un estado condensado. Sus películas presentan la más alta compresibilidad (menor rigidez), el área por molécula más pequeña y forman multicapas al incrementar la presión superficial. Los maltenos muestran poca histéresis, posiblemente porque éstos tienen la más alta flexibilidad y sus películas después de la expansión pueden prácticamente recuperar su estado inicial [32, 20].

Las películas interfaciales del bitumen y los asfaltenos tienen características semejantes, lo que indica que en la interfase están presentes moléculas de naturaleza similar. La isoterma de una película de bitumen exhibe una presión superficial para un área de bandeja dada más alta que las películas de asfaltenos, este comportamiento se debe a la existencia de moléculas interfacialmente activas adicionales como las resinas. Las películas de bitumen se hacen más compresibles a medida que aumenta la aromaticidad del disolvente, presentan una gran histéresis y tienen un área por molécula intermedia entre los maltenos y los asfaltenos, debido a que la presencia de los maltenos probablemente impide la formación de grandes agregados de asfaltenos. El bitumen desasfaltado no genera películas interfaciales rígidas que formen emulsiones W/O estables [32, 20, 33].

5. Consideraciones Finales

La estabilidad de las dispersiones multifásicas (emulsiones y espumas) que se encuentran

en diversos procesos industriales depende de la formación y características de películas de tensoactivos en diferentes interfases. En la industria petrolera, buena parte de los problemas asociados a la producción y transformación de hidrocarburos involucran interfases líquido – líquido y líquido – gas generadas de manera natural o como producto de la aplicación de tecnologías y métodos de extracción.

La Bandeja de Langmuir es una técnica experimental que permite determinar las características de las películas formadas por los asfaltenos, las resinas y demás sustancias interfacialmente activas del crudo en diferentes interfases. Así mismo, es una herramienta para analizar el efecto de distintas variables sobre la rigidez de tales películas, lo que a su vez contribuye a establecer la función de estos compuestos en la persistencia de las emulsiones de agua en aceite (W/O), y así encontrar soluciones para evitar su formación o para inducir su ruptura a través de métodos físicos y químicos, reduciendo los costos de producción y refinación del petróleo.

6. Referencias

- [1] Raj Rajagopalan and Paul C Hiemenz. *Principles of colloid and surface chemistry*. Marcel Dekker, 1997.
- [2] Regine Klitzing and Hans-Joachim Müller. Film stability control. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 7(1-2):42–49, 2002.
- [3] A. Saniere. Definitions and specificities. In Huc Alain-Yves, editor, *Heavy Crude Oils From Geology to Upgrading and Overview*, chapter 2. Editions Technip, 2011.
- [4] V. H. Smith. Crude oil emulsions. In Howard B. Bradley, editor, *Petroleum Engineering Handbook*, chapter 19. Society of Petroleum Engineers, 1992.
- [5] Spiecker M. Kilpatrick P. Asphaltene emulsions. In J. Sjoblom, editor, *Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology*, chapter 30. Marcel Dekker, 2001.
- [6] H. W. Yarranton, D. M. Sztukowski, and P. Urrutia. Effect of interfacial rheology on model emulsion coalescence: I interfacial rheology. *Journal of Colloid and Interface Science*, 310(1):246–252, 2007.
- [7] H. W. Yarranton, P. Urrutia, and D. M. Sztukowski. Effect of interfacial rheology on model emulsion coalescence: II emulsion coalescence. *Journal of Colloid and Interface Science*, 310(1):253–259, 2007.
- [8] D Langevin, S Poteau, I Hénaut, and JF Argillier. Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation. *Oil & Gas Science and Technology*, 59(5):511–521, 2004.
- [9] Sunil Lalchand Kokal. Crude oil emulsions: A state-of-the-art review. *SPE Production & facilities*, 20(01):5–13, 2005.
- [10] K. S. Birdi. *Lipid and Biopolymer Monolayers at Liquid Interfaces*. Springer Science + Business Media, 1989.
- [11] G. L. Gaines. *Insoluble Monolayers at Liquid-Gas Interfaces*. Interscience Publishers, 1966.
- [12] P. Becher. *Emulsiones, teoría y práctica*. Blume, 1^{ra} edition, 1972.
- [13] Gennes P. G. De, F. Brochard-Wyart, and D. Quere. *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Springer, 2004.
- [14] KSV INSTRUMENTS LTD., Helsinki, Finland. *Langmuir and Langmuir-Blodgett Films. WHAT and HOW?* Application Note #107.
- [15] Drew Myers. *Surfaces, interfaces, and colloids*. Wiley–VCH, 2^{da} edition, 1999.
- [16] Patrycja Dynarowicz-Łątka, Anantharaman Dhana-balan, and Osvaldo N Oliveira Jr. Modern physicochemical research on langmuir monolayers. *Advances in Colloid and Interface Science*, 91(2):221–293, 2001.
- [17] K. S. Birdi. *Surface and colloid chemistry. Principles and applications*. CRC press, 2010.
- [18] Li Yan Zhang, Steven Lawrence, Zhenghe Xu, and Jacob H Masliyah. Studies of athabasca asphaltene langmuir films at air–water interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 264(1):128–140, 2003.
- [19] Marit-Helen Ese. Compressibilities and excess surface areas of mixed asphaltene/resin monolayers. influence of demulsifiers. *Journal of dispersion science and technology*, 20(7):1849–1859, 1999.
- [20] M. Elena Díaz, Francisco J. Montes, and Miguel A. Galán. Langmuir films of bitumen and its fractions extracted from oil shales (Puertollano, Spain). *Energy & Fuels*, 21(6):3455–3461, 2007.
- [21] Robert B. Long. *The Concept of Asphaltenes*, chapter 2, pages 17–27. 1981.
- [22] J. G. Speight. Petroleum asphaltenes. part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum: Pipeline transportation of heavy oils. *Oil & Gas Science and Technology*, 59(5):467–477, 2004.
- [23] J. Speight. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. CRC Press, 2010.
- [24] Imtiaz Adil and Brij B. Maini. Role of asphaltenes in foamy oil flow. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 46(4):18–23, 2007.
- [25] A. Rangel. Estudio de las películas de asfaltenos en la interfase aire – agua. Efecto de la adición de moléculas tensioactivas. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2009.
- [26] J. Delgado, Juan C. Pereirac, Andreina Rangela, Franklin Salazara, Mairis Guevaraa, Ana Forgiarinia, and Johnny Bullóna. Efecto de la adición de moléculas anfífilas sobre las propiedades de la película de

- asfaltenos en la interfase aire-agua. *Revista Ingenieria UC*, 19(2):16–24, 2012.
- [27] M-H Ese, X Yang, and J Sjöblom. Film forming properties of asphaltenes and resins. a comparative langmuir–blodgett study of crude oils from north sea, european continent and venezuela. *Colloid and Polymer Science*, 276(9):800–809, 1998.
- [28] M. D. Lobato, J. M. Pedrosa, A. R. Hortal, B. Martinez-Haya, R. Lebron-Aguilar, and S. Lago. Characterization and langmuir film properties of asphaltenes extracted from Arabian light crude oil. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 298(1-2):72–79, 2007.
- [29] Li Yan Zhang, Zhenghe Xu, and Jacob H Masliyah. Langmuir and Langmuir- Blodgett films of mixed asphaltene and a demulsifier. *Langmuir*, 19(23):9730–9741, 2003.
- [30] Li Yan Zhang, Robert Lopetinsky, Zhenghe Xu, and Jacob H Masliyah. Asphaltene monolayers at a toluene/water interface. *Energy & Fuels*, 4(19):1330–1336, 2005.
- [31] Jianjun Liu, Liyan Zhang, Zhenghe Xu, and Jacob Masliyah. Colloidal interactions between asphaltene surfaces in aqueous solutions. *Langmuir*, 22(4):1485–1492, 2006.
- [32] Alla Solovyev, Li Yan Zhang, Zhenghe Xu, and Jacob H. Masliyah. Langmuir films of bitumen at oil/water interfaces. *Energy & Fuels*, 20(4):1572–1578, 2006.
- [33] M. Sharath Chandra, Zhenghe Xu, and Jacob H. Masliyah. Interfacial films adsorbed from bitumen in toluene solution at a toluene- water interface: A Langmuir and Langmuir- Blodgett film approach. *Energy & Fuels*, 22(3):1784–1791, 2008.
- [34] Li Yan Zhang, Patrick Breen, Zhenghe Xu, and Jacob H. Masliyah. Asphaltene films at a toluene/water interface. *Energy & Fuels*, 21(1):274–285, 2007.
- [35] J. Orbulescu, O. C. Mullins, and R. M. Leblanc. Surface chemistry and spectroscopy of UG8 asphaltene langmuir film, part 2. *Langmuir*, 26(19):15265–15271, 2010.
- [36] Luis B. Gutiérrez, María A. Ranaudo, Bernardo Méndez, and Sócrates Acevedo. Fractionation of asphaltene by complex formation with p-nitrophenol. a method for structural studies and stability of asphaltene colloids. *Energy & Fuels*, 15(3):624–628, 2001.
- [37] Sócrates Acevedo, Optalí Escobar, Lorenzo Echevarria, Luis B. Gutiérrez, and Bernardo Méndez. Structural analysis of soluble and insoluble fractions of asphaltenes isolated using the PNP method. Relation between asphaltene structure and solubility. *Energy & Fuels*, 18(2):305–311, 2004.
- [38] Sócrates Acevedo, Alexandra Castro, Edgardo Vásquez, Francia Marcano, and María A. Ranaudo. Investigation of physical chemistry properties of asphaltenes using solubility parameters of asphaltenes and their fractions a1 and a2. *Energy & Fuels*, 24(11):5921–5933, 2010.
- [39] E. Mozes. Estudio de las películas de las fracciones A1 y A2 de asfaltenos en la interfase aire-agua. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2011.
- [40] James G. Speight. *Asphaltenes in Crude Oil and Bitumen: Structure and Dispersion*, chapter 8, pages 377–401. American Chemical Society, 1996.
- [41] Jhony Orbulescu, Oliver C. Mullins, and Roger M. Leblanc. Surface chemistry and spectroscopy of UG8 asphaltene Langmuir film, part 1. *Langmuir*, 26(19):15257–15264, 2010.
- [42] Joseph D. McLean and Peter K. Kilpatrick. Effects of asphaltene aggregation in model heptane–toluene mixtures on stability of water-in-oil emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 196(1):23–34, 1997.
- [43] Joseph D McLean and Peter K Kilpatrick. Effects of asphaltene solvency on stability of water-in-crude-oil emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 189(2):242–253, 1997.
- [44] Harvey W. Yarranton, Hisham Hussein, and Jacob H. Masliyah. Water-in-hydrocarbon emulsions stabilized by asphaltenes at low concentrations. *Journal of Colloid and Interface Science*, 228(1):52–63, 2000.
- [45] M. Dagert. Efecto de la adición de moléculas tensioactivas y de la naturaleza del solvente sobre interfases aire-agua estabilizadas por asfaltenos. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2012.
- [46] Marit-Helen Ese, Laurence Galet, Daniele Clausse, and Johan Sjöblom. Properties of langmuir surface and interfacial films built up by asphaltenes and resins: influence of chemical demulsifiers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 220(2):293–301, 1999.
- [47] Y. Tatá. Ruptura química de emulsiones W/O estabilizadas por asfaltenos. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2012.

Breve reseña de los autores

Yasmin Tatá: Ingeniero Químico. Profesor Instructor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes. Investigadora adscrita al Laboratorio FIRP-ULA. yasmint@ula.ve

Franklin Salazar: Ingeniero Químico, MSc, estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas de la Facultad de Ingeniería ULA. Profesor Agregado de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes, Investigador adscrito al Laboratorio FIRP. ULA. fsalazar@ula.ve

Ana Forgiarini: Ing. Químico. Doctorado. Profesora Titular de la Escuela Básica de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Directora Adjunta del Lab FIRP-ULA. anafor@ula.ve

José Gregorio Delgado Linares. Ingeniero Químico, Doctorado en Ciencias Aplicadas. Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes. Investigador adscrito al Laboratorio FIRP-ULA. Profesor invitado en el Centro de Hidratos de gas, Escuela de Minas, Colorado. Estados Unidos. josedel@ula.ve

Johnny Bullón: Ingeniero Químico, Doctorado en Procesos de Separación, Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes. Director del Laboratorio FIRP-ULA. jbullon@ula.ve

Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (Lab FIRP-ULA), es un laboratorio de investigación y desarrollo de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes. Fundado por el Prof. Jean Louis Salager en 1978. Entre sus líneas de investigación están el estudio de los surfactantes y aplicaciones, micro, macro y nanoemulsiones, sistemas dispersos en general, deshidratación de crudo, transporte emulsionado, recuperación mejorada de petróleo, ligninas y derivados, nuevos surfactantes, procesos de separación mediante membranas. www.firp.ula.ve

Ultra wideband antennas for communications systems on microwave frequency bands: A review

Andry Contreras* y Maryory Urdaneta

Departamento de Circuitos y Comunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela

Abstract.- The purpose of this work is to characterize ultra wideband (UWB) antennas for communications systems on the microwave frequency bands, according to their technical and structural parameters. A documental review of more than one hundred articles of UWB antennas for this band was carried out. Regarding the characterization of UWB antennas, the results showed these have a good performance on a frequency range different to the conventional band. The PRMA and the feed method of microstrip line with a FR4-epoxy substrate have been the most used between the planar UWB antennas. The radiation pattern can be modified using different techniques that change the shape of the antenna. Vivaldi antennas showed the biggest mean value of gain while PSMA have the smallest mean value. Additionally, there is an important deviation in the maximum gain obtained. In conclusion, there are not criteria to select between the UWB antenna configurations. Future researches could be conducted to set up these criteria, and optimize UWB antennas with different methods to obtain an omnidirectional radiation pattern in the monopolar antennas and decrease the gain variance.

Keywords: ultra wideband antennas; antennas characterization; microwave bands.

Antenas de banda ultra ancha para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas: Una revisión

Resumen.- En este artículo se presenta una revisión de las características técnicas y estructurales de las antenas de banda ultra ancha (UWB) para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas. Se revisaron más de cien artículos en los últimos diez años acerca de antenas UWB para las bandas antes mencionadas. Entre los resultados se obtuvo que las antenas UWB presentaron un buen desempeño en un rango de frecuencia distinto a su banda convencional. Existe una variedad de configuraciones de antenas UWB planares, entre las que destacan la PRMA y la alimentación con línea de microcinta con sustrato FR4-epoxy como las más utilizadas. El patrón de radiación se puede modificar aplicando distintas técnicas que cambien la estructura de la antena. Las antenas Vivaldi presentaron el mayor valor promedio de ganancia mientras que las PSMA tienen el menor valor promedio. Adicionalmente, existe una variación considerable en la ganancia máxima obtenida. Se concluyó que no existen criterios para seleccionar entre las configuraciones de antenas UWB. Por consiguiente, las perspectivas futuras estarán orientadas a establecer dichos criterios y optimizar las antenas UWB con distintos métodos para obtener un patrón de radiación omnidireccional en las antenas monopolares y disminuir la varianza de la ganancia.

Palabras claves: antenas de banda ultra ancha; caracterización de antenas; banda de microondas.

Recibido: abril 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

El desarrollo de las telecomunicaciones ha sido vertiginoso en las últimas décadas, debido al diseño de una serie de sistemas con el fin de intercambiar información para la comunicación,

el control de procesos, monitoreo de fenómenos físicos, entre otros [1, 2, 3]. Además, este desarrollo está acompañado por el aumento en la cantidad de abonados o usuarios de estos sistemas [4, 5].

Actualmente, los sistemas de comunicaciones ofrecen más servicios y requieren mayores tasas de transmisión para el intercambio de información, como por ejemplo la telefonía móvil. Dicho intercambio debe ser lo más rápido posible, disponer de una conexión en tiempo real y brindar las mejores prestaciones de los servicios de la tecnología determinada [6].

*Autor para correspondencia: Andry Contreras acontreras@fing.luz.edu.ve

Dentro los sistemas de mayor crecimiento, destacan los que emplean una transmisión inalámbrica o por el espacio libre [5], los cuales presentan un conjunto de retos para poder establecer una conexión, tales como, volumen de tráfico, costos, energía, diseño de elementos pasivos, interferencia mutua entre sistemas de comunicaciones o componentes de éste, entre otros. Estos retos deben tomarse en cuenta al momento del diseño del sistema [6, 7, 8].

Los sistemas de transmisión inalámbricos tienen un componente crucial que determina su rendimiento. Dicho componente es la antena, que es un dispositivo transductor que adecúa las señales de información al medio de propagación [9]. Actualmente, existen varios tipos de antenas y su utilización depende del rango de frecuencia de operación, tamaños, patrón de radiación, adaptabilidad a la aplicación, entre otros requerimientos [10, 11, 12].

Entre esa variedad de antenas, una que se adapta a los requerimientos de los sistemas de comunicación actuales es la antena de banda ultra ancha (Ultra WideBand, UWB), ya que con ella se obtienen altas velocidades de transmisión y gran capacidad del canal, además consumen poca potencia y presentan bajo costo [13, 14]. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes que radican en el riesgo de interferencia con los otros servicios de radio enlaces debido a que UWB opera en un rango amplio del espectro electromagnético, desde 3,1GHz a 10,6GHz[15].

Para el diseño de las antenas UWB se emplea principalmente la estructura de microcinta puesto que tiene un alto grado de adaptabilidad con los tipos de antenas que operan en el rango de frecuencia de microondas [16] como es el caso de las UWB. Con la utilización de microcinta se puede obtener tamaños más pequeños, bajos costos, alto rendimiento, fácil instalación y se integra con la placa de circuitos impresos (Printed Circuit Board, PCB) [17, 18, 19].

No obstante, los diseños realizados en microcinta presentan retos que radican en el comportamiento de sus componentes en el rango de la frecuencia de microondas. Dichos componentes deben modelarse como elementos distribuidos, no concentrados,

debido a que sus tamaños son similares a la longitud de onda de operación. Además, pueden presentarse fenómenos físicos como la resonancia y efectos de acoplamiento entre componentes [18, 19].

Una manera de resolver el inconveniente en el diseño es utilizar técnicas computacionales para resolver las ecuaciones de Maxwell, las cuales explican el fenómeno de la propagación en las antenas [20, 21]. Entre los métodos computacionales numéricos para el diseño de los componentes del sistema están: el Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM); el Método de los Momentos (Method Of Moments, MoM); y el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (Finite-Difference Time-Domain method, FDTD) [22, 23].

Junto con el empleo de métodos computacionales numéricos para el diseño, se presentan métodos de optimización que permiten mejorar la respuesta o el comportamiento de las antenas diseñadas para ajustarse mejor a los requerimientos específicos de los sistemas [21]. Existen una gran variedad de métodos de optimización que son empleados en las distintas configuraciones de las antenas UWB para realizar su diseño.

Con las antenas UWB es posible rechazar bandas de frecuencias dentro del rango de operación, para así evitar interferencia con otros sistemas de comunicaciones que operen en este rango de frecuencia. Para ello, se emplean bandas marcadas (band notched) mediante la implementación de varias técnicas que modifican al elemento radiante del parche o al plano de referencia. Éstas presentan inconvenientes al momento de su diseño para obtener una alta eficiencia del rechazo de banda debido a la dificultad de control de su ancho de banda en un espacio limitado [24].

En este orden de ideas, el objetivo del presente artículo es caracterizar las antenas UWB para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas, en función de sus parámetros técnicos y estructurales, lo cual permitirá identificar aspectos relevantes en el empleo de las distintas configuraciones de antenas y sugerir temas para investigaciones futuras que contribuyan con el desarrollo de esta área. Para ello, se realiza una revisión documental de artículos de investigación

originales, trabajos presentados en conferencias y simposios, entre otros.

El artículo está organizado de la manera siguiente: En la Sección 2 se especifican los parámetros estructurales, tales como las configuraciones de las antenas, las modificaciones de las estructuras convencionales y los métodos de optimización empleados en el diseño para mejorar el desempeño de las antenas. En la Sección 3 se caracterizan los parámetros técnicos como los métodos de alimentación, el ancho de banda, el patrón de radiación y la ganancia en las configuraciones de antenas UWB. En la Sección 4 se finaliza con las conclusiones de la caracterización y los planteamientos de trabajos futuros en esta área de investigación.

2. Antenas de banda ultra ancha

La banda ultra ancha fue establecida por la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (Federal Communications Commission, FCC), en la cual se especificó tres tipos de sistemas UWB: radar para vehículos, sistemas de comunicaciones UWB y sistemas de imágenes, cuyo rango de frecuencia abarca desde 3,1 a 10,6 GHz [15], [23]. Una antena es considerada UWB cuando cumple con dos condiciones. La primera, es que el ancho de banda fraccional (FB) entre puntos a -10dB es mayor o igual que el 20 %, valor que se calcula mediante la Ecuación (1), donde f_H es la frecuencia mayor y f_L la frecuencia menor a -10dB . La segunda, es que el ancho de banda absoluto (B) (Ecuación (2)) es mayor o igual que 500MHz, independientemente de la frecuencia central [14], [25].

$$FB = \frac{f_H - f_L}{(f_H + f_L)/2} 100\% \geq 20\%, \quad (1)$$

$$B = f_H - f_L \geq 500\text{MHz}. \quad (2)$$

2.1. Configuraciones de las antenas de banda ultra ancha

En esta revisión, se caracterizan las antenas de banda ultra ancha diseñadas en los últimos años para aplicaciones en sistemas de comunicaciones de la banda de microondas. En las configuraciones

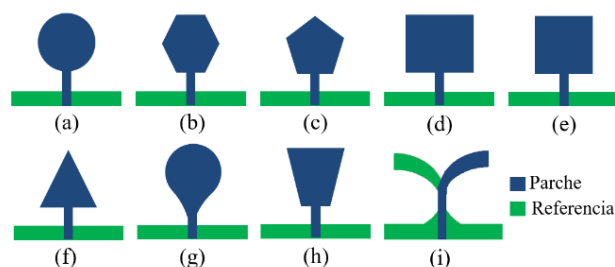


Figura 1: Configuraciones base de antenas de banda ultra ancha

de las antenas se emplean la técnica de circuitos impresos, es decir, antenas planares. Esto es debido a las ventajas que ofrece dicha técnica, las cuales fueron descritas en el apartado anterior. Entre las configuraciones planares destacan: (ver Figura 1)

- (a) Antena monopolo con círculo impreso (Printed Circular Monopole Antenna, PCMA),
- (b) Antena monopolo con hexágono impreso (Printed Hexagonal Monopole Antenna, PHMA),
- (c) Antena monopolo con pentágono impreso (Printed Pentagonal Monopole Antenna, PPMA),
- (d) Antena monopolo con rectángulo impreso (Printed Rectangular Monopole Antenna, PRMA),
- (e) Antena monopolo con cuadrado impreso (Printed Square Monopole Antenna, PSMA),
- (f) Antena monopolo con triángulo impreso (Printed Triangle Monopole Antenna, PTMA),
- (g) Antena monopolo con cono impreso (Printed Tapered Monopole Antenna, PTaMA),
- (h) Antena monopolo con trapecio impreso (Printed Trapezoidal Monopole Antenna, PTrMA),
- (i) Antena Vivaldi.

En la Figura 2 se aprecia la cantidad de antenas diseñadas en función de su configuración, la tendencia en el diseño de las antenas ha sido la PRMA [19], [27]–[63], la PCMA [42, 43], [62]–[85], PSMA [86]–[97], la Vivaldi [98]–[106], la PTMA [107]–[110], la PHMA [110, 112, 113], la

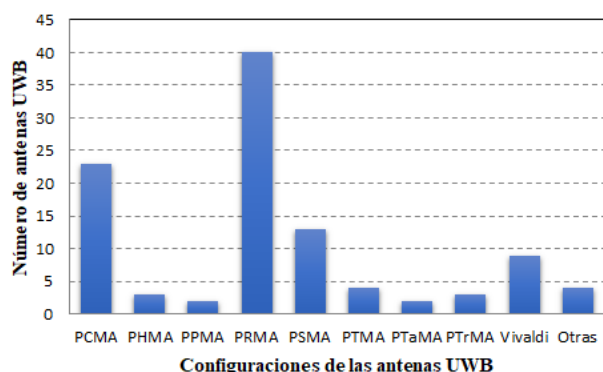


Figura 2: Número de antenas UWB diseñadas en función de su configuración

PTrMA [114, 115, 116], la PTaMA [117, 118], la PPMA [119, 120] y Otras [121]–[124], de manera descendente. Cabe destacar que la configuración denominada como Otras, agrupa la antena de lazo con estructura de Alford [121], ranurada cónica lineal [122], log-periódica [123] y ramal [124].

La configuración más utilizada es la PRMA, con una cantidad de casi el doble con respecto a la segunda más usada (PCMA). Cabe destacar que, no se evidenció ningún criterio de selección entre las configuraciones por parte de los autores. De esta manera, se observa que existe un campo abierto para establecer criterios de selección y caracterizar el rendimiento del resto de configuraciones de antenas planares empleadas en diversos servicios de comunicaciones.

La mayor parte de las configuraciones motivo de revisión se han diseñado en antenas simples. Sin embargo, también se han empleado agrupaciones en arreglos de 1×2 o 1×4 antenas en las configuraciones PRMA [37] y Vivaldi [101, 102, 105]. Adicionalmente, se ha usado la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) en las antenas PRMA [27, 31, 32], [38]–[41], [45, 47, 49, 52, 53, 54, 56, 57, 60, 63], PCMA [65, 70, 71, 73, 83], PSMA [87] y ramal [124]. El propósito de emplear los arreglos de antenas es modificar el patrón de radiación o aumentar la ganancia; en cambio el uso de la tecnología MIMO es para transmitir a mayores tasas de información y cubrir mayores distancias.

Las antenas planares están constituida por un material conductor y otro dieléctrico. El primero es generalmente de cobre, en cambio el segundo puede variar dependiendo del valor de permitividad eléctrica requerida por el diseñador de la antena. Para el sustrato, se han empleado el compuesto de FR4-epoxy en la mayoría de las antenas UWB diseñadas, debido a su alto valor de permitividad eléctrica que permite una mayor reducción de las dimensiones de la antena. También destacan, sustratos basados en teflón o PTFE (PoliTetraFluoroEtileno), que puede estar reforzado con fibra de vidrio y en algunos casos con cerámico orgánico, todo ello para disminuir las pérdidas en el dieléctrico. Cabe destacar el diseño de una antena de banda ultra ancha novedosa, en la cual se empleó poliéster punzado para el sustrato y acero inoxidable para el conductor, materiales flexibles para su uso en textiles [108].

2.2. Modificaciones en la estructura de las antenas de banda ultra ancha

La estructura de las configuraciones motivo de la revisión está constituida por las distintas formas del parche radiante y del plano de referencia, su modificación depende del propósito que se requiera. Para ello, se aplican técnicas para mejorar diversos parámetros del desempeño de la antena de banda ultra ancha. Entre las técnicas empleadas en la modificación en la estructura de las antenas UWB destacan: usar ranuras en los planos (Figura 3 a), elementos parásitos (Figura 3 b), estructura fractal (Figura 4 a), superficie reflectora (Figura 4 b), resonadores (Figura 5 a), diodos PIN (Figura 5 b) y arreglos de antenas (Figura 6). Las técnicas que modifican la estructura de la antena se realizan para distintos propósitos. En la Tabla 1 se registran las finalidades de las modificaciones en las antenas y las técnicas empleadas. Para mejorar el acoplamiento de impedancia se agregan elementos parásitos en el plano de referencia con formas de T, Y, π , entre otras. Adicionalmente, se puede eliminar material conductor en el parche radiante o en el plano de referencia con diversas formas de ranuras, y aplicar estructuras fractales en el parche resonante. Al mejorar este parámetro, se consigue una máxima transferencia de potencia,

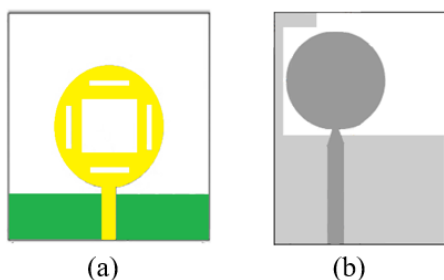


Figura 3: a) Antena UWB con ranuras en los planos [81] y b) de elementos parásitos [85]

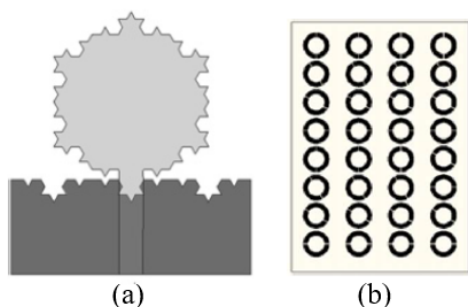


Figura 4: a) Antena UWB con estructura fractales [112] y b) con superficie reflectora [75]

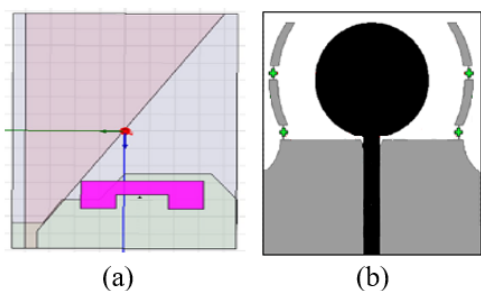


Figura 5: a) Antena UWB con resonadores [109] y b) con diodo PIN [76]

por ende se disminuyen las pérdidas de retorno en el rango de frecuencia de resonancia.

Las modificaciones que permiten un ajuste de la ganancia de la antena se realizan para obtener un mayor valor de ganancia o para mantener lo más uniforme posible dicho valor en el rango de frecuencia de diseño. En el primer caso, se logra mediante la agrupación en arreglos, la colocación de superficies reflectoras y el uso de

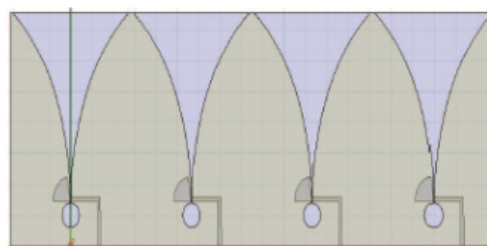


Figura 6: Arreglo de antenas UWB [102]

Tabla 1: Finalidad de la modificación en la estructura de las antenas UWB

Finalidad	Técnica	Referencia
Mejora del acoplamiento de impedancias	Ranura en los planos	[28], [30], [31], [33], [39], [41], [50], [57], [67], [89], [91], [94], [103], [115], [120]
	Elementos parásitos	[31], [45], [91]
	Estructura fractal	[66]
Ajuste de la ganancia	Ranura en los planos	[33], [37], [88], [89], [105]
	Superficie reflectora	[51], [69], [75]
	Arreglo de antenas	[37], [102]
Cambio del patrón de radiación	Elementos parásitos	[76]
	Superficie reflectora	[42]
	Uso de diodos PIN	[76]
Reduce el tamaño de la antena	Arreglo de antenas	[37]
	Ranuras en los planos	[31], [32], [34], [37], [61], [88], [97], [115], [120]
	Elementos parásitos	[31], [32], [34]
Adapta las bandas resonantes	Estructura fractal	[19], [29], [33], [36], [38], [43], [46], [47], [54], [55], [57]–[60], [64], [65], [73], [77], [78], [80], [81], [90], [92], [93], [95], [96], [100], [108], [111], [113], [117], [118]
	Elementos parásitos	[35], [38], [41], [47], [53], [62], [77], [79], [93], [96], [106], [109], [110]
	Estructura fractal	[72], [112]
	Agregar resonadores	[56], [93], [109], [110]

ranuras en los planos de la antena, obteniendo un incremento máximo de 6 dB, 5,5 dB y 5 dB respectivamente [37, 51, 69, 75, 103, 105]. Mientras que en el segundo caso, se utilizan ranuras rectangulares en el parche resonante con una variación de ganancia entre 1,28 dB y 3 dB [33, 37, 88, 89].

Cuando se requiere modificar el patrón de radiación de omnidireccional a direccional, se

emplea la técnica de los elementos parásitos en el plano de referencia, junto con diodos PIN que son controlados para seleccionar la zona de radiación de la antena dependiendo de su activación [76]; además, se utiliza una superficie reflectora ubicada detrás del plano de referencia [42] y agrupaciones de antenas cuyo patrón es omnidireccional[37]. Para la reducción del tamaño de la antena, adicional al tipo de material del sustrato, principalmente se usan ranuras y elementos parásitos con varias formas geométricas en ambos planos de antena, y en algunos casos estas ranuras están ordenadas bajo un comportamiento fractal. El porcentaje de reducción del tamaño registrado en las antenas UWB diseñadas comprende desde 18 % hasta 60 %, con la finalidad de obtener una antena compacta y portátil.

En cuanto a la adaptación de las bandas resonantes, abarca desde la eliminación con bandas marcadas hasta la inclusión de bandas resonantes para incrementar el ancho de banda de la antena UWB. Para ello, se emplean ranuras y elementos parásitos en forma de C [29, 43, 54, 60, 95], T [19, 41, 56, 57, 73, 79, 113, 124], U [27, 36, 37, 41, 55, 80, 88, 89] entre otras, colocadas en los planos. Las ranuras pueden ordenarse en estructuras fractales en el parche radiante y en el plano de referencia. Adicionalmente, en la antena se usa la técnica de agregar resonadores cercanos o dentro del parche resonante, para eliminar bandas resonantes mediante la degradación del desempeño de la antena en la banda marcada, es decir, que el elemento se comporta como un filtro rechaza banda. En el diseño de Rajeshkumar y Raghavan [114], se utilizó un diodo PIN en el resonador para controlar la habilitación de la banda marcada.

Las antenas UWB diseñadas con bandas marcadas rechazan, en su mayoría, un sistema. Aunque en algunos diseños, rechazan dos [47, 55, 56, 59, 90, 93, 96, 106], tres [29, 60, 113] o cuatro [64] sistemas de comunicaciones. En la Figura 7 se aprecia como el sistema WLAN a 5GHz (IEEE 802.11a) representa el servicio con mayor cantidad consideraciones como una banda marcada, seguida por el servicio de WiMAX (IEEE 802.16), la Banda X de subida y bajada utilizada

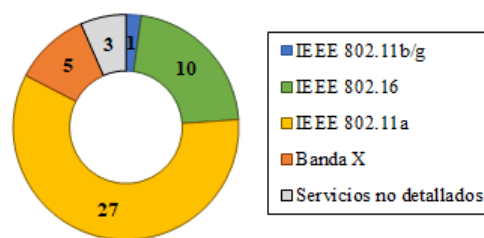


Figura 7: Cantidad de antenas UWB con bandas marcadas en función del servicio que rechaza

para aplicaciones de comunicaciones satelitales, y otros servicios como el WLAN a 2,4GHz (IEEE 802.11b/g). Esto indica que actualmente existen servicios en los que se han utilizado poco las antenas UWB con bandas marcadas, por lo cual es necesario caracterizar estas antenas en dichos servicios.

2.3. Métodos de optimización empleados en las antenas de banda ultra ancha

Solo en el 17,48 % de antenas UWB revisadas se aplicaron métodos de optimización en su diseño, para obtener un mejor rendimiento. Los métodos empleados en los últimos años para la optimización de antenas son: el algoritmo genético (Genetic Algorithm, GA) [78, 86, 88, 89, 112], el enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO) [46, 58, 95, 121], la optimización basada en sustituto (Surrogate-Based Optimization, SBO) [31, 32, 43, 45, 85, 115] y el diseño factorial fraccional (Fractional Factorial Design, FFD) [33, 36, 95]. Estos métodos se han empleado ya que no se cuenta con un modelo matemático que defina el parámetro a optimizar de la antena UWB, y para reducir los tiempos de respuesta óptima en comparaciones con métodos tradicionales o basados en gradiente.

El método FFD es un método probabilístico, basado en el análisis de varianza que tienen los datos simulados de algún parámetro de interés a optimizar, para así determinar la solución óptima. Por otra parte, los métodos GA, PSO y SBO son del tipo heurístico, y se fundamentan en la experiencia de los individuos, partículas o modelos sustitutos respectivamente, para resolver un problema de diseño. Los métodos heurísticos

presentan variantes en su procedimiento debido a su naturaleza, estas variantes buscan disminuir el costo computacional y mejorar criterios de convergencias.

Las variantes del método GA usadas en el proceso de optimización de antenas son la evolución diferencial (Differential Evolution, DE) que presenta una buena robustez y una rápida convergencia [78, 86], y el algoritmo evolutivo de Pareto (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2) que incorpora una técnica de estimación de densidad de vecinos para guiar la búsqueda de manera eficiente [88, 89]. A su vez el método SBO presenta una variante, la cual se denomina optimización basada en característica (Feature-Based Optimization, FBO), el cual tiene una convergencia más rápida mediante la reformulación del problema original en función de sus características de respuesta [85].

Con respecto a los métodos PSO, se emplearon la Optimización de Enjambre de Partículas con Aprendizaje Integral Adaptativo (Adaptive Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization, A-CLPSO) que equilibra el rendimiento de los modelos para la mejor partícula para los problemas multi-objetivos [58], el BPSO o PSO binario en donde se discretiza el espacio de solución y la partícula para que el método sea más rápido ya que decide entre los bits lógicos binarios [95], y la Optimización por enjambre de partículas con un despacho de vecindad (PSO with a Neighborhood-Redispatch, NR-PSO) que aplica una estrategia de búsqueda global para evitar convergencias prematuras de la solución del problema [46].

La función objetivo depende predominante del valor simulado de la pérdida de retorno [31, 32, 43, 45, 58, 58, 85, 86, 89, 95, 115, 121], la cual es utilizada para ajustar el ancho de banda de la antena. Otras funciones dependen de la ganancia [33, 36, 88], la relación de onda estacionaria [36, 46], el factor de fidelidad [33], la pérdida de error de fase [122] y el tamaño de la antena [31, 32, 45, 115].

La optimización se ha realizado con uno o múltiples objetivos; mientras mayor sea el número de objetivos mayor es el procesamiento computacional. Sin embargo, se ha demostrado que

necesario utilizar funciones multi-objetivos para lograr un diseño idóneo, dado que al optimizar funciones mono-objetivo, se cumple el criterio del diseño, pero el dispositivo pudiera interferir con otro sistema o presentar inconvenientes en su desempeño.

Las variables del espacio de solución son discretas o continuas, dependiendo si el proceso es para una optimización topológica o de forma, respectivamente. Dichas variables son las dimensiones del parche radiante, de las ranuras y de los elementos parásitos en el parche resonante y en el plano de referencia.

3. Parámetros técnicos de las antenas de banda ultra ancha

En esta sección se analizan los parámetros técnicos de las antenas de banda ultra ancha, tales como el método de alimentación, el ancho de banda, el patrón de radiación y los valores de ganancia máxima obtenidas en las antenas planares motivo de revisión, con la finalidad de caracterizar el desempeño de las antenas.

3.1. Método de alimentación

Para las antenas planares se pueden usar distintos tipos de alimentadores: la línea de microcinta, la guía de onda coplanar (coplanar waveguide, CPW), la sonda coaxial y acople por proximidad. El método de línea de microcinta (Figura 8 (a)) presenta una mejor adaptación a la fabricación de circuitos impresos que el resto de métodos. El método CPW (Figura 8 (b)) proporciona mayor ancho de banda que la línea de microcinta [84] y baja pérdida en altas frecuencias [66], pero su valor de permitividad eléctrica efectiva es menor que con la línea de microcinta, tomando en cuenta un mismo material de sustrato. Cuando se usa la sonda coaxial (Figura 8 (c)), la fabricación de la antena es más costosa y se pueden radiar ondas electromagnéticas en direcciones no deseadas. De igual manera ocurre con el método de acople por proximidad (Figura 8 (d)), su fabricación no es fácil ni económica en comparación con el resto de métodos, pero elimina radiación no deseada.

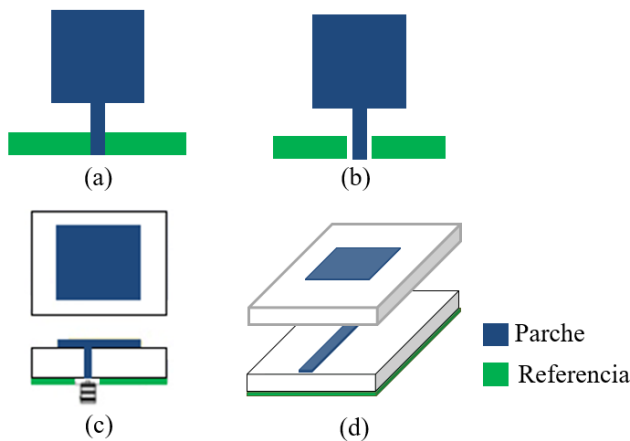


Figura 8: Antena PSMA con distintos tipos de alimentador

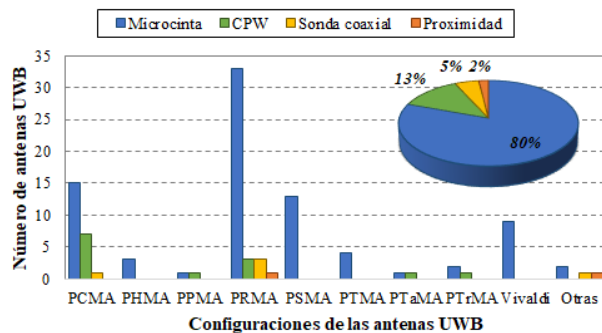


Figura 9: Número de antenas UWB diseñadas según su tipo de alimentador

La Figura 9 muestra como el alimentador del tipo de línea de microcinta fue utilizado en un 80% con respecto al resto y fue empleada en todas las configuraciones de antenas UWB [19], [27]–[33], [35]–[43], [45, 47, 48, 50, 51, 52], [54]–[58], [60, 61, 63], [67, 70, 71], [73]–[76], [78, 79, 80], [82, 83], [85]–[88], [90]–[100], [102]–[115], [118, 119, 122, 124]. El método CPW fue usado en un 13 %, en las configuraciones PCMA, PPMA, PRMA, PTaMA y PTrMA [34, 46, 59, 64, 66, 72, 77, 81, 84, 116, 117, 120]; la sonda coaxial se aplicó en 5 % en las configuraciones PCMA, PRMA y Otras [44, 53, 62, 65, 121]; mientras que el acople de proximidad un 2 % en PRMA y Otras [42, 123]. La línea de microcinta ha sido la más usada porque las antenas son de fácil fabricación y permite mantener un valor de

permitividad eléctrica eficiente alto, lo cual reduce el tamaño de la antena, a pesar de su moderado valor de pérdida.

3.2. Ancho de banda

Los sistemas de banda ultra ancha abarcan desde 3,10 a 10,6 GHz, es decir, un ancho de banda igual a 7,5GHz. Sin embargo, en la Figura 10 se observa que las antenas UWB revisadas, en su mayoría no se limitan a este rango ya que dependen del ancho de banda de los servicios que se deseen captar, dando la posibilidad de agrupar dos o más sistemas de comunicaciones. La variación del ancho de banda para las configuraciones PCMA, PHMA, PPMA, PRMA, PSMA, PTMA, PTaMA, PTrMA, Vivaldi y Otras está entre 2,9–13,0 GHz, 3,2–14,7 GHz, 7,5–10,5 GHz, 2,0–14,9 GHz, 1,0–18,7 GHz, 6,0–9,0 GHz, 7,5–9,9 GHz, 3,1–7,5 GHz, 2,4–16,0 GHz, 2,0–19,0 GHz respectivamente.

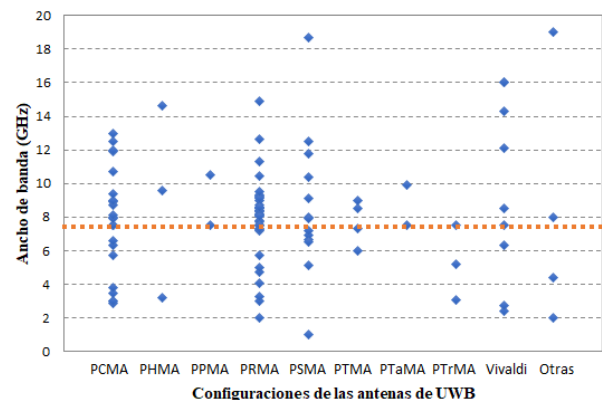


Figura 10: Ancho de banda de las configuraciones de antena UWB

Las antenas UWB diseñadas abarcan más servicios que las aplicaciones típicas, es decir, sistemas de comunicaciones UWB, radares para vehículos y sistemas de imágenes. La lista de servicios distintos a los típicos está registrada en la Tabla 2, en la cual se mencionan en función de la configuración de las antenas. Dichos servicios son los sistemas de comunicaciones móviles (CDMA, UMTS, PCS, GSM y LTE), redes inteligentes, redes inalámbricas para internet (WPAN, WBAN, WLAN y WiMAX), sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas satelitales y aplicaciones

Tabla 2: Rango de frecuencia y aplicaciones de las configuraciones de antenas UWB

Configuración	Rango (GHz)	Servicios distintos a los UWB	Referencias
PCMA	1,50-20,00	Redes inteligentes, satelitales, WiMAX, WLAN (2,4GHz), WPAN y WBAN	[42, 43], [64]–[85]
PHMA	1,80-19,41	Satelitales y WiMAX	[111, 112, 113]
PPMA	1,50-12,00	GSM y WiMAX	[119, 120]
PRMA	0,84-18,00	CDMA, WPAN, WBAN, WLAN (2,4/5GHz), WiMAX y satelitales	[19]–[63]
PSMA	2,26-22,50	WLAN (2,4GHz) y WPAN	[86]–[97]
PTMA	1,40-11,60	GPS, WLAN (2,4GHz), UMTS y PCS	[107]–[110]
PTaMA	2,20-12,10	–	[117, 118]
PTrMA	1,96-10,60	WLAN (2,4/5GHz) y WiMAX	[114, 115, 116]
Vivaldi	1,10-20,00	Satelitales y aplicaciones militares LTE, WiMAX, WLAN	[98]–[106]
Otras	1,76-25,00	(2,4/5GHz) y satelitales	[121]–[124]

militares. Las configuraciones PCMA y PRMA tienen mayores cantidades de servicios cubiertos.

Adicionalmente, en la Tabla 2 está el rango de frecuencia para las configuraciones de antenas UWB, el cual abarca parte de la banda de frecuencia UHF y las bandas de microondas desde la L hasta la K. De esta manera, dichas antenas operan en un rango mayor al establecido para los sistemas UWB, en todas sus configuraciones.

3.3. Patrón de radiación

La radiación de las antenas en función de las diversas direcciones en el espacio puede ser omnidireccional o direccional. En la primera, se presenta simetría de revolución en torno al eje, mientras que en la segunda, las antenas son capaces de concentrar la mayor parte de la energía radiada de manera localizada. En algunos casos, el patrón de radiación omnidireccional no presenta un comportamiento simétrico en todas las direcciones, dando origen al patrón cuasi-omnidireccional o cercano al omnidireccional. De

las antenas UWB que son motivo de la revisión, un 50 % son omnidireccionales [19, 28, 30, 33, 34], [42, 43, 46, 48, 50], [55, 59], [61], [72, 77, 79], [82, 90], [93, 94, 96, 97], [109], [113, 114, 117, 118, 120, 121]; un 33 % son cuasi-omnidireccionales [27, 35], [37, 38, 39], [41, 44, 47, 49], [52, 53, 56, 57, 58, 60], [63]–[68], [70], [73]–[76], [78, 80, 81, 83, 84, 84, 88, 91, 92], [107, 108, 110, 112, 116, 119], [123, 124], y un 17 % son direccionales [37, 42, 51, 69, 76, 98, 99, 100], [102]–[116], [111, 122], tal como se observa en la Figura 11.

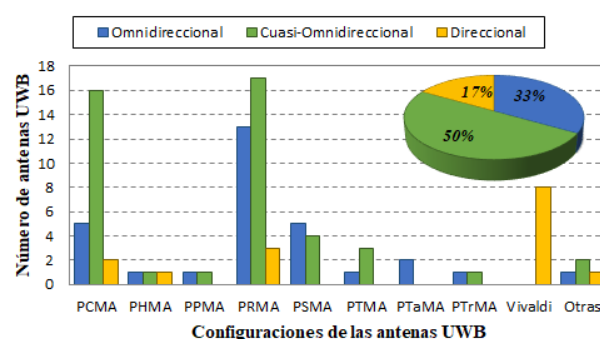


Figura 11: Número de antenas UWB diseñadas según su patrón de radiación

Las configuraciones que presentan un patrón completo o cercano al omnidireccional son la PCMA, PHMA, PPMA, PRMA, PSMA, PTMA, PTaMA, PTrMA y Otras. En los casos de cuasi-omnidireccionales, se debe mejorar el comportamiento mediante el empleo de métodos de optimización para adecuar las modificaciones de la estructura de la antena y evitar esas distorsiones en el patrón de radiación. Con respecto a la radiación direccional, se presenta en configuraciones como Vivaldi, PCMA, PHMA, PRMA y Otras. Galvan *et al* [23] establece que las antenas Vivaldi en frecuencias menores a 5 GHz tienen un patrón cuasi-omnidireccional. Sin embargo, se ha logrado un patrón direccional en dichas frecuencias [98]–[106]. En el resto de los casos con patrón direccional, esto se consigue agregando superficies reflectoras, elementos parásitos y diodos PIN, o agrupando en arreglos de antenas para transformar el patrón de omnidireccional a direccional.

3.4. Ganancia

La ganancia es una relación entre la concentración de la potencia en las zonas indicadas en el diagrama de radiación y la densidad de potencia de una antena isotrópica. La Figura 12 muestra los valores de ganancia máxima para cada configuración de antena UWB revisada. En dicha figura se detecta que la configuración con mayor valor de ganancia máxima es la Vivaldi, que presentan un patrón de radiación direccional con una mayor concentración de potencia. Además, las antenas Vivaldi diseñadas superaron su valor típico de 10 dBi. Para el resto de configuraciones, su valor de ganancia se mantiene en niveles similares.

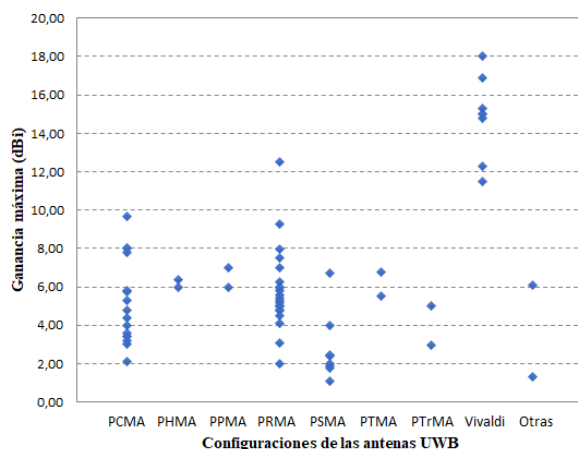


Figura 12: Ganancia máxima de las configuraciones de antena UWB

Los rangos de ganancia máxima y valores promedios para las configuraciones de antena UWB se registran en la Tabla 3, en donde se observa que la configuración PSMA presenta menor valor promedio de ganancia máxima obtenida con respecto al resto de antenas UWB. Por consiguiente, se pueden diseñar antenas PSMA para mejorar su desempeño en términos de la ganancia que ofrecen. Adicionalmente, se aprecia un amplio rango de valores para las antenas UWB PRMA, en las cuales se pueden aplicar métodos de optimización para uniformizar su ganancia máxima.

Tabla 3: Valores de ganancia máxima para las configuraciones de antenas UWB

Configuración	Ganancia máxima (dBi)		Referencias
	Rango	Promedio	
PCMA	2,10-9,70	5,31	[64, 65, 67, 68, 69], [71]–[81], [83]
PHMA	5,98-6,40	6,19	[112, 113]
PPMA	6,00-6,98	6,49	[119, 120]
PRMA	2,00-12,50	5,76	[30, 33, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 46, 48, 49, 51, 52, 53], [55]–[63]
PSMA	1,10-6,70	2,79	[88, 89, 90, 92, 93, 94, 96, 97]
PTMA	5,50-6,80	6,15	[107, 108]
PTrMA	2,98-5,00	3,99	[114, 116]
Vivaldi	11,50-18,00	14,85	[98, 99, 100], [103]–[106]
Otras	1,30-6,07	3,69	[121, 124]

4. Conclusiones y perspectivas futuras

Con respecto a las configuraciones de las antenas UWB planares, la PRMA ha sido la más empleada con su estructura convencional o modificada. Las modificaciones se realizan aplicando una o varias técnicas para algún objetivo en específico, como mejorar el acoplamiento de impedancias, ajustar la ganancia, cambiar el patrón de radiación, entre otros. Dentro de las técnicas, se destacaron el uso de ranuras y elementos parásitos en los planos de la antena para diferentes fines, y el empleo de diodos PIN para controlar el comportamiento de las antenas.

En la revisión se tomaron en cuenta diferentes configuraciones de antenas planares UWB, las cuales han sido usadas en rangos de frecuencias similares, es decir, para las mismas aplicaciones. En todas ellas no se detectó ningún criterio de selección entre configuraciones. Por consiguiente, las perspectivas futuras estarán orientadas en establecer dichos criterios mediante la comparación del desempeño de las configuraciones para cada aplicación. Así mismo, optimizar las antenas UWB del tipo monopares con distintos métodos para evitar que el patrón de radiación sea cuasi-omnidireccional. Adicionalmente, optimizar cada una de las configuraciones de antenas para disminuir la variación de la ganancia, y aumentar el valor de la ganancia en las antenas del tipo PSMA.

Entre otras perspectivas se plantean, la clasifi-

cación del rendimiento de cada configuración de las antenas UWB y los métodos de alimentación en los distintos servicios de comunicaciones inalámbricas. Además, diseñar mayor cantidad de antenas UWB que abarquen más sistemas de comunicaciones en la banda UHF y evaluar el desempeño de las bandas marcadas en servicios que aún no han sido tan explorados, por ejemplo WLAN 2,4GHz, radares, LTE, GPS, entre otros.

5. Referencias

- [1] M Schwartz. *Mobile wireless communications*. Cambridge University press, New York, 1st edition, 2005.
- [2] M. Matin. *Ultra Wideband Communications: Novel Trends - Antennas and Propagation*. InTech, Rijeka, 1st edition, 2011.
- [3] X. Huang, Y. Chen, and S. Ao. *Advances in communication systems and electrical engineering*. Springer, New York, 1st edition, 2008.
- [4] Q Bi, G I Zysman, and H Menkes. Wireless Mobile Communications at the Start of the 21st Century. *IEEE Communication Magazine*, 39(1):110–116, 2001.
- [5] B. Sanou. ICT Facts & Figures. The world in 2015. *International Telecommunication Union*, pages 1–6, 2015.
- [6] H. Kim. *Wireless communications systems design*. John Wiley & Sons ltd, Chichester, 1st edition, 2015.
- [7] S. Chen and J. Zhao. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):36–43, 2014.
- [8] Y. Rahmat-Samii and A. Densmore. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(4):1191–1204, 2015.
- [9] D. Fang. *Antenna theory and microstrip antennas*. CRC Press, Florida, 1st edition, 2010.
- [10] K. Fujimoto. Artech house, Norwood, 3rd edition, 2008.
- [11] J. Volakis. *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill, 4th edition, 2007.
- [12] D. Straw. The ARRL Antenna Book. *Arrl*, XXXIII(2):81–87, 2012.
- [13] I. Minin. *Microwave and Millimeter Wave Technologies: Modern UWB antennas and equipment*. InTech, Vukovar, 1st edition, 2010.
- [14] S. Jones. The Evolution of Modern UWB Technology: Initiation of UWB Regulatory Framework. 2005.
- [15] R. Chase. UWB: Fostering innovation through a balanced regulatory framework. *Federal Communication Commission (FCC)*, 2006.
- [16] V. Mathur and M. Gupta. Comparison of performance characteristics of rectangular, square and hexagonal microstrip patch antennas. pages 1–6, Noida, 2014.
- [17] A. Ahmed, M. Islam, R. Azim, M. Ismail, and M. Mansor. Microstrip antenna design for femtocell coverage optimization. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014:1–8, 2014.
- [18] Nasimuddin. *Microstrip antennas*. InTech, Rijeka, 1st edition, 2011.
- [19] W. Mazhar, M. Tarar, F. Tahir, S. Ullah, and F. Bhatti. Compact Microstrip Patch Antenna for Ultra-wideband Applications. pages 1100–1104, Stockholm, 2013.
- [20] R. Sorrentino and G. Bianchi. *Microwave and RF engineering*. John Wiley & Sons ltd, Chichester, 1st edition, 2010.
- [21] R E Zich, M Mussetta, F Grimaccia, R Albi, A Carbonara, P D Antuono, T Guffanti, and E Zucchelli. Comparison of different optimization techniques in antenna design – Part I. pages 7–8, Chicago, 2012.
- [22] U. Ozkaya and L. Seyfi. Dimension optimization of microstrip patch antenna in X/Ku Band via artificial neural network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195:2520–2526, 2015.
- [23] G. Galvan, M. Peyrot, and H. Jardon. *Ultra Wideband Antennas*. CRC Press, Florida, 1st edition, 2016.
- [24] M. Matin. *Wireless Sensor Networks - Technology and protocols*. InTech, Rijeki, 1st edition, 2012.
- [25] R. Ghavami, L. Michale, and R. Kohno. *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. John Wiley & Sons ltd, Chichester, 2nd edition, 2007.
- [26] Qualcomm. The Evolution of Mobile Technologies: 1G - 4G LTE. *Federal Communication Commission (FCC)*, pages 1–41, 2014.
- [27] O. Aghzout, A. Naghar, O. El Mrabet, O. Chakkor, N. Raissouni, F. Falcone, and M. Essaïdi. A Mutual Coupling Study of a novel antenna system design for UWB-MIMO applications. pages 1–7, Algeciras, 2011.
- [28] F. Ahmed, N. Hasan, and M. Chowdhury. A compact low-profile ultra wideband antenna for biomedical applications. pages 87–90, Bangladesh, 2017.
- [29] P. Bakariya, S. Dwari, and M. Sarkar. Triple band notch UWB printed monopole antenna with enhanced bandwidth. *International Journal of Electronics and Communications*, 69(1):26–30, 2015.
- [30] A. Barreto, J. Morales, and I. Hernández. Análisis y diseño de un monopolo impreso para UWB. *Revista de ingeniería electrónica, automática y comunicaciones*, 35(1):16–32, 2014.
- [31] A. Bekasiewicz and S. Koziel. Rapid multi-objective optimization of a MIMO antenna for UWB applications. pages 10–11, Loughborough, 2014.
- [32] A. Bekasiewicz, S. Koziel, and T. Dhaene.

- Optimization-driven design of compact UWB MIMO antenna. pages 2–5, Davos, 2016.
- [33] Y. Chen and Y. Chiu. Application of Multiobjective Topology Optimization to Miniature Ultrawideband Antennas with Enhanced Pulse Preservation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15(1):842–845, 2015.
- [34] A. Gautam, S. Yadav, and B. Kanaujia. A CPW Fed Compact UWB Microstrip Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12:151–154, 2013.
- [35] W. Chen and K. Ku. Bandwidth enhancement of open slot antenna for UWB applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 50:438–439, 2008.
- [36] Y. Chen. Optimization of sharp band-notched Ultra Wideband antennas using multi-objective fractional factorial design. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(2):355–359, 2016.
- [37] B. Kasi and C. Chakrabarty. Ultra-Wideband antenna array design for target detection. *Progress In Electromagnetics Research C*, 25:67–79, 2012.
- [38] M. Khan, A. Capobianco, S. Asif, A. Iftikhar, B. Ijaz, and B. Braaten. Compact 4×4 UWB-MIMO antenna with WLAN band rejected operation. *Electronics Letters*, 51(14):1048–1050, 2015.
- [39] M. Khan, A. Capobianco, S. Asif, A. Iftikhar, B. Braaten, B. Ijaz, and M. Shafique. A small footprint ultra-wideband multiple-input multiple-output antenna. pages 662–666, Dekalb, 2015.
- [40] M. Khan, A. Capobianco, S. Asif, A. Iftikhar, and B. Braaten. A 4 Element Compact Ultra-Wideband MIMO Antenna Array. pages 2305–2306, Vancouver, 2015.
- [41] M. Khan, A. Capobianco, A. Naqvi, M. Shafique, B. Ijaz, and B. Braaten. Compact planar UWB MIMO antenna with on-demand WLAN rejection. *Electronics Letters*, 51(13):963–964, 2015.
- [42] M. Klemm, I. Kovacs, G. Pedersen, and G. Troster. Comparison of directional and omni-directional UWB antennas for wireless body area network applications. pages 3–6, Dubrovnik, 2005.
- [43] S. Koziel, A. Bekasiewicz, S. Ulaganathan, and T. Dhaene. Fast design optimization of UWB antenna with WLAN band-notch. pages 1–5, Loughborough, 2015.
- [44] P. Kumar and J. Masa. Dual polarized microstrip patch antennas for ultra-wideband applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(9):2174–2179, 2014.
- [45] S. Koziel and A. Bekasiewicz. Low-cost multi-objective optimization and experimental validation of UWB MIMO antenna. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 33(4), 2016.
- [46] Y. Li, W. Shao, L. You, and B. Wang. An Improved PSO Algorithm and Its Application to UWB Antenna Design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12(3):1236–1239, 2013.
- [47] J. Li, D. Wu, Y. Wu, and G. Zhang. Dual band-notched UWB MIMO antenna. pages 25–26, Kuta, 2016.
- [48] K. Lim, M. Nagalingam, and C. Tan. Design and Construction of Microstrip Uwb Antenna With Time Domain Analysis. *Progress In Electromagnetics Research M*, 3:153–164, 2008.
- [49] N. Malekpour and M. Honarvar. Design of High-Isolation Compact MIMO Antenna for UWB Application. *Progress In Electromagnetics Research C*, 62:119–129, 2016.
- [50] L. Ping. Equivalent circuit model of octagonal ultra wideband (UWB) antenna. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(2):439–450, 2017.
- [51] Y. Ranga, L. Matekovits, A. Weily, and K. Esselle. A constant gain ultra-wideband antenna with a multi-layer frequency selective surface. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 38:119–125, 2013.
- [52] J. Ren, D. Mi, and Y. Yin. Compact Ultrawideband MIMO Antenna with WLAN / UWB Bands Coverage. *Progress In Electromagnetics Research C*, 50:121–129, 2014.
- [53] H. Ryu and J. Woo. Design of Ultra-wideband MIMO Antenna for Mobile Handset Applications. pages 968–971, Moscow, 2012.
- [54] G. Srivastava, S. Dwari, and B. Kanaujia. A Compact 4×4 Ultrawideband (UWB) Band Notched MIMO Antenna. pages 198–200, Bangalore, 2014.
- [55] Z. Tang, X. Wu, Z. Xi, and S. Hu. Novel compact dual-band-notched ultra-wideband printed antenna with a parasitic circular ring strip. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(2):357–363, 2017.
- [56] Z. Wani and D. Kumar. Dual-band-notched antenna for UWB MIMO applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(2):381–386, 2017.
- [57] Z. Wani and D. Vishwakarma. An ultrawideband antenna for portable MIMO terminals. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(1):51–56, 2016.
- [58] H. Wu, J. Geng, R. Jin, J. Qiu, W. Liu, J. Chen, and S. Liu. An improved comprehensive learning particle swarm optimization and its application to the semiautomatic design of antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(10):3018–3028, 2009.
- [59] A. Yadav, D. Sethi, and R. Khanna. Slot loaded UWB antenna: Dual band notched characteristics. *International Journal of Electronics and Communications*, 70(3):331–335, 2014.
- [60] Z. Yang, H. Yang, J. Hong, and Y. Li. A miniaturized triple band-notched MIMO antenna for UWB application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(3):642–647, 2016.
- [61] H. Yu'Nan, M. Tao, Z. Hongxin, Z. Kexin, D. Lin, and

- Z. Pengfei. Novel ladder patch monopole antenna for UWB application. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 22(6):61–65, 2015.
- [62] Y. Zehforoosh, C. Ghobadi, and J. Nourinia. Antenna Design for Ultra Wideband Application Using a New Multilayer Structure. *PIERS Online*, 2(6):544–549, 2006.
- [63] B. Kasi, G. Manickam, and C. Chakrabarty. Compact UWB Antenna Design for MIMO Applications. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6(22):4225–4230, 2013.
- [64] S. Rehman and M. Alkanhal. Design and system characterization of Ultra-Wideband Antennas with Multiple Band-Rejection. *IEEE Access*, 5:17988–17996, 2017.
- [65] D. Sipal, M. Abegaonkar, and S. Koul. Compact band-notched UWB antenna for MIMO applications in portable wireless devices. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(6):1390–1394, 2016.
- [66] R. Kumar and P. Chaubey. Design of coplanar waveguide-feed pentagonal-cut ultra-wide bandwidth fractal antenna and its backscattering. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 6(13):1407–1414, 2012.
- [67] H. Schantz. Bottom fed planar elliptical UWB antennas. pages 219–223, Reston, 2003.
- [68] C. Liang, L. Li, and H. Zhai. Study of CPW-fed circular disc monopole antenna for ultra wideband applications. *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 152(6):520–526, 2005.
- [69] S. Patil, R. Gupta, and S. Kharche. Gain improvement of lower UWB monopole antenna using FSS layer. pages 2–6, Navi Mumbai, 2017.
- [70] G. Chavka. Ultrawideband planar antennas and antenna arrays. pages 9–14, Sevastopol, 2012.
- [71] A. Najam, Y. Duroc, and S. Tedjini. Design of MIMO Antennas for Ultra-Wideband Communications. pages 1–8, Avignon, 2009.
- [72] R. Kumar, P. Chaubey, and I. Srikant. On the design of UWB circular fractal antenna with notched-band characteristics using W-shape slot. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 11(2):230–241, 2012.
- [73] K. Prasanna and S. Behera. Compact two-port UWB MIMO antenna system with high isolation using a fork-shaped structure. pages 726–729, Melmaruvathur, 2013.
- [74] S. De and P. Sarkar. A high gain ultra-wideband monopole antenna. *International Journal of Electronics and Communications*, 69(8):1113–1117, 2015.
- [75] G. Sen, A. Banerjee, M. Kumar, and S. Das. An ultra-wideband monopole antenna with a gain enhanced performance using a novel split-ring meta-surface reflector. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(6):1296–1300, 2017.
- [76] T. Aboufoul, C. Parini, X. Chen, and A. Alo-mainy. Pattern-Reconfigurable Planar Circular Ultra-Wideband Monopole Antenna. 61(10):4973 – 4980, 2013.
- [77] S. Nikolaou and M. Abbasi. Design and development of a compact UWB monopole antenna with easily-controllable return loss. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(4):2063–2067, 2017.
- [78] H. Liu, C. Yin, and W. Gao. Optimization and design of wideband antenna based on Q factor. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015:1–9, 2015.
- [79] P. Sharma, K. Vyas, and R. Yadav. Design and analysis of miniaturized UWB antenna with tunable notched band. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(3):691–696, 2016.
- [80] C. Sim, W. Chung, and C. Lee. A circular-disc monopole antenna with band-rejection function for ultrawideband application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(6):1607–1613, 2009.
- [81] S. Rathore, R. Paulus, A. Jaiswal, and A. Agrawal. Ultra-wideband Antenna for WLAN , WiMAX and LTE Applications. *International Journal of Computer Applications*, 121(7):27–30, 2015.
- [82] J. Wang, X. Sun, and K. Okada. UWB circular monopole omnidirectional antenna with a slot for radiation pattern improvement. pages 478–482, Singapore, 2007.
- [83] M. Jusoh, M. Jamlos, M. Kamarudin, and F. Malek. A MIMO antenna design challenges for UWB applications. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 36:357–371, 2012.
- [84] M. Mahdavi, Z. Atlasbaf, and K. Forooghi. A very compact CPW-fed ultra-wideband circular monopole antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(7):1665–1668, 2012.
- [85] S. Koziel and A. Bekasiewicz. Fast design optimization of UWB antennas using response features. pages 4–7, Kraków, 2016.
- [86] S. Shabnam, S. Manna, U. Sharma, and P. Mukherjee. Optimization of Ultra Wide-Band printed monopole square antenna using differential evolution algorithm. pages 81–89, New Delhi, 2015.
- [87] Y. Li, W. Li, C. Liu, and T. Jiang. Two UWB-MIMO antennas with high isolation using sleeve coupled stepped impedance resonators. pages 21–22, Singapore, 2012.
- [88] Y. Chen. Application of multi-objective fractional factorial design for ultra-wideband antennas with uniform gain and high fidelity. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 9(15):1667–1672, 2015.
- [89] Y. Chiu and Y. Chen. Multi-objective optimization for UWB antennas in impedance matching, gain, and fidelity factor. pages 1940–1941, Vancouver, 2015.
- [90] P. Dhakar, R. Raj, D. Kumar, I. Sharma, and R. Sharma. A Small Square UWB Antenna with

- Dual Rejection Bands for WiMAX and WLAN Applications. pages 4–9, Mathura, 2015.
- [91] K. Halili, M. Ojaroudi, and N. Ojaroudi. Ultrawideband monopole antenna for use in a circular cylindrical microwave imaging system. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(9):2202–2205, 2012.
- [92] M. Rostamzadeh, S. Mohamadi, J. Nourinia, Ch Ghobadi, and M. Ojaroudi. Square monopole antenna for UWB applications with novel rod-shaped parasitic structures and novel V-shaped slots in the ground plane. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:446–449, 2012.
- [93] T. Singh, H. Choudhary, D. Avasthi, and V. Gahlaut. Design & parametric analysis of band reject ultra wideband (UWB) antenna using step impedance resonator. *Cogent engineering*, 4(1):1–16, 2017.
- [94] R. Azim, M. Islam, and N. Misran. Compact planar antenna for UWB applications. *International Journal of electrical, computer, energetic, electronic and communication engineering*, 4(7):1987–1990, 2010.
- [95] Y. Chen, W. Chou, and S. Chen. Applications of Optimization Techniques to Designs of Ultra-Wideband Planar Monopole Antennas. pages 714–716, Kaohsiung, 2012.
- [96] W. Jiang and W. Che. A novel UWB antenna with dual notched bands for WiMAX and WLAN applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:293–296, 2012.
- [97] T. Hong, K. Oh, H. Lee, H. Nam, T. Yun, D. Lee, H. Hwang, and J. Lee. Novel broadband rectenna using printed monopole antenna and harmonic-suppressed stub filter. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(5):1194–1197, 2010.
- [98] Y. Jia, Y. Liu, S. Gong, T. Hong, and D. Yu. Printed UWB end-fire vivaldi antenna with low RCS. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 37:11–20, 2013.
- [99] Y. Wang, G. Wang, Z. Yu, J. Liang, and X. Gao. Ultra-wideband E-plane monopulse antenna using Vivaldi antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(10):4961–4969, 2014.
- [100] R. Natarajan, J. George, M. Kanagasabai, and A. Shrivastav. A Compact Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:1557–1560, 2015.
- [101] R. Arono and A. Munir. Compact antipodal Vivaldi printed antenna for ultra wideband application. pages 2–5, Manado, 2015.
- [102] A. Buzdar, A. Buzdar, H. Tila, L. Sun, M. Khan, U. Khan, and W. Feroz. Low cost Vivaldi array antenna for mobile through wall sensing platforms. pages 9–12, Shangai, 2016.
- [103] J. Wu, Z. Zhao, Z. Nie, and Q. Liu. A printed UWB vivaldi antenna using stepped connection structure between slotline and tapered patches. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13:698–701, 2014.
- [104] A. Arezoomand, R. Sadeghzadeh, and M. Naser-Moghadasi. Investigation and improvement of the phase-center characteristics of vivaldi's antenna for UWB applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(6):1275–1281, 2016.
- [105] N. Chakrabarti, S. Kalra, S. Saxena, and M. Tripathy. Ultra-Wideband Antenna For A Ground Penetrating Radar. pages 4–9, Hyderabad, 2016.
- [106] D. Yang, S. Liu, M. Chen, and Y. Wen. A Compact Vivaldi Antenna with Triple Band-notched characteristics. pages 216–219, Shangai, 2015.
- [107] M. Mahmud, T. Alam, and M. Islam. A triangular coupled-resonator antenna for ultra-wideband applications. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 123(1):2–5, 2017.
- [108] M. Karimiyan-Mohammadabadi, M. A. Dorostkar, F. Shokuohi, M. Shanbeh, and A. Torkan. Ultra-wideband textile antenna with circular polarization for GPS applications and wireless body area networks. *Journal of Industrial Textiles*, 46(8):1684–1697, 2017.
- [109] A. Singh, K. Rathore, P. Sharma, and R. Raj. Dual band notched small square monopole UWB antenna with enhanced bandwidth. pages 64–68, Bhopal, 2014.
- [110] H. Choi, K. Choi, and H. Hwang. Band-reject UWB antenna based on two-pole band-stop filter. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(2):406–409, 2015.
- [111] S. Oudayacoumar and M. Amudhan. A Compact Hexagonal Structured Dual Band MIMO Antenna for Fixed WiMAX Application. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(8):1813–1820, 2013.
- [112] S. Tripathi, S. Yadav, and A. Mohan. Hexagonal fractal ultra-wideband antenna using Koch geometry with bandwidth enhancement. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 8(15):1445–1450, 2014.
- [113] M. Sharma, Y. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, and S. Kumari. Compact printed high rejection triple band-notch UWB antenna with multiple wireless applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3):1626–1634, 2016.
- [114] V. Rajeshkumar and S. Raghavan. A compact metamaterial inspired triple band antenna for reconfigurable WLAN/WiMAX applications. *International Journal of Electronics and Communications*, 69(1):274–280, 2014.
- [115] S. Koziel and A. Bekasiewicz. Multi-objective optimization of expensive electromagnetic simulation models. *Applied Soft Computing Journal*, 47:332–342, 2016.
- [116] S. Lee, J. Park, and J. Lee. A novel CPW-FED ultra-wideband antenna design. *Microwave and Optical Technology Letters*, 44(5):393–396, 2005.
- [117] T. Peter, T. Rahman, S. Cheung, R. Nilavalan, H. Abutarboush, and A. Vilches. A novel transparent UWB antenna for photovoltaic solar panel integration and RF energy harvesting. *IEEE Transactions on*

- Antennas and Propagation*, 62(4):1844–1853, 2014.
- [118] S. Radiom, M. Baghaei-Nejad, H. Aliakbarian, L. Zheng, G. Vandenbosch, and G. Gielen. Miniaturization of UWB antennas and its influence on antenna-transceiver performance in impulse-UWB communication. *Wireless Personal Communications*, 71(4):2913–2935, 2013.
- [119] K. Ray and S. Thakur. Ultra wide band vertex truncated printed pentagon monopole antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(10):2228–2234, 2014.
- [120] M. Lin, D., Tang, I., Tsou. A compact UWB antenna with CPW-fed. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(3):564–567, 2007.
- [121] C. Yu, T. Xu, and C. Liu. Design of a Novel UWB Omnidirectional Antenna Using Particle Swarm Optimization. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015:1–8, 2015.
- [122] N. Tokan. Optimization of the UWB feed antenna position in reflector applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014:1–7, 2014.
- [123] A. Amini, H. Oraizi, and M. Chaychi. Miniaturized UWB Log-Periodic Square Fractal Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:1322–1325, 2015.
- [124] A. Toktas and A. Akdagli. Wideband MIMO antenna with enhanced isolation for LTE, WiMAX and WLAN mobile handsets. *Electronics Letters*, 50(10):723–724, 2014.

Breve Reseña de los Autores

Andry Contreras recibió el grado de Ingeniero Electricista en 2009, el grado de MS en Ciencias Aplicadas. Área: Física en 2012 y cursa el Doctorado en Ingeniería, todos estos en la Universidad del Zulia. Profesor asociado e investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Sus áreas de investigación incluyen: propagación y antenas, electromagnetismo aplicado, simulación de fenómenos electromagnéticos y sistemas de comunicaciones.

Maryory Urdaneta recibió el grado de Ingeniero Electricista en 2003, el grado de MS en Matemáticas Aplicada en 2007, ambos en la Universidad del Zulia. MS en Ingeniería Eléctrica en 2012 y PhD en Ingeniería Eléctrica en 2015, en University of Central Florida. Profesora titular e investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Sus áreas de investigación incluyen:

propagación y antenas, bioelectromagnetismo, y sistemas de comunicaciones.

En el Laboratorio de Comunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Zulia se realizan trabajos de investigación en las áreas de propagación y antenas, diseño de circuitos de microondas, electromagnetismo aplicado, simulación de fenómenos electromagnéticos, sistemas de comunicaciones, caracterización de materiales y bioelectromagnetismo.

Operation variables evaluation of vertical evaporators via a computational tool

Jesús Yaguaratty^a, Vanessa Hurtado^a, Alejandro Bolívar^b y Ángel D. Almarza^{*b}

^a*Departamento de Térmica y Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Departamento de Computación, Dirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- The vertical evaporators of long tubes are equipment widely used at industrial level. The thermal processes that take place in this type of systems, involve heat transfer phenomena regulating the phase change of the fluids and consequently the use of mathematical models of complexity and empirical nature that merit analysis and automation, in addition to the estimation of the corresponding properties. In that sense, the respective mathematical modeling was developed, for whose resolution are required two nested iterative processes, giving rise to a coding algorithm coded in Java programming language, taking into consideration the design of a graphical user interface by means of which are obtained the characteristic parameters of the process. Finally, the validation of the computational tool was carried out, based on experimental data from vertical evaporators.

Keywords: vertical evaporators; computational tool; operation variables; heat transfer.

Evaluación de las variables de operación de evaporadores verticales por medio de una herramienta computacional

Resumen.- Los evaporadores verticales de tubos largos, son equipos ampliamente utilizados a nivel industrial. Los procesos térmicos que tienen lugar en éste tipo de sistemas, involucran fenómenos de transferencia de calor que comportan el cambio de fase de los fluidos y en consecuencia el uso de modelos matemáticos de complejidad y de naturaleza empírica que ameritan análisis y automatización, además de la estimación de las propiedades correspondientes. En ese sentido, se desarrolló el modelado matemático respectivo, para cuya resolución se requieren dos procesos iterativos anidados, dando lugar a un algoritmo de cálculo codificado en el lenguaje de programación Java, tomando en consideración el diseño de una interfaz gráfica de usuario por medio de la cual se obtienen los parámetros característicos del proceso. Por último, se realizó la validación de la herramienta computacional, en base a datos experimentales de evaporadores verticales.

Palabras claves: evaporadores verticales; herramienta computacional; variables de operación; transferencia de calor.

Recibido: marzo 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

El proceso de evaporación es una de las principales operaciones unitarias, cuya implementación tiene un amplio espectro de aplicaciones en la industria química, alimenticia, entre otras, siendo los evaporadores verticales de tubos largos uno de los más empleados, típicamente asociados al manejo

de líquidos limpios, líquidos que forman espumas y líquidos corrosivos, evidenciándose entre sus ventajas, la gran superficie de calentamiento y el buen tiempo de residencia [1]. En tal sentido, el estudio de dichos procesos ha sido enfocado desde diversas aristas con la intención de comprender a fondo el fenómeno y emplear estrategias de simulación, tal como lo muestran en sus trabajos, Macias y Segovia [2] y Muñoz [3] respectivamente, lo cuales han tenido su origen en algoritmos que hacen referencia a procesos similares, pero que, en su mayoría no estiman el coeficiente global de transferencia de calor enfrentando cálculos que requieren estimación de diversas propiedades y

*Autor para correspondencia: Ángel D. Almarza
adalmarza@gmail.com

coeficientes, los cuales dependen de las variables de operación, la solución de modelos a través de procesos iterativos con suposición de valores iniciales, además de la selección y uso de correlaciones empíricas específicas que toman en cuenta el cambio de fase tanto por dentro de los tubos del intercambiador como por la carcasa. Paralelamente, Parrales y otros [4], abordan el estudio de intercambiadores de calor helicoidales en posición vertical operando con fluidos bifásicos por medio del cálculo de redes neuronales artificiales, que implican un proceso automatizado con algunos de los parámetros característicos del fenómeno, la validación realizada compara el flujo de calor experimental con el simulado en un evaporador vertical de doble tubo helicoidal en estado estacionario con agua como fluido de trabajo, adicionalmente se contrasta el flujo de calor, tanto experimental como simulado de un prototipo innovador de generador de vapor helicoidal con diseño a gran escala. Desde otro enfoque, Xue y otros [5], han abordado el análisis de evaporadores multiefecto desde la gestión energética, estudiando las variables clave de proceso y su relación con los consumos de vapor. De cualquier forma, el análisis de las variables involucradas en la operación de éste tipo de equipos desde la perspectiva de su diseño, así como el estudio del funcionamiento, en los términos del uso de la energía, conlleva la aplicación de una serie de correlaciones de orden empírico y estimación de propiedades, sobre los cuales resulta pertinente el desarrollo de una herramienta computacional, que permita concretar de forma rápida y eficiente, el modelado del citado proceso, permitiéndole al usuario en principio, la comprensión del mismo a través de un entorno que facilite un acercamiento a la realidad, lo cual se vincula a un aprendizaje activo generando un acercamiento de forma comprensiva al fenómeno en estudio [6], disponiendo al mismo tiempo de un reporte con la información relacionada al comportamiento de las variables en cuestión.

2. Desarrollo de la investigación

La investigación realizada se llevó a cabo a través de las siguientes fases:

2.1. *Primera fase: Identificación de las variables asociadas al proceso de intercambio térmico en un evaporador vertical*

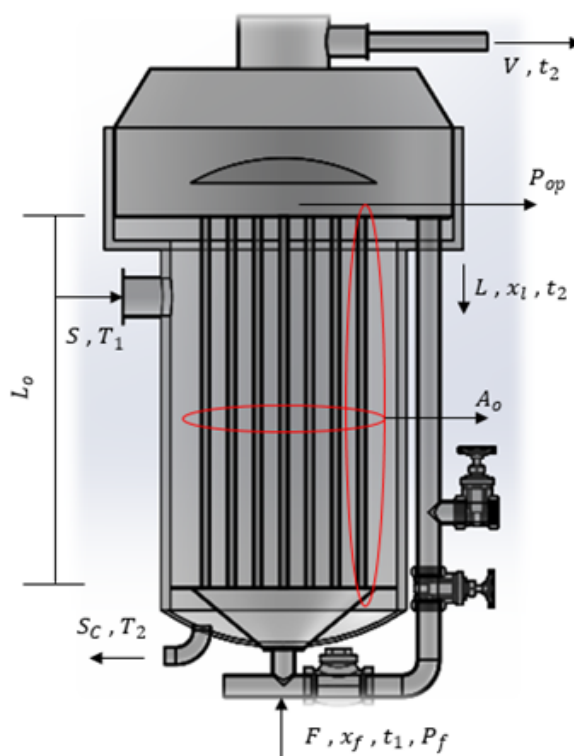


Figura 1: Variables de operación de un evaporador vertical de tubos largos

En principio, el análisis del proceso que ocurre en un evaporador vertical de tubos largos pasa por la determinación e identificación de las variables involucradas. En tal sentido, y de acuerdo al diagrama presentado en la Figura 1, intervienen en el mismo: los flujos de los fluidos que intercambian calor, las temperaturas de entrada y salida al equipo de cada uno de los fluidos, las presiones de trabajo, si existe un cambio de concentración producto del proceso se debe tomar en cuenta dicho valor. Así mismo, se establece como parámetros de diseño, el área de transferencia requerida, que se vinculan con las características de los tubos (longitud, diámetro interno y externo, el número de ellos y su arreglo).

La variables representadas en la Figura 1 son
 F : Flujo de alimentación que entra al evaporador [kg/s],

L : Flujo de líquido concentrado que sale del evaporador [kg/s],

S : Vapor de agua que entra a la cámara de calefacción [kg/s],

S_c : Vapor de agua condensado que sale de la cámara de calefacción [kg/s],

V : Vapor de la solución que sale del evaporador [kg/s],

t_1 : Temperatura de entrada del fluido frío al evaporador [°C],

t_2 : Temperatura de salida del fluido frío al evaporador [°C],

T_1 : Temperatura de entrada del fluido caliente al evaporador [°C],

T_2 : Temperatura de salida del fluido caliente al evaporador [°C],

P_f : Presión de flujo de alimentación que entra al evaporador [kPa],

P_{op} : Presión de operación [kPa],

L_o : Longitud de los tubos [m],

A_o : Área de transferencia de calor [m^2],

P_v : Presión de vapor de calentamiento [kPa],

x_f : Concentración inicial de la solución [mg/L],

x_l : Concentración final de la solución [mg/L].

2.2. Segunda fase: Determinación y desarrollo de los modelos matemáticos relacionados con el caso de estudio.

Tomando en consideración las características del sistema en estudio, esto es, evaporadores verticales de tubos largos, operando en condiciones estacionarias y con la intención de estructurar el modelado del mismo, se aplica en primer lugar el balance de materia según la Ecuación (1)

$$F + S = L + V + S_c, \quad (1)$$

donde, el vapor de agua que entra a la cámara de calefacción sale como vapor de agua condensado ($S = S_c$). Por lo tanto, la Ecuación (1) queda expresada de acuerdo con la Ecuación (2)

$$F = L + V. \quad (2)$$

El balance global para un evaporador de simple efecto expresado en la Ecuación (2), también puede

considerar el balance de soluto, tomando como base las concentraciones de entrada y de salida de la solución que se evapora, según la Ecuación (3)

$$F \cdot x_f = L \cdot x_l + V \cdot y_v. \quad (3)$$

Así, considerando un proceso de evaporación eficiente, se asume que no habrá arrastre alguno de soluto en el vapor ($y_v = 0$), y entonces la Ecuación (3) queda expresado en la Ecuación (4)

$$F \cdot x_f = L \cdot x_l. \quad (4)$$

Por otro lado, considerando despreciables las pérdidas de calor al entorno, por convección y radiación, esto es, el calor que entrega el fluido que circula por la carcasa lo recibe el que circula por los tubos, el balance de energía de energía se expresa a partir de la Ecuación (5),

$$F \cdot h_f + S \cdot h_s = L \cdot h_l + V \cdot h_v + S_c \cdot h_{sc}. \quad (5)$$

donde:

h_f : Entalpía específica de la alimentación [kJ/kg],

h_s : Entalpía específica del vapor de agua que entra a la cámara de calefacción [kJ/kg],

h_l : Entalpía específica del líquido concentrado [kJ/kg],

h_v : Entalpía específica del vapor de la solución [kJ/kg],

h_{sc} : Entalpía específica de vapor de agua que sale de la cámara de calefacción [kJ/kg].

Paralelamente, la velocidad de transferencia de calor se determina a partir de la Ecuación (6)

$$\dot{Q} = U_o \cdot A_o \cdot \Delta T_{ml}, \quad (6)$$

siendo:

U_o : Coeficiente global de transferencia de calor referido al área externa [$W/m^2 \cdot K$],

ΔT_{ml} : Diferencia de temperatura media logarítmica [°C].

La estimación del coeficiente global de transferencia de calor (U_o), depende de los coeficientes convectivos, tanto interno (h_i) como externo (h_o), los cuales de manera intrínseca involucran fluidos con cambio de fase para ambos casos.

Para evaluar el coeficiente convectivo dentro de los tubos (h_i), se emplea la correlación de Shah,

la cual se aplica para ebullición por nucleación, ebullición convectiva y ebullición estratificada [7]; modelo que permite una predicción del coeficiente con desviaciones aceptables respecto a las que podrían efectuarse con otras correlaciones empíricas [8], siendo fácilmente programable para cálculos computarizados. Su aplicación implica, el cálculo de cuatro parámetros adimensionales, Ψ , C_o , B_o , F_{rl} , de los cuales el último (número de Froude) se estima sólo en el caso en el que los tubos estén dispuestos horizontalmente.

Así, el parámetro Ψ relaciona el coeficiente convectivo dentro de los tubos, con el coeficiente convectivo de la fase líquida, expresado a partir de la Ecuación (7)

$$\Psi = \frac{h_i}{h_p}, \quad (7)$$

donde:

h_p : Coeficiente del fluido en fase líquida [$W/m^2 \cdot K$].

El cual se calcula a través de la Ecuación (8)

$$h_p = 0,023 \left[\frac{G(1-x)d_i}{\mu_l} \right]^{0,8} P_r^{0,4} \frac{k_l}{d_i}, \quad (8)$$

donde:

G : Velocidad másica [$kg/m^2 \cdot s$],

x : Calidad de vapor (puede tomarse un promedio entre la calidad de entrada y la calidad a la salida del vapor),

P_r : Número de Prandtl,

μ_l : Viscosidad del fluido en fase líquida [$kg/m \cdot s$],

k_l : Conductividad térmica del fluido en fase líquida [$W/m \cdot K$].

Para la determinación de Ψ , se requiere el cálculo de los siguientes parámetros adimensionales:

El número de convección (C_o) se determina con la Ecuación (9)

$$C_o = \left[\frac{1}{x} - 1 \right]^{0,8} \left[\frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{0,5}, \quad (9)$$

donde:

ρ_v : Densidad de vapor [kg/m^3],

ρ_l : Densidad del fluido en fase líquida [kg/m^3].

Para el número de ebullición B_o , se obtiene con la Ecuación (10)

$$B_o = \frac{q''}{G \cdot \lambda_{vap}}, \quad (10)$$

donde:

q'' : Flujo de calor local [$kJ/m^2 \cdot s$],

λ_{vap} : Calor de vaporización o condensación [kJ/kg].

$$q'' = U_{ref} (\dot{T}_c - T_{sat}),$$

para

U_{ref} : Estimado del coeficiente global de transferencia de calor [$W/m^2 \cdot K$],

\dot{T}_c : Promedio de temperatura para el fluido caliente [K],

T_{sat} : Temperatura de saturación del fluido que se evapora [K].

$$\dot{T}_c = \frac{T_{c1} + T_{c2}}{2},$$

con

T_{c1} : Temperatura del fluido caliente a la entrada del evaporador [K],

T_{c2} : Temperatura del fluido caliente a la salida del evaporador [K].

En el caso de tubos dispuestos verticalmente, no es necesaria la estimación del número de Froude (F_{rl}), ya que para cualquier valor se define el parámetro N_s del modelo, según la Ecuación (11)

$$N_s = C_o, \quad (11)$$

En tal sentido el parámetro Ψ depende del valor de N_s ; de este modo

1. Para $N_s > 1$, se calculan dos valores de Ψ , Ψ_{ec} y Ψ_{en} .

$$\Psi_{ec} = \frac{1,8}{N_s^{0,8}},$$

$$\Psi_{en} = 230 B_o^{0,5} \text{ cuando } B_o > 0,3 \times 10^{-4},$$

$$\Psi_{en} = 1 + 46 B_o^{0,5} \text{ cuando } B_o < 0,3 \times 10^{-4}.$$

Se escoge el valor más alto (Ψ_{ec} o Ψ_{en}) y con este valor se despeja h_i de la Ecuación (7).

2. Para $0,1 < N_s \leq 1$ se calculan dos valores de Ψ , Ψ_{ec} y Ψ_{ee} .

$$\Psi_{ec} = \frac{1,8}{N_s^{0,8}},$$

$$\Psi_{ee} = F B_o^{0,5} \exp(2,74 N_s^{-0,1}), \quad (12)$$

Se escoge el valor más alto (Ψ_{ec} o Ψ_{ee}) y con este valor se despeja h_i de la Ecuación (7).

3. Para $N_s \leq 0,1$ se calculan dos valores de Ψ , Ψ_{ec} y Ψ_{ee} .

$$\Psi_{ec} = \frac{1,8}{N_s^{0,8}},$$

$$\Psi_{ee} = F B_o^{0,5} \exp(2,74 N_s^{-0,15}), \quad (13)$$

Se escoge el valor más alto (Ψ_{ec} o Ψ_{ee}) y con este valor se despeja h_i de la Ecuación (7)

En las Ecuaciones (12) y (13) se utiliza un parámetro F , que es una constante que depende de B_o

Para $B_o \geq 11 \times 10^{-4}$, $F = 14,7$.

Para $B_o < 11 \times 10^{-4}$, $F = 15,43$.

El coeficiente h_o (coeficiente de película para fluido transitando por la parte externa de los tubos) puede estimarse en la entrada, o en la salida del intercambiador, mediante la correlación de Kern, expresada en la Ecuación (14).

$$h_o = 0,728 \left[\frac{\rho_l^2 g \lambda_{vap} k_l^3}{\mu_l \Delta T_p d_o} \right]^{\frac{1}{4}} \frac{1}{N^{1/6}}, \quad (14)$$

donde:

N : Estimado del número de tubos por fila [adim],
 d_o : Diámetro externo de los tubos [m].

ΔT_p : Diferencia entre la temperatura de saturación y la temperatura de superficie del tubo [K].

El coeficiente global de transferencia de calor se calcula a través de las resistencias térmicas asociadas al proceso convectivo que ocurre tanto dentro como por fuera de los tubos, así como a la conducción en la pared de cada uno de ellos, tomando también en cuenta las resistencias térmicas de ensuciamiento. Así, refiriéndose al área externa se expresa en la Ecuación (15).

$$U_0 = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o R_{si}}{d_i} + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k} + R_{so} + \frac{1}{h_o}}, \quad (15)$$

donde:

d_i : Diámetro interno de los tubos [m],

h_i : Coeficiente convectivo por dentro de los tubos [$W/m^2 \cdot K$],

h_o : Coeficiente de película por fuera de los tubos [$W/m^2 \cdot K$],

R_{so} : Coeficiente de ensuciamiento por fuera de los tubos [$m^2 \cdot K/W$],

R_{si} : Coeficiente de ensuciamiento por dentro de los tubos [$m^2 \cdot K/W$].

$$\Delta T_p = \Delta T [1 - U [R(des)]]],$$

con

$$R(des) = R_{so} + \frac{d_o}{d_i} \left(R_{si} + \frac{1}{h_i} \right) + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k},$$

donde:

ΔT : Diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el fluido frío [K],

k : Conductividad térmica del material de los tubos [$W/m \cdot K$].

Tomando en consideración que, debido al cambio de fase, el coeficiente global de transferencia de calor varía apreciablemente a través del intercambiador, se toma como criterio el uso de un coeficiente promedio entre la entrada y la salida del equipo, expresado en la Ecuación (16)

$$U_0 = \frac{U_e + U_s}{2}. \quad (16)$$

2.3. Tercera fase: Propuesta de solución simultánea de modelos, tanto dentro como por fuera de los tubos.

A partir del modelado matemático previamente analizado, se estructuró una secuencia de cálculo iterativa, que implica el uso de valores iniciales para el coeficiente global de transferencia de calor y para el ΔT_p como se muestra en la Figura 2.

La secuencia de cálculo es el punto de partida para la construcción de un algoritmo, que además incluye la determinación de las propiedades pertinentes para llevar a cabo la estimación de las diferentes variables.

2.4. Cuarta fase: Herramienta propuesta

La herramienta que se propone incluye una estructura de programación orientada a objetos desarrollada en lenguaje de programación Java, permitiendo el diseño y desarrollo de las diferentes ventanas que se disponen en la aplicación, logrando además asegurar la portabilidad del producto obtenido para diferentes sistemas operativos. Se incluyen elementos para la validación de entrada de

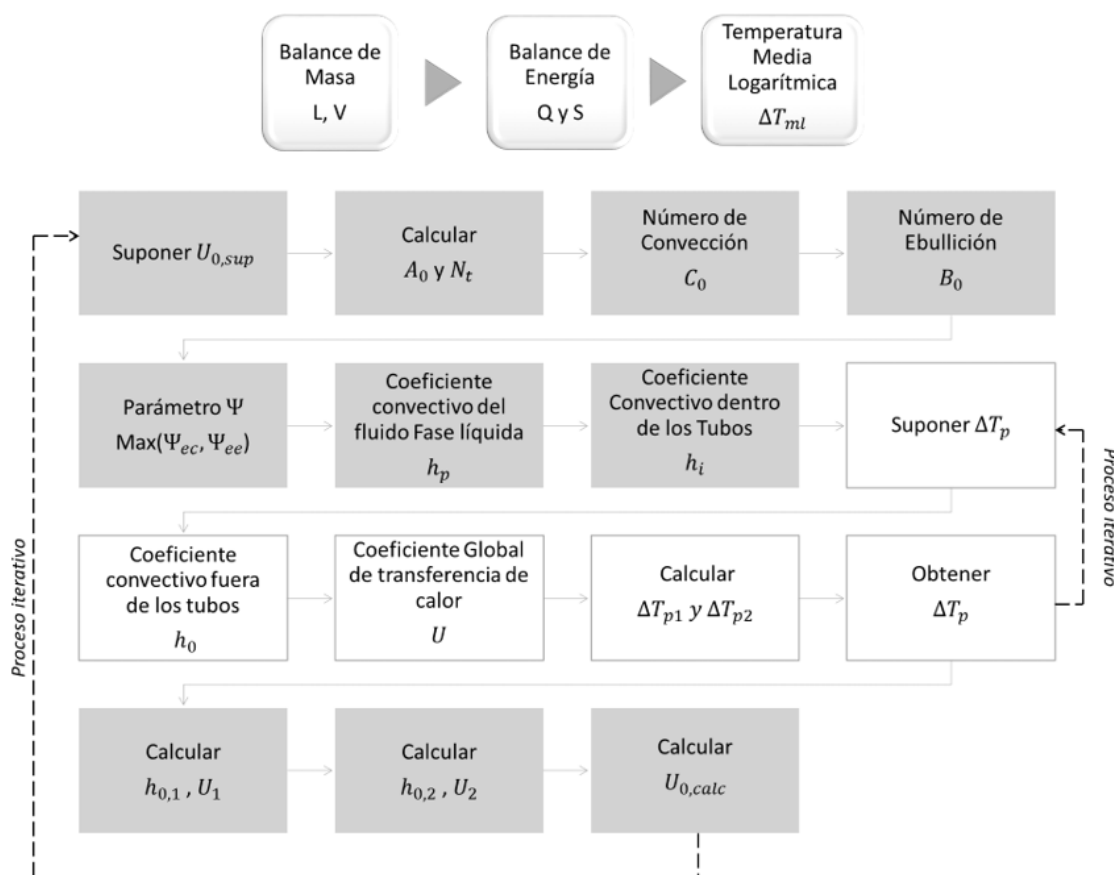


Figura 2: Secuencia de cálculo asociada al modelado matemático del proceso.

datos, verificando que se especifiquen los campos requeridos, así como las posibles unidades de las magnitudes asociadas.

De igual forma, se incluyen aspectos didácticos, como por ejemplo el perfil de temperaturas, que se implementa a través de un gradiente constituido por una combinación de tres colores, mantienen una relación proporcional con la longitud total de los tubos para mostrar de manera intuitiva la posición en el intercambiador donde se alcanza el cambio de fase; adicionalmente se contempla la posibilidad de generar un reporte, a través de un proceso de interacción entre la aplicación y una hoja de cálculo para la organización de los resultados generados.

2.5. Quinta fase: Validación de la herramienta computacional

La validación de la herramienta desarrollada se efectúa por medio del uso de datos experimentales

disponibles [9], atendiendo también a las características y dimensiones de un equipo real.

3. Discusión de resultados.

De acuerdo a las fases descritas, se desarrolló una herramienta que articula los cálculos pertinentes para describir las variables del proceso, teniendo en cuenta una interfaz gráfica de usuario, en donde, en principio es posible introducir los datos de entrada, a través de dos ventanas, la primera en la Figura 3, está asociada a las características del equipo, específicamente de los tubos, en lo relativo al material, el diámetro, la longitud y el tipo de arreglo. La segunda ventana en la Figura 4, corresponde a las condiciones de operación del sistema.

Es de hacer notar, que la herramienta cuenta con mecanismos de validación de entrada de datos tanto por señal audible como visual. Asegurando así,

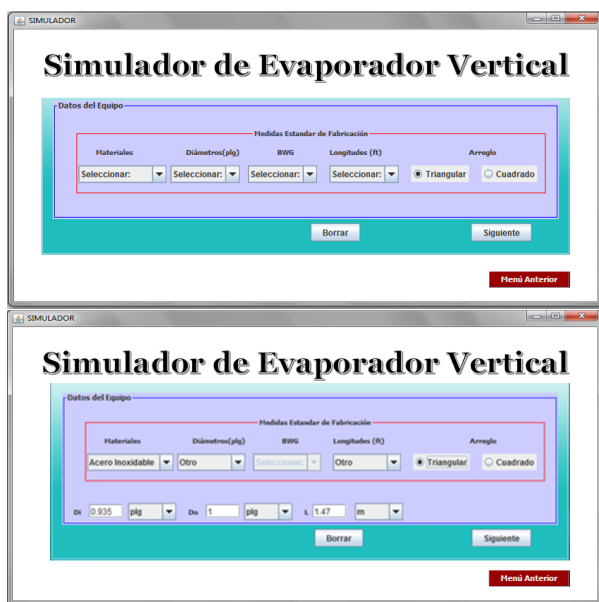


Figura 3: Ventana correspondiente a las características del equipo

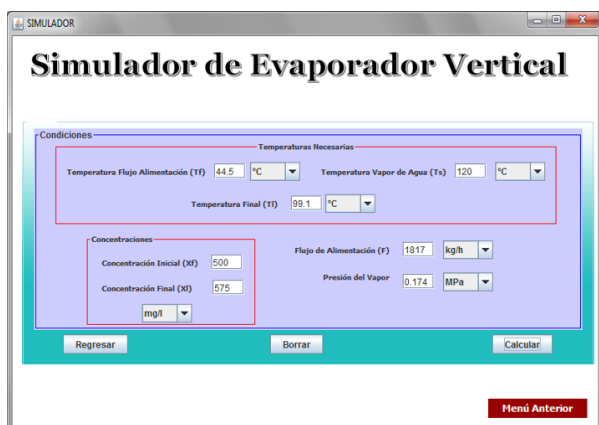


Figura 4: Ventana correspondiente a las condiciones de operación del sistema

que se dispone de todos los requerimientos para la realización de cálculos respectivos.

Una vez suministrada la información, la herramienta muestra una ventana que concentra los resultados de implementar el modelado matemático del proceso, de acuerdo con la Figura 5. Así mismo, es posible visualizar el perfil de temperatura del fluido a lo largo de los tubos, indicando en azul las temperaturas más bajas y en rojo las más altas como se refleja en la Figura 6.

La Figura 7 muestra el reporte de resultados que

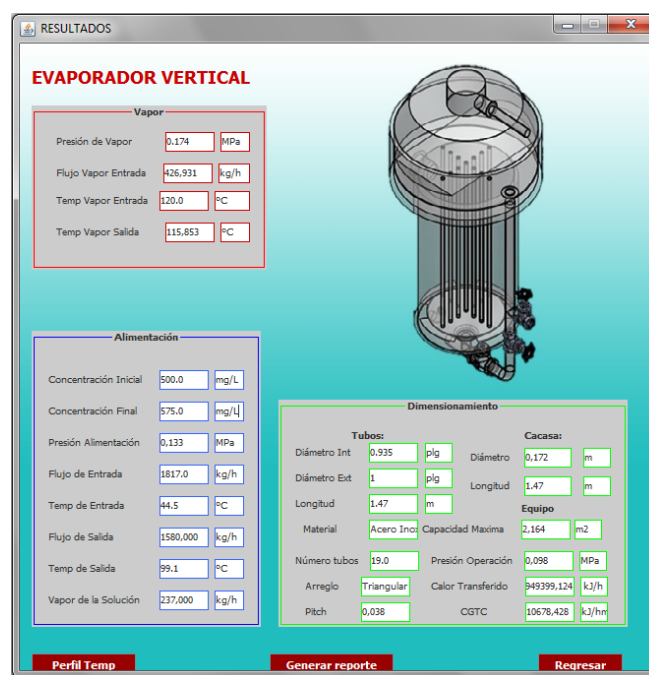


Figura 5: Ventana correspondiente a los resultados del proceso



Figura 6: Perfil de temperatura del fluido que circula por el interior de los tubos

genera la herramienta en una hoja de cálculo, la cual es de fácil manejo para el usuario final.

Los datos empleados para la validación están en las Tablas 1 y 2 respectivamente, la primera contiene las características de los tubos del evaporador vertical y la segunda, las condiciones de operación del equipo. Los datos suministrados, corresponden a un evaporador vertical de tubos largos que opera con agua potable y cuya finalidad

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DPTO DE TÉRMICA Y ENERGÉTICA

PROYECTO: EVAPORADOR VERTICAL DE TUBOS LARGOS

Elaborado por: _____

Fluido de Alimentación (Frio)

Flujo de Entrada		
Temp de Entrada		
Presión de Entrada		
Flujo de Salida		
Temp de Salida		
Concentración Inicial		
Concentración Final		
Vapor de la Solución		

Fluido Caliente

Presión de Vapor		
Flujo de Vapor Entrada		
Temp de Vapor Entrada		
Temp de Vapor Salida		

Dimensionamiento de Equipo

Tubos:			Carcasa:		
Diámetro Interno			Diámetro		
Diámetro Externo			Longitud		
Longitud			Presión Ope.		
Pitch			Cap. max.		
Número			Calor transf.		
Material			CGTC		
Arreglo					

Observaciones: _____

Fecha de Emisión	Revisado Por:	Aprobado por:	Fecha Aprobación:

Figura 7: Reporte de Resultados

Tabla 1: Características de los tubos

Material: Acero Inoxidable		
Arreglo: Triangular		
Medida	Valor	Unidad
Diámetro Interno (di)	0,935	pulg
Diámetro Externo (do)	1	pulg
Longitud (L)	1,47	m
Numero de tubos	19	–

Tabla 2: Condiciones de Operación para el proceso de validación

Condición	Valor	Unidad
Flujo de Alimentación (F)	1817	kg/h
Presión del Vapor de calentamiento (Pv)	0,174	MPa
Temperatura Flujo Alimentación (Tf)	44,5	°C
Temperatura Vapor de Calentamiento (Ts)	120	°C
Temperatura Final (TI)	99,1	°C
Concentración Inicial (xf)	500	mg/L
Concentración Final (xl)	575	mg/L

es la producción de vapor de agua, el medio de calentamiento a su vez es vapor de agua.

Tabla 3: Resultados de las iteraciones de cálculo

Iteraciones	U ($W/m^2 \cdot K$)	Nro tubos	Error
1	2277,24044	37	–
2	2685,42540	25	408,18495
3	2861,65375	21	176,22835
4	2919,91844	20	58,26469
5	2958,56678	19	38,64834
6	2964,97186	19	6,40509
7	2966,02365	19	1,05178
8	2966,19610	19	0,17245
9	2966,22437	19	0,02827
10	2966,22900	19	0,00463
11	2966,22976	19	0,00076
12	2966,22989	19	0,00012
13	2966,22991	19	0,00002

En tal sentido, la Tabla 3 contiene los resultados de los cálculos, en cuanto al comportamiento de los valores del coeficiente global de transferencia de calor en el proceso iterativo y en consecuencia del número de tubos resultante, tomando como criterio de convergencia un error absoluto de 1×10^{-4} , entre dos iteraciones consecutivas. Los resultados finales mostrados, son consistentes con los valores reportados en la bibliografía para este tipo de sistemas, que oscilan típicamente entre 2280 y 3400 $W/m^2 \cdot K$ [10].

La Tabla 4 muestra los resultados del modelaje realizado de un equipo existente, en donde los valores arrojados por el simulador reproducen el comportamiento real del equipo [9]. Las variables que pueden ser ajustadas para lograr la simulación son las de salida del evaporador como, por ejemplo: la temperatura de salida del líquido o la concentración de sales. Es importante destacar que, los cambios realizados a la temperatura de salida tienen asociados cambios en el coeficiente global de transferencia de calor porque están íntimamente relacionados, como se puede observar en las correlaciones del algoritmo de cálculo del modelo.

4. Conclusiones

La correlación de Shah (Coeficiente de convección por dentro de los tubos) y la correlación de Kern (Coeficiente de película por fuera de los tubos) permitieron la obtención de valores confiables del Coeficiente Global de Transferencia

Tabla 4: Comparación de datos reales con los resultados del simulador

Parámetros	Unidad	Resultados		
		Real	Simulados	Error (%)
Coficiente global de Transferencia de calor	W/m ² ·K	10020,638	10678,428	6,56
Área de Transferencia de calor	m ²	2,2287	2,0914	6,16
Número de tubos	–	19	19	0,00

de Calor en Evaporadores Verticales de tubos largos, obteniendo valores dentro de los rangos encontrados en la bibliografía, para este tipo de equipo.

La complejidad de los cálculos de transferencia de calor, que se basa en ecuaciones con las variables claves, como temperaturas, no explicitas, hace necesario llevar a cabo procesos iterativos que puedan generar los resultados de una forma rápida y sencilla, lo cual se implementa a través del modelo desarrollado.

Los módulos de cálculo elaborados fueron codificados bajo el lenguaje de programación Java, mediante el uso de clases y módulos, que facilitan el proceso de creación del simulador. El programa desarrollado permite la introducción sencilla de datos con diferentes unidades en: temperatura, presión y dimensiones. Además, presenta mensajes de error cuando existe la ausencia de datos o están fuera del rango permitido por la herramienta.

Como resultado de la capacidad que posee la herramienta, el usuario puede cambiar los datos de entrada y de salida, manteniendo los mismos parámetros de diseño, pudiendo así realizar diferentes corridas para un mismo equipo, cambiando solo las variables operacionales y pudiendo comparar los resultados obtenidos. Esto favorece a la toma de decisiones del usuario para satisfacer a la necesidad del proceso de transferencia de calor.

5. Referencias

- [1] José M. Cueli G. Ingeniería de procesos de planta de producción de 150 t/día de nitrato amónico poroso prilado a partir de nitrato amónico técnico. Trabajo de fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2017.
- [2] G. Macias y I. Segovia. Desarrollo de un simulador para el diseño y evaluación de evaporadores de simple efecto. Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [3] A. Mu noz. Aplicación informática para el diseño y operación de evaporadores de múltiple efecto en industria. Trabajo de fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
- [4] A. Parrales, D. Colorado, Díaz-Gómez J.A., A. Huicochea, A. Álvarez, and J.A. Hernández. New void fraction equations for two-phase flow in helical heat exchangers using artificial neural networks. *Applied Thermal Engineering*, 130:149–160, 2018.
- [5] J. Xue, Q. Cui, J. Ming, Y. Bai, and L. y Li. Analysis of thermal properties on backward feed multieffect distillation dealing with high-salinity wastewater. *Journal of Nanotechnology*, 2015:1–7, 2015.
- [6] J. Sadhwani, J. Santana y N. Melián. La simulación como método de aprendizaje en el diseño de sistemas térmicos empleados en la desalación de agua de mar. In *III Jornadas Iberoamericanas de Innovación Educativa en el ámbito de las TIC*, Las Palmas de Gran Canaria, España, noviembre 2016.
- [7] M.M. Shah. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: Equations and further study. *ASHRAE Transactions; Conference: Semi-annual meeting of the American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers*, 88, Jan 1982.
- [8] Z. Zhanru, F. Xiande, and Dingkun L. Evaluation of correlations of flow boiling heat transfer of r22 in horizontal channels. *The Scientific World Journal*, 2013:1–14, 2013.
- [9] J. León y J. Aguinaco. Desarrollo de un software de simulación para el sistema evaporador-condensador del laboratorio de ingeniería química de la universidad de carabobo. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2007.
- [10] J. Welty, C. Wicks, R. Wilson, and G. Rorrer. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, USA, 2007.

Implementation of Monte Carlo algorithm in parallel for modeling the propagation of light in adult human skin

A. Muñoz* y G. López

Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas, Universidad de Carabobo, Avenida Salvador Allende, Naguanagua, Carabobo.

Abstract.- A simplified adult skin model that proposed it as a three layer turbid medium is presented for studying the Absorbance of skin as a function of melanin, bilirubin and hemoglobin concentration. The model was tested in a simulation based on the Monte Carlo method with the implementation of an algorithm in python3 for running the simulation in parallel with the libraries subprocess and multiprocessing. With data from 100 initial files, the simulation was run sequentially and in parallel. For four processors, the speedup was 3,71 and the efficiency 0,93. It was confirmed that melanin plays an important role as a Chromophore, losing information from the dermis and hypodermis for Melanosom volumen fraction above 0.033. It was also found that for bilirubin concentrations above 0.02 g/l, there are changes in the shape of the diffuse reflectance curve in the 450 - 500 nm range. The blood vessel density and the hemoglobin concentration were found to affect the Absorbance of the skin in the same way and both affect it in the 400 - 600 nm range mainly.

Keywords: Monte Carlo; parallel; absorbance; diffuse reflectance.

Implementación de un Algoritmo Monte Carlo en paralelo para el modelado de la propagación de la luz en piel humana adulta

Resumen.- Se presenta un modelo simplificado de la piel humana adulta como un medio turbio de tres capas para estudiar el comportamiento de la Absorbancia en este tejido debido a la variación de bilirrubina, hemoglobina y melanina mediante una simulación basada en el método de Monte Carlo e implementando un algoritmo en paralelo en el lenguaje de programación python3 para la ejecución del mismo con las librerías subprocess y multiprocessing. Se probó el algoritmo en paralelo tomando 100 archivos iniciales y ejecutándolos de manera secuencial y en paralelo. La implementación consiguió una mejora en el rendimiento de 3,71 y eficiencia de 0,93 para cuatro procesadores. Se confirmó que la melanina es uno de los Cromóforos más influyentes en la absorción de la piel, perdiéndose información óptica de la región inferior a la epidermis para una fracción de volumen de melanosomas mayor a 0,033. Se observó que para concentraciones de bilirrubina mayor a 0,02 g/l hay cambios en la concavidad de la reflexión difusa entre 450 y 500 nm. Se determinó que la densidad de vasos sanguíneos y la concentración de hemoglobina tienen efectos similares en la Absorbancia y ambas afectan predominantemente en el espectro entre 400 y 600 nm.

Palabras claves: Monte Carlo; paralelo; absorbancia; reflexión difusa.

Recibido: diciembre 2017

Aceptado: abril 2018

1. Introducción

El transporte de energía en un medio a través de luz está descrito por la Ecuación de Transferencia Radiativa. Esta es una ecuación integro-diferencial cuya solución analítica no es trivial. En su lugar

existe la alternativa de utilizar métodos numéricos para simular el comportamiento de la luz en un medio turbio. Uno de los métodos de elección para la simulación del transporte de fotones es el método de Monte Carlo [1].

El método de Monte Carlo surgió durante el periodo de posterior a la Segunda Guerra Mundial, finalizando la década de los 40. Luego de la creación de la EINAC, acrónimo de *Electronic Numerical Integrator And Computer* (Computador e Integrador Numérico Electrónico), Stanislaw Ulam, quien había sido parte de la Facultad de

* Autor para correspondencia:

Correo-e: aamunoz@gmail.com (A. Muñoz)

Matemáticas de la Universidad de California, tuvo la visión aprovechar la capacidad de computo de la EINAC para utilizar técnicas estadísticas [2]. John Von Neumann, intrigado por las ideas de Ulam, penso en un acercamiento estadístico al problema de la difusión de neutrones en material de fisión, donde los efectos de absorción, esparcimiento, fisión y escape están regidos por el azar. Este problema describe la esencia del método. Hay muchas definiciones para el método MC, pero la que se elige es que: Un método de Monte Carlo (MC) se puede definir como un método numérico en el que se utilizan deliberadamente números aleatorios en un calculo que tiene la estructura de un proceso estocástico[3, p 2], un proceso cuya evolución este definida por una serie de eventos aleatorios. El resultado se obtiene normalmente realizando una serie de repeticiones del calculo y al final obteniendo un promedio de los resultados. El promedio, según la Ley de Números Grandes, se acercara más al valor esperado a medida que se hagan mayor numero de repeticiones. Esto también produce simulaciones más largas, por lo que se fija usualmente un error aceptable y solo se realizan las repeticiones necesarias. Para solventar el problema del tiempo también se utiliza en ocasiones programación en paralelo, donde se divide el trabajo de computo en varios núcleos de un mismo procesador.

El método MC (Monte Carlo) se ha popularizado y su uso se ha expandido a diversas áreas como la óptica y la física médica. En particular en el área de física médica uno de los métodos de diagnostico alternativo no invasivo existente para enfermedades de la piel, la espectrofotometría de reflexión difusa, mide la respuesta óptica espectral de este tejido con el fin de extraer datos de las curvas de reflexión difusa de la misma. La piel puede ser modelada como un medio turbio de múltiples capas: la epidermis formada principalmente por keratinocitos que contienen melanosomas y estos a su vez contienen melanina, el pigmento y cromóforo predominante de la piel, para proteger sus núcleos celulares; la dermis que contiene fibras de colágeno que le dan fortaleza y elasticidad a la piel, además de contener vasos sanguíneos, donde la hemoglobina de los hematocritos y la bilirrubina,

un compuesto amarillento que surge del proceso normal de descomposición de la hemoglobina que en altos niveles puede indicar problemas hepáticos, son dos cromóforos importantes; y la capa de tejido subcutaneo o hipodermis, constituida principalmente por grasa.

En este trabajo presenta un modelo simplificado de la piel, para estudiar el efecto de la hemoglobina, la bilirrubina y la melanina en la Absorbancia de la piel adulta y se evalua la efectividad de una implementación de la programación en paralelo en este tipo de simulaciones para aumentar la eficiencia del mismo.

2. Metodología

2.1. Un modelo simplificado de la piel

El modelo de la piel utilizado presenta como un medio de tres capas planas e infinitas horizontalmente: la epidermis, dermis y tejido subcutáneo o hipodermis, tomando como medio superior aire.

La respuesta base del tejido de epidermis y la dermis, sin melanina ni sangre, puede ser aproximada de la data de Iyad Saidi [4] (se logra la expresión utilizando una esfera de integración y tomando en cuenta la contribución extra de ambos pigmentos en las muestras), como

$$\mu_{a,base} = (7,84 \times 10^8) (\lambda^{-3,255}),$$

donde λ es la longitud de onda. La data de Saidi viene de muestras in vitro de piel neonatal en el rango entre 450 - 700 nm.

El principal agente absorbente de la epidermis es la melanina que se asume esta dispuesta de manera uniforme en el volumen de la capa y para englobar el resto de la contribución del tejido se tiene $\mu_{a,base}$. La absorción de esta capa

$$\mu_{a,epi}(\lambda) = f_{me} \mu_{a,me}(\lambda) + (1 - f_{me}) \mu_{a,base}, \quad (1)$$

donde f_{me} es la fracción volumen de los melanosomas que contienen melanina en la epidermis, los valores de esta fueron tomados de datos publicados [5] y $\mu_{a,me}(\lambda)$ es el coeficiente de absorción espectral de los melanosomas, cuya

expresión, de acuerdo con data experimental publicada [6], se puede aproximar como

$$\mu_{a,me}(\lambda) = 6,6 \times 10^{11} \lambda^{-3,33}. \quad (2)$$

En el caso de la dermis se toman en cuenta dos cromóforos importantes: la hemoglobina y la bilirrubina. En la sangre hay dos tipos de hemoglobina: oxigenada y desoxigenada. Cada una tiene respuestas espectrales diferentes. Los coeficientes de absorción de los cromóforos se pueden despejar de la Ley de Beer-Lambert, suponiendo estos como pigmentos disueltos en un medio con una determinada concentración

$$\begin{aligned} \mu_{a,bi}(\lambda) &= \ln(10) \frac{C_{bi}}{P_{bi}} \varepsilon_{bi}(\lambda) \\ \mu_{a,heox}(\lambda) &= \ln(10) \frac{C_{heox}}{P_{heox}} \varepsilon_{heox}(\lambda) \\ \mu_{a,hedesox}(\lambda) &= \ln(10) \frac{C_{hedesox}}{P_{hedesox}} \varepsilon_{hedesox}(\lambda) \end{aligned}$$

donde P peso molar [g/mol], C es la concentración en [g/l] y ε el coeficiente de extinción molar [$\text{cm}^{-1}/(\text{mol/l})$]. Cada una de estas expresiones debe ser escalada por un factor f similar al de la ecuación (2) y los coeficientes de extinción molar $\varepsilon(\lambda)$ fueron tomados de la data experimental (ver sec 2.a de [5]). Por parte de la hemoglobina el balance de la hemoglobina oxigenada y desoxigenada esta dado por la oxigenación en sangre S y

$$\begin{aligned} \mu_{a,he}(\lambda) &= S\mu_{a,heox}(\lambda) \\ &+ (1 - S)\mu_{a,hedesox}(\lambda). \end{aligned} \quad (3)$$

Así el coeficiente de absorción de la dermis para una unidad de volumen sera la suma de la contribución de los constituyentes que absorben luz que en este caso serían la hemoglobina y la bilirrubina con datos de la fracción de volumen de los vasos sanguíneos según datos publicados [7].

El esparcimiento en la piel es causado principalmente por la keratina y el colágeno en terminos de la contribución del esparcimiento según Mie y según Rayleigh [8]. La expresión del factor de anisotropía g fue tomada de propiedades ópticas publicadas para la epidermis y la dermis [9].

Por último la hipodermis o capa subcutanea se considera principalmente esparidora. El coeficiente de absorción y el factor de anisotropía se toman de datos experimentales como 600 nm^{-1} y 0,8, respectivamente y ambos constantes en el espectro [10].

2.2. Monte Carlo en multiples capas

El programa Monte Carlo en multiples capas o MCML por sus siglas en ingles (*Monte Carlo Multi-layered*), es un programa escrito en el lenguaje ANSI C para el modelado de transporte de fotones en un medio de múltiples capas, donde las propiedades ópticas (μ_s , μ_a , g y n) y el grosor de cada capa (d) son conocidos [1]. El código describe un haz de fotones de una única longitud de onda e infinitesimalmente delgado que incide perpendicularmente en el medio. El simulador lanza un paquete de fotones con intensidad uno, de manera perpendicular a la superficie del medio. Calcula el camino libre medio antes de que ocurra una interacción, determina el resultado de las interacciones de absorción, esparcimiento y en caso de un cambio de capa refracción de manera aleatoria, hasta que el fotón sale del medio o pierde suficiente intensidad para ser desechado. Luego se sigue con el siguiente fotón hasta que se lancen el número de fotones previamente establecido. Para más detalles del programa ver [1].

Los parámetros simulados son la absorbancia, transmitancia, reflectancia difusa y especular. El MCML guarda el escape de fotones en la parte superior como $R_d(r, \alpha)$ e inferior como $T(r, \alpha)$, donde r es el radio y α el ángulo con respecto a la normal del medio. El programa toma un archivo de entrada en el que se pueden indicar múltiples simulaciones independientes en un mismo archivo de entrada, generando incluso archivos de salida separados para cada simulación, por lo que puede generar data para un estudio espectral con un solo archivo.

Indiferentemente de si se indican datos para múltiples simulaciones en un archivo o estos se separan en archivos distintos, el simulador ejecuta un solo **set** a la vez, comprendiendo como **set** los datos necesarios para realizar una simulación (μ_s , μ_a , g , n y d para cada capa). Se ejecuta una

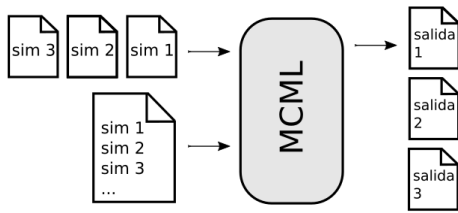


Figura 1: Ilustración de la manera en la que se ejecuta el MCML de manera secuencial.

simulación a la vez, se guardan los resultados en un archivo de salida y se repite para cada archivo (ver Figura 1), con la variación de que el usuario debe ser quien ejecute el simulador para cada archivo en caso de suministrar los sets de datos en archivos de entrada separados. Nótese además que para una sola instancia de parámetros del modelo, habrán tantos **sets** como longitudes de onda λ .

2.3. El MCML en paralelo

Se decidió que el punto en el que se realiza el calculo en paralelo sera en la ejecución de cada set de datos en lugar de en cada fotón. Para la implementación en el MCML se modifico la salida de datos en consola que no se consideraron necesarias, pero la simulación en si no se modifico. En su lugar se escribió un programa en el lenguaje python3, de nombre pyMCML, para facilitar y automatizar la generación de archivos iniciales, ejecución del simulador y realización de gráficas. En el pyMCML se utilizan dos librerías para ejecutar el programa en paralelo subprocess y multiprocessing.

La librería subprocess brinda una serie de funciones que permiten ordenar la ejecución de un programa (como por ejemplo el MCML). Por otro lado, multiprocessing permite dividir la ejecución de distintas funciones entre varios núcleos de la maquina. Combinando estas dos funcionalidades se puede ejecutar cualquier programa en paralelo.

La implementación amerita la creación de una función que llamaremos $\text{sim}(A)$, donde A son los datos necesarios para la ejecución del programa que se desea ejecutar en paralelo. En este caso A es la ruta de un archivo de entrada y sim , utilizara subprocess para que se ejecute el MCML con este archivo. Luego el número completo de archivos

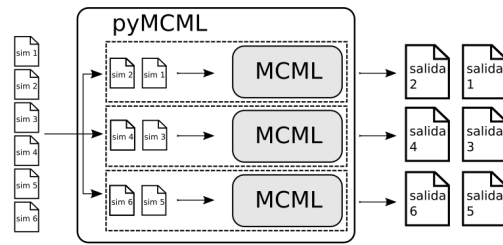


Figura 2: Ilustración elemental de la manera en la que se ejecuta el MCML en paralelo al utilizar pyMCML.

iniciales $N = km$ (k es el número de longitudes de onda y m el número de variaciones de parámetros en el modelo) se divide equitativamente entre el número de *procesos* independientes que se desean ejecutar n , quedando n grupos de archivos de entrada G con N/n elementos. En caso de que N no sea divisible entre n , número restante de archivos se distribuye entre los grupos y el número de elementos no es igual en cada grupo. Luego, con multiprocessing se definen n *procesos* para que cada uno ejecute a sim sobre cada A de uno de los grupos G . En la Figura 2 se observa una ilustración del proceso. De esta forma solo se deben preparar los archivos iniciales de manera conveniente para ser utilizados en este algoritmo, colocando un **set** en cada archivo inicial.

Se ejecutaran 100 archivos iniciales con **sets** diferentes de manera secuencial y en paralelo y se evaluara la mejora en el rendimiento

$$S(n) = T(1)/T(n),$$

donde n es el número de procesadores utilizados y T el tiempo para ese número de procesadores; y la eficiencia

$$E(n) = S(n)/n.$$

2.4. Simulaciones

Las simulaciones fueron realizadas con una computadora con procesador Intel® Core™i5-3570K de 4 núcleos de 3,40 GHz de 64 bits y 4 Gb de RAM con Ubuntu 16.06. Todas las simulaciones fueron realizadas con 100000 fotones, en el rango de 400 – 700nm, con una resolución de 4nm para un total de 76 longitudes

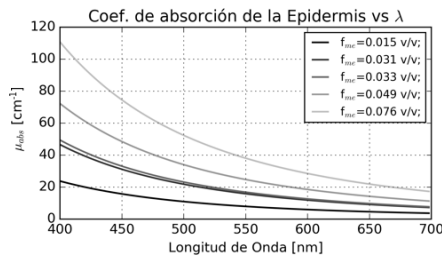
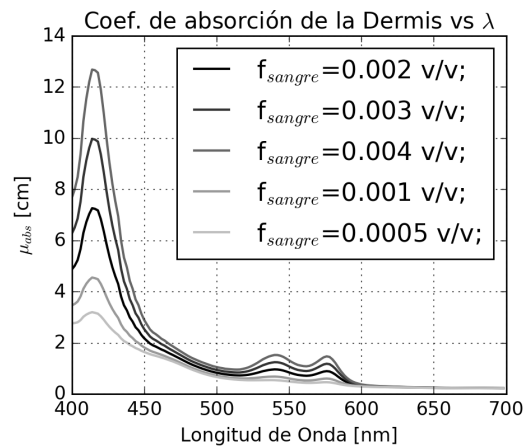


Figura 3: Coeficiente de absorción de la Epidermis para diferentes concentraciones de melanosomas en la piel.

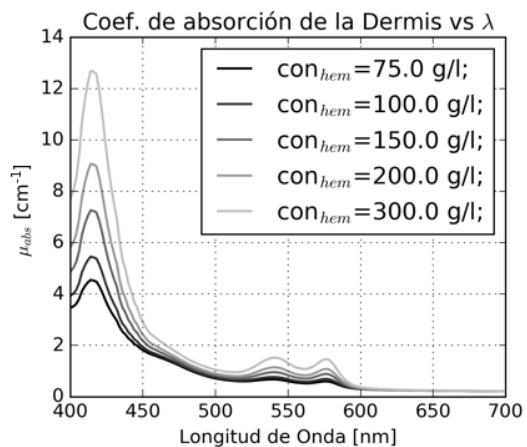
de onda y con valores de control a menos que se indique lo contrario de $f_{sng} = 0,002$, $f_{me} = 0,033$ (Fototipo III[5]), $C_{bi} = 0,01$ g/l y $C_{he} = 150$ g/l. En la primera simulación se evaluó el efecto de la melanina variando la fracción de melanosomas para todos los Fototipos según Narea [5] $f_{me} = \{0,015; 0,031; 0,033; 0,049; 0,076\}$. Para la segunda simulación se probó el efecto de la bilirrubina, variando $C_{bi} = \{0,003; 0,01; 0,02; 0,03; 0,04\}$ g/l. Para la tercera y cuarta se evalúan los efectos de la hemoglobina, primero variando el volumen de los vasos sanguíneos $f_{sng} = \{0,0005; 0,001; 0,002; 0,003; 0,004\}$ y luego de la concentración en sangre $C_{he} = \{75, 100, 150, 200, 300\}$ g/l. Con cinco valores por parámetro en cada simulación se generaron 380 archivos iniciales para cada una.

3. Resultados

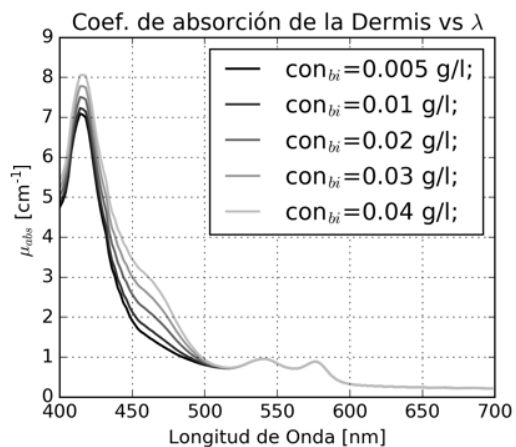
Al ejecutar los archivos de manera secuencial y en paralelo se observó que los tiempos de computo no son constantes a lo largo del espectro, tomando más tiempo en las longitudes donde la absorción es más débil y por lo tanto con reflexión más fuerte. En estas longitudes de onda los fotones tienen más interacciones débiles con el medio, lo que les permite eventualmente salir de este luego de esparcimientos múltiples, por lo que el tiempo de computo se relaciona con la cantidad de interacciones calculadas antes de pasar al fotón siguiente. En cuanto a la eficiencia, con 10^7 fotones, en el método secuencial el tiempo de ejecución promedio por fotón fue de $197 \mu s/\text{fotón}$ con una eficiencia de y y para el cálculo en paralelo el



(a) f_{sng}



(b) C_{he}



(c) C_{bi}

Figura 4: Coeficiente de absorción de la Dermis para variaciones de (a) f_{sng} , (b) C_{he} y (c) C_{bi} .

promedio fue de $53 \mu s/\text{fotón}$ utilizando los cuatro núcleos de la computadora. Con el algoritmo en paralelo hubo una mejoría de $S(4) = 3,71$ en el

rendimiento y se tuvo una eficiencia de $E(4) = 0,93$.

Se muestra el coeficiente de absorción de la epidermis de la primera simulación en la Figura 3. La forma exponencial de la curva es consecuencia del modelo utilizado y de la ecuación (2). La absorción varía proporcionalmente junto con la concentración de melanosomas como consecuencia de ecuación (1).

En la Figura 4 se presentan los coeficientes de absorción de la dermis para la segunda, tercera y cuarta simulación. El aumento en la absorción en la región de 400 a 600 nm observado en las Figuras 4a y 4b es similar y equivalente según las ecuación (3). En la Figura 4c hay un cambio de concavidad entre los 450 y 500 nm a partir de $C_{bi} = 0,02$ g/l es cual se considera la máxima concentración saludable, además del aumento proporcional de la absorción. Antes de los 450 nm el cambio no es tan pronunciado como en la variación de hemoglobina. Se denota también que la escala de la absorción por la melanina es mayor que la de otros cromóforos.

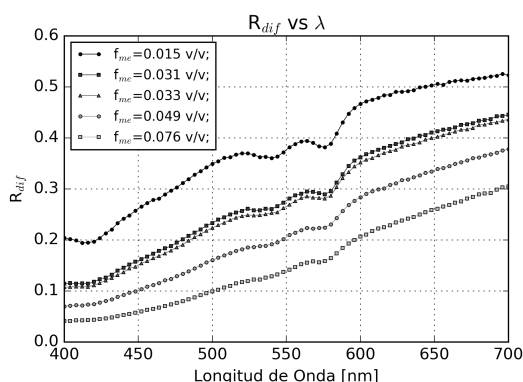


Figura 5: Reflectancia difusa de piel simulada para varios f_{me} .

En la Figuras 5, 6, 7 y 8 se presentan las gráficas de reflectancia difusa obtenidas de las simulación. En la Figura 5 se ve que la fracción de melanosomas y produce una reflexión difusa más lineal, perdiendo los valles presentes entre 500 y 600 nm producto de la absorción de la dermis. Para los $f_m = 0,049$ y $0,076$ no se observa el primer valle entre 400 y 450 nm que se observa en las demás. La intensidad de la luz reflejada es aproximadamente la mitad para los valores mayores a La melanina

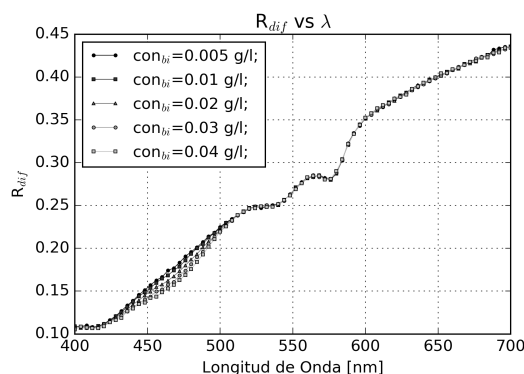


Figura 6: Reflectancia difusa de piel simulada para varios C_{bi} .

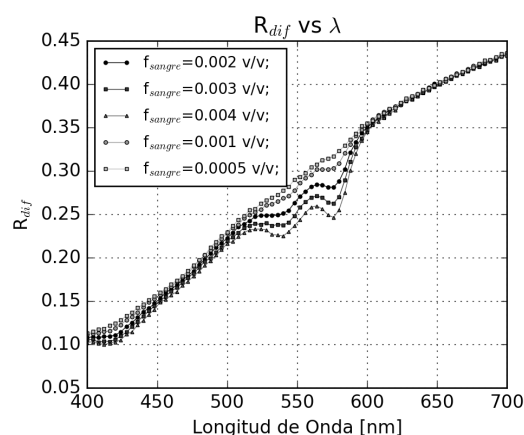


Figura 7: Reflectancia difusa de piel simulada para varios f_{sngr} .

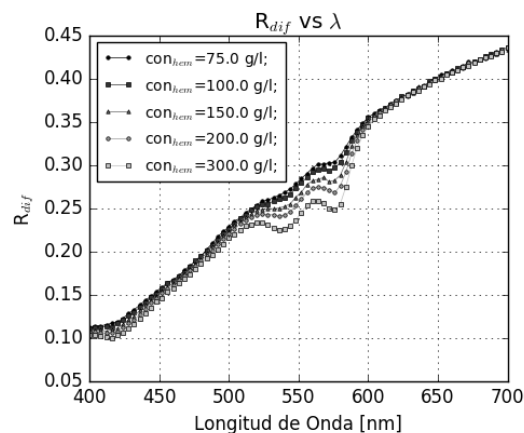


Figura 8: Reflectancia difusa de piel simulada para varios C_{he} .

absorbe la mayor parte de la luz incidente en todo el espectro, impidiendo que esta llegue la dermis.

En la Figura 6 en la región de 400 - 500 nm la

curva de reflectancia cambia una tendencia lineal para una concentración normal de bilirrubina, por una concavidad que aumenta con la concentración. La variación se limita a la misma zona donde se produce el cambio de concavidad en la Figura 4c.

En las Figura 7 y 8 se observa que la variación de f_{sng} y C_{he} respectivamente. Ambas tienen comportamientos parecidos entre si, al igual que los cambios en $\mu_{a,dermis}$. Se esperaría mayor absorción y menor reflexión al aumentar la C_{he} , ya que al aumentar f_{sng} , disminuye la contribución del tejido base. Esto no se aprecia en los resultados obtenidos. El cambio más prominente está entre los 500 y 600 nm. Por debajo de 500 nm, a pesar del incremento en el coeficiente de absorción, no se ve un cambio pronunciado. Esta también es la zona de mayor absorción de la epidermis y por lo que se pierde información de la dermis aún para un $f_{me} = 0,033$ que es el equivalente a un Fototipo III. A pesar de esto se logra apreciar el valle entre 400 y 450 nm correspondiente al pico de absorción de la dermis.

4. Conclusiones

Con una mejoría en el rendimiento de $S(4) = 3,71$ y $E(4) = 0,93$ con cuatro núcleos de procesamiento, se desea seguir evaluando el alcance esta implementación del simulador en paralelo. Entre los desafíos que se presentan, se encuentra la porción del programa que no se puede paralelizar. Según la Ley de Amdahl para calcular $S_{Am}(n, p)$ de acuerdo al número de núcleos y la porción paralelizable, con un programa donde se pueda paralelizar una fracción 0,98 (98 %) del código, se obtendría $S_{Am}(4, 0,98) = 3,77$ y $E_{Am}(4, 0,98) = 0,94$. Estando en el mismo orden que los resultados, tomando 98 % como referencia y duplicando el número de núcleos se obtendría $E_{Am}(8, 0,98) = 0,88$, $E_{Am}(16, 0,98) = 0,77$ y $E_{Am}(n, 0,98) < 0,5$ para $n > 51$. Esta tendencia asintótica no incluye las limitaciones del hardware en por ejemplo: El acceso de memoria debido a la arquitectura del procesador. Por ello, al aumentar el número de núcleos, estos valores presentarían el tope superior aproximado de la eficiencia que se espera obtener. Aunque aún con una escalabilidad

menor a la predicha por Amdahl, el método de implementación puede ser aceptable para otros tipos de simulación que tengan un esquema de entrada y salida de datos similar al del MCML por la facilidad de su implementación. Se planea buscar un sistema con más procesadores para evaluar la escalabilidad del algoritmo y las limitaciones que pueda tener python.

En cuanto al modelo, se puede acotar que la melanina es un compuesto altamente absorbente que absorbe la mayor parte de la luz, como se referencia en la literatura. Para concentraciones $f_{me} > 0,033$ se reduce la cantidad de luz difusa reflejada a tal grado que empieza a perder información óptica de la dermis. Este efecto debe tomarse en cuenta al realizar cualquier medición en sujetos de piel oscura. Para la bilirrubina hay cambios significativos en la tendencia de la reflexión difusa en la zona de 450 – 500 nm para $C_{bi} > 0,02$ g/l, que se considera el tope para el funcionamiento normal del cuerpo, donde la región pasa de tener una tendencia lineal a ser concava.

Al comparar los efectos del aumento de la fracción de volumen de vasos sanguíneos y de la concentración de hemoglobina en sangre, se determinó que bajo este modelo el tejido base, limpio de pigmentos, no afecta de manera importante la absorción de la piel, por lo que se considera que se puede despreciar. El aumento de hemoglobina reduce la reflexión en la zona entre 400 y 600 nm.

5. Referencias

- [1] Lihong Wang, Steven L. Jacques, and Liqiong Zheng. MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 47(2):131–146, jul 1995.
- [2] N. Metropolis. The beginning of the Monte Carlo method. *Los Alamos Science*, (5):125–130, 1987.
- [3] Malvin H. Kalos and Paula A. Whitlock. *Monte Carlo Methods Volume 1: Basics*. John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [4] Iyad Salam Saidi. *Transcutaneous optical measurement of hyperbilirubinemia in neonates*. PhD thesis, Rice University, USA, 1992.
- [5] F. Narea, S. Vivas, and A. Muñoz. Retrieving the absorption coefficient of epidermis in human skin. *Optica Pura y Aplicada*, 48(3):207–214, sep 2015.

- [6] Steven L. Jacques and Daniel J. McAuliffe. The melanosome: Threshold temperature for explosive vaporization and internal absorption coefficient during pulsed laser irradiation. *Photochemistry and Photobiology*, 53(6):769–775, jun 1991.
- [7] J.A. Delgado Atencio, S.L. Jacques, and S. Vázquez y Montiel. Monte Carlo Modeling of Light Propagation in Neonatal Skin. In Charles J. Mode, editor, *Applications of Monte Carlo Methods in Biology, Medicine and Other Fields of Science*, chapter 17, pages 297–314. InTech, feb 2011.
- [8] Steven L. Jacques. Optical properties of biological tissues: a review. *Physics in Medicine and Biology*, 58(11):R37–R61, may 2013.
- [9] M.J.C. Van Gemert, S.L. Jacques, H.J.C.M. Sterenborg, and W.M. Star. Skin optics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 36(12):1146–1154, 1989.
- [10] Tsumura Norimichi, Kawabuchi Miki, Haneishi Hideaki, and Miyake Yoichi. Mapping pigmentation in human skin by multivisible-spectral imaging by inverse optical scattering technique. *Journal of Imaging Science and Technology*, 45(5):444–450, sep 2001.

Synthetic analysis of the debate on the integrated management of water resources in Peru

Edilberto Guevara-Pérez*

Vocal of the National Tribunal of Water. National Water Authority, Peru

Visiting Professor, PDRH-UNALM, Peru

Emeritus Professor of Civil Engineering, Carabobo University, Venezuela

Abstract.- Water management has always been at the center of human development attention. All civilizations of the world have had their establishment, growth, peak moments and many times its decline, related to water resources and their management. In Peru, the actual management of water resources confronts different realities in its three main geographical zones: the coast, the highlands and the Amazon. In the present work, the concepts, the series of legal devices that deal with the use and management of water resources, the institutionalization in relation to water and its evolution in Peru, are described in a succinct and concrete way, in the framework of Integrated Water Resources Management (IWRM).

Keywords: water management; integrated management of water resources; water management in Peru; water management tools

Análisis resumido del debate sobre la gestión integral de los recursos hídricos en el Perú

Resumen.- La gestión del agua siempre ha estado en el centro de la atención del desarrollo humano. Todas las civilizaciones del mundo han tenido su establecimiento, crecimiento, florecimiento y muchas veces su declive, relacionado con los recursos hídricos y su gestión. En Perú, la gestión actual de los recursos hídricos enfrenta diferentes realidades en sus tres principales zonas geográficas: la costa, el altiplano y el Amazonas. En el presente trabajo se analizan en forma sucinta, los conceptos, la serie de dispositivos legales que se ocupan del uso y manejo de los recursos hídricos, la institucionalización en relación con el agua y su evolución en el Perú en el marco de la Gestión Integrada del Agua (GIRH).

Palabras claves: gestión del agua; manejo integrado de recursos hídricos; gestión del agua en Perú; herramientas de gestión del agua.

Recibido: junio 2017

Aceptado: julio 2017

1. Problem statement

Water management has always been at the center of human development attention. All civilizations of the world, fortunately diverse and complex, have had their establishment, growth, peak moments and many times its decline, related to water resources and their management in relation to climate, watersheds and human needs [1].

Over time, intervention modalities in river basins have been different for the treatment of water

resources. The oldest ones have referred to the management of water resources, from navigation and water supply, to flood protection, water quality control, the fight against erosion and the production of energy. This was followed by the interventions that led environmental management, a recent approach that emphasizes environmental conservation and resources. However, the lack of an integrating and interdisciplinary conceptual framework that guides the management of water is deepening inter and intergenerational rivalries, affecting the sustainability of the resource, even in surplus areas in terms of water. Sectoral approaches used as a conceptual framework for the management and administration of water resources have dominated and continue to prevail. This leads

*Autor para correspondencia: Edilberto Guevara eguevara@lamolina.edu.pe

to an uncoordinated and fragmented management and development where the use of the resource is inefficient. The institutions in charge of the management of the resource have acted in general isolated from the users, without connection with the different intervening parties and in competition for this finite resource [2].

Water is a fundamental resource for sustainable development, but in many cases it is not taken into account when it is desired to find effective and lasting solutions to problems related to water resources. In this context, a new form of governance and management paradigm emerges, which is within the concept of Integrated Water Resources Management (IWRM), which has been defined by the Global Water Partnership (GWP) as “a process that promotes the coordinated management and development of water, land and related resources, in order to maximize the resulting social and economic well-being in an equitable manner, without compromising the sustainability of ecosystems” [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

IWRM challenges conventional and sectoral management systems, with an emphasis on holistic approaches, which promote decision making between different sectors and levels. It also recognizes that “top-down management” focused on supply with little interest in the demand of beneficiaries, as well as the emphasis on technical aspects and conventional sectoral approaches have imposed and impose high economic, social and ecological costs on the society and the environment. It is generally known that the way in which water is managed today is not sustainable from the environmental point of view, nor is it financially and socially.

IWRM is defined as a process of change which aims to transform existing water management, which is why it does not have a starting point as well as one of completion. The global economy and society are dynamic as well as the environment, which is why the different systems that are based on IWRM must be able to respond to changes and be able to adapt to new conditions and/or economic, social, environmental and of human values.

The IWRM is not an end in itself, but a means to achieve 3 strategic objectives

1. Efficiency to achieve greater coverage of the demand for water resources.
2. Equity in the water resource disposition among the different socioeconomic groups.
3. Environmental sustainability, to protect water resources and related ecosystems.

The Dublin principles as a guide: the general principles, approaches and relevant guidelines of the IWRM are numerous and each of them has its appropriate area of application. Of these principles, those of Dublin are particularly useful. They have been carefully formulated through a consultation process of the GWP.

The Dublin principles contributed significantly to the recommendations of Agenda 21, Chapter 18, on freshwater resources, adopted in 1992 at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), held in Rio de Janeiro, Brazil. Since then, these principles, referred to as the Dublin-Rio principles, have found universal support through the international community as the guiding principles of IWRM. More recently they have been re-declared and developed in 1998 at the major international water conferences in Harare and Paris and by the Commission for Sustainable Development (SDC) at the “Rio + 5” meeting in 1998. The four principles of Dublin are [2, 7, 9, 10, 11]

1. Fresh water is a vulnerable and finite resource, essential to sustain life, development and the environment.
2. The development and management of water should be based on a participatory approach, involving users, planners and policy makers at all levels.
3. Women play a central role in the provision, management and protection of water.
4. Water has an economic value in all its competitive uses and should be recognized as an economic good.

In Peru, the management of water resources confronts different realities in its three main geographical zones: the coast, the highlands and the Amazon. The coast more developed and densely populated but dry, has large hydraulic

infrastructures and a viable institutional framework for IWRM. The mountain range, with abundant water resources, has little infrastructure, a large part of its population is poor, and its institutions for water management are generally traditional in nature. The Peruvian Amazon, with the lowest density of population and infrastructure in the country, covers half of the Peruvian territory and gives birth to the Amazon River.

At present, the Government of Peru is carrying out an important transformation in the management of its water resources, previously focused on the development of irrigation in the coastal zone. The objective is an integrated management of water resources at the basin level that includes the entire country, not just the coast. Despite important advances, such as the creation of a National Water Authority (ANA), several challenges remain, such as

1. Increased water stress in the coastal region
2. Lack of institutional capacity
3. Deterioration of water quality
4. Poor efficiency, especially in the irrigation sector
5. Inadequate supply of drinking water and sanitation

2. Objective

The objective of the work is to carry out a summary analysis and present in a succinct and concrete way the concepts, the series of legal devices that deal with the use and management of water resources, the institutionalization in relation to water and its evolution in Peru in the framework of the Integrated Water Resources Management (IWRM), what has included, procedures, coordination mechanisms and the role they play in the use, exploitation and conservation of natural resources and protection of the environment.

3. Methodology

For the development of the work, a general referential research has been carried out on the background and theoretical framework of main

criteria that comprise the integrated management of water resources and more specifically on existing management tools and to be developed in the country.

4. Results

4.1. Background

Water is vital for survival, health and human dignity and is a fundamental resource for development. The world's freshwater resources are under increasing pressure and many people still lack an adequate water supply to meet their basic needs. Population growth, increased economic activity and living standards have led to an increase in competition and conflicts related to limited freshwater resources. Below are some reasons why many people argue that the world faces an imminent water crisis

1. The water resource is under increasing pressure due to population increase, economic activity and increased competition among users;
2. Water intakes have increased twice as fast as population growth and currently one third of the world's population lives in countries experiencing medium to high water stress;
3. Pollution is further increasing water scarcity, by reducing the utility of water in “downstream” places,
4. Limitations in water management, a focus on the development of new sources instead of promoting better management of existing ones and sectorial proposals of a hierarchical nature for the administration of the resource, have resulted in the development and management of water resources, lacking coordination.
5. Greater development means a greater impact on the environment.
6. Current concerns regarding climate variability and change require optimized water resource management to cope with more intense floods and droughts.

During the twentieth century, the Peruvian government has been the highest authority in the management of water resources and the main

investor in hydraulic infrastructure. Hydraulic development has traditionally focused on the construction of infrastructure such as dams and irrigation canals to cope with the growing water demand of a population and an expanding agricultural sector, especially on the coast. For example, in the 1950s and 1960s, the San Lorenzo and Tinajones dams, the largest in Peru, were built in the northern region. In the 1970s, the development of hydraulic infrastructure on the coast continued. In the zones of the highlands and the Amazon, water resources have traditionally been managed through informal associations of users, the irrigation committees, which control the rudimentary hydraulic infrastructures. The Peruvian government has had little presence in the area, as well as state or international investments.

Thus, at the beginning of the 21st century, Peru has a coastal zone with numerous hydraulic infrastructure controlled by structured and developed User Boards. In the highlands and the Amazon, with lands of scattered crops and less than one hectare, the Users' Meetings are still a process in the process of being implemented. Irrigation committees continue to be an important actor in the management of water resources [12, 13].

This way of managing has resulted in the region at the foot of the mountains and the Peruvian coast being prone to flooding and devastating mudslides, mainly due to heavy rainfall in the degraded high basins; while the south of the country is prone to drought. In addition to natural causes such as ENSO (El Niño–South Oscillation), the effects of droughts and floods have been aggravated by human intervention, including soil erosion caused by inefficient practices of cultivation and grazing, deforestation and land use practices.

El Niño hits Peru in cadences of about three to eight years and consists of strong winds and rains that cause floods and devastating mud avalanches. In 1997–1998, the costs for damages reached US\$ 2 billion. Droughts seriously affect the south coast, generating losses in agriculture as limitations in drinking water consumption.

Laws and preventive measures (related to zoning, deforestation, etc.) do not apply and there is no reliable early warning system network. As a

consequence, the negative impacts due to droughts and floods in the different regions increase, with an increasing impact on the Peruvian economy.

The impacts related to climate change in Peru include the deterioration of watersheds and the depletion of water recharge capacity, the greater probability of sudden fires and biotic changes in the levels and composition of ecosystems, which affect their water storage capacity. The effects and consequences may be different in the initial and final stages of the retreat of the glaciers and may differ depending on the location.

High mountain ecosystems, including páramos (unique wetlands in the northern Andes) and snowy terrain, are among the environments most sensitive to climate change. These ecosystems have a unique endemic flora and provide numerous goods and services of great value to the environment. Although considerable progress has been made in understanding the retreat of glaciers and its consequences, the effects of climate change can have a negative impact on the functioning of the páramos. Between 1970 and 2006, Peru and Bolivia have lost a third of their glaciers.

Data collected recently suggest that climate impacts have already altered the circulation patterns responsible for the production and movement of water vapor in the region. These shocking changes have probably contributed to the disappearance of bodies of water at high altitude

4.2. *Legal framework*

The legislation provides the basis for government intervention and action and establishes the context and framework for the action of nongovernmental entities; therefore, it is an important element for an appropriate socio-economic and social environment. Specific water laws have been stipulated in a considerable number of countries, but some still lack a water resources law.

Peru has gone through five major stages in the water legislation [2, 11, 14, 15]

1. Spanish Law since 1786
2. Water Code since 1902
3. General Water Law of the year 1968
4. Legislative Decree 653 of the year 1990

5. Water Resources Law of 2009

The Peruvian law No. 29338 (Water Resources Law) is the one that has the approach of the IWRM (Integrated Water Resources Management), the framework that regulates water resources in accordance with the following principles [16, 17]

1. Water assessment and integrated management
2. Priority of access to water
3. Participation of the population and culture
4. Legal security respect for the water of the communities
5. Principle of sustainability
6. Decentralization of public water management
7. Precautionary nature
8. Efficiency
9. Management by watersheds, and
10. Legal protection.

The law creates the National Water Resources Management System (NWRMS), whose governing body is the National Water Authority (Autoridad Nacional del Agua, ANA). It establishes the uses that can be given to water resources, rights and licenses for use, water protection, economic regimes, use planning, hydraulic infrastructure, regulations on groundwater, Amazonian waters, natural phenomena, and finally, infractions and penalties. The regulations of the law specify the Environmental Quality Standards for Water.

From 1993 to 2003, the Peruvian government approved a series of sectoral laws to regulate the use of water through different actions, such as the Law for the Promotion of Investments in the Agrarian Sector (Legislative Decree 653), Law for the Promotion of Investments in the Fishing Sector (DL 750), General Hydrocarbons Law (DL 26221), General Mining Law (DS 014-92-EM), Electricity Concessions Law (DL 25844) and General Tourism Law (Law No. 24027). In the last decade, there has been a profound change in the Peruvian institutional framework with the approval of the Decentralization Law, the Organic Law of Regional Governments and the Organic Law of Municipalities. In 2003, with the official creation of regional governments, the national government began to transfer power to the

departments, which does not include competencies in water management, only participation.

The National Strategy for the Integrated Management of Water Resources recognizes the multisectoral nature of water and implements the appropriate institutional and legal framework for integrated management of water resources.

4.3. Institutional Organization

Til 2008 the institutional framework for the management of water resources at the national level is fragmented. The Ministry of Agriculture (MINAGRI) was the main body responsible for managing water resources at the national level. Other ministries had sectoral interferences on the management of water resources: Agriculture for irrigation, Housing, Construction and Sanitation for the use of water for domestic consumption, Health for water quality, Trade and Tourism for thermal and mineral waters, Energy and Mines for hydroelectric power and the operation of mines, the Ministry of the Environment for policies on the environment, energy and water tariffs and regulation of services, and Defense for hydroclimatic information. In 2008, the Peruvian government created the National Water Authority (ANA), a body attached to MINAGRI, absorbing the Water Resources Intendancy, which was previously under the control of INRENA (National Institute of Natural Resources). The ANA is responsible for the design and implementation at national level of policies on sustainable water resources and irrigation.

Regional governments are not responsible for water management. This represents a challenge for the Integrated Management of Water Resources (IWRM) at the basin level, since the administrative limits of the regions do not necessarily coincide with those of the river basins. An additional obstacle is that regional governments are young – created in 2003– and lack the technical capacity and human resources necessary to carry out integrated water resources management.

The Technical Administration of the Irrigation District (ATDR) became the Local Water Authority (ALA); the latter is now the authority in charge of

managing water, guaranteeing rights over water and distributing water among different users.

Finally, other stakeholders that were involved in the management of water resources at the local level were: (i) four Autonomous Hydrographic Basin Authorities (Chira-Piura-Chancay-Lambayeque, Jequetepeque, Santa and Chillón-Rimac-Lurín); (ii) eight local offices of the General Directorate of Environmental Health (DIGESA) in charge of water quality; and (iii) the Water Users' Boards, were private associations, with public financing, responsible for the operation and maintenance of minor irrigation infrastructures [12].

4.4. Government Strategy

In 2004, the Peruvian government proposed a National Strategy for the Management of Water Resources, with the main objectives of

1. Institutional renovation and a defined legal framework to include: (i) a resolution of the disparities between the General Water Law and the Law of Natural Resources and transfer the operation of the irrigation systems to the Water Basin Authorities, promote participation in the decision-making processes; and (ii) institutional development strategies that formalize water and pollution rights and establish a comprehensive rate system to cover the operation and maintenance activities.
2. Integrated management of water resources, focusing both on water supply and demand, considering environmental, social and economic factors. It includes a plan to modernize Peru's existing irrigation infrastructure with the aim of raising the overall efficiency of irrigation systems from 35 % to 45 or 50 %.
3. Higher quality of water resources with an initiative to conserve water resources upstream to reduce sedimentation; creates a pollution control authority to monitor agricultural and industrial discharges, promotes water recycling and improves coastal drainage and salinity problems.
4. Disaster management and mitigation that includes consistent monitoring of the climate,

reforestation in strategic upstream areas, channeling of water and improvement of urban planning to avoid settlements in high-risk areas.

5. Water education and culture and educational programs for students from pre-school to university level on the economic, social and environmental value of water resources.
6. Information system on water resources that strengthen the networks that control the quality and quantity of water, making accurate information available to the public.

4.5. Theoretical framework

Principles of Dublin. The Integrated Management of Water Resources is a process that promotes the coordinated management and development of water, land and related resources, in order to maximize the resulting social and economic well-being in an equitable manner without compromising the sustainability of vital ecosystems. The IWRM uses the Principles adopted as guiding principles in the Conference on Water and the Environment, held in Dublin, in 1992. Those Principles are as follows [2, 10, 12]

Principle No. 1: Water is a finite and vulnerable resource, essential for the support of life, development and the environment. Given that, water is fundamental for sustaining life, its management demands a holistic approach, with an adequate balance between social and economic development and the protection of ecosystems. Effective management of water resources requires the articulation of the different uses of land and water through large catchments and / or aquifers.

Principle No. 2: The development of water resources and their management should be based on a participatory approach, involving all users, planners and policymakers at all levels. A participatory approach involves raising awareness about the importance of water among policymakers and the general public. This means that decisions must be made at the lowest appropriate level, involving extensive consultation with all users in the planning and implementation of water-related projects.

Principle No. 3: Women play a central role

in the provision, management and protection of water. The fundamental role of women as users of water and custodians of the environment has rarely been taken into account in the institutional arrangements for the development and management of water resources. Accepting and implementing this principle implies policies. Water management in global environmental policy 19 addressed to gender needs in relation to their participation at all levels in water-related programs, including decision-making.

Principle No. 4: Water has an economic value in all its uses and must be recognized as an economic good. Within this principle, it is vital to recognize in the first instance the basic right of all human beings to have access to clean and healthy waters at an accessible price. The mistakes of the past in failing to recognize the economic value of the water led to the waste and environmentally unsustainable uses of the resource. Managing water as an economic good is an important way to achieve its efficient and equitable use and to promote its protection and conservation.

Defining the Watersheds. The hydrographic basin is defined as a territorial unit in which the water that precipitates from the atmosphere is gathered and drained by a common hydrographic system that flows all the same river, lake, or sea. In this area live human beings, animals and plants, all of them related to each other. It is also defined as a physiographic unit conformed by the meeting of a system of courses of rivers of water defined by relief [18]. Peru has a territory that covers only 0.87 % of the continental surface of the planet but which accounts for almost 5 % of its freshwater. This undoubtedly constitutes an advantage in terms of the resource, but it is not when it is analyzed in terms of its spatial and temporal distribution. Indeed, the reality shows that the surface waters of Peru are distributed unevenly throughout the year and across the national geography. The relief of Peru is like a large bowl that allows any drop of water that drains its territory to do so only in three possible directions: towards the Pacific Ocean, towards the Atlantic Ocean or toward Lake Titicaca. This characteristic is the reason for

dividing the country into three large hydrographic groups or watersheds: The Pacific, the Amazon and the Titicaca; each of them with different characteristics. The summits of the western chain of the Andes are those that determine if the discharges of the waters of the rivers are made either to the Pacific Ocean or to the Atlantic Ocean. The line of summits that separates the flow direction of the waters is called the continental divide. In the south of the country, the Andes open up in the manner of two large arms that force courses to deliver their waters in the lake of Titicaca, this is called a closed basin or endorheic basin, hence the name of the basin of Titicaca [1, 10]

Surface and underground water resources. Peru has a large amount of water resources, with 106 basins and a per capita availability of 68,321 cubic meters (m^3) in 2006, well above the average for South America, 45,399 m^3 . According to FAO estimates, the long-term annual rainfall average is 1,738 (m^3). There is considerable seasonal variability in river runoff, with two thirds occurring between January and April. In addition, Peru concentrates 71 % of the tropical glaciers of the Central Andes. As already mentioned, the Andes divide Peru into three natural drainage basins: the Pacific basin with 279,689 km^2 , the Atlantic basin with 956,751 km^2 , and the Lake Titicaca basin with 48,775 km^2). Within the framework of hydrological diversity, one of the principles of the Law of Water Resources considers water management by Watersheds [12].

Storage capacity and infrastructure. In 1980, INRENA established an inventory of Peru's water storage capacity, including lakes and dams. Peru has 12,201 lakes, of which 3,896 are in the Pacific basin, 7,441 in the Atlantic basin, and 841 in the Titicaca basin and 23 in the closed Huarmicocha basin. Of the inventoried values, the INRENA established that 186 lakes are used with a total capacity of 3 km^3 and 342 lakes with a total capacity of 3.9 km^3 are without any intervention. Currently, the largest number of lakes used are in the Pacific basin, with 105 lakes and a total capacity of 1.3 km^3 , followed by the Atlantic basin with 76 lakes and a capacity of 1.6 km^3 .

Peru has 23 reservoirs with a total capacity of 1.9 km^3 and has sufficient geographic conditions to build some 238 reservoirs with a total capacity of 44 km^3 . The Pacific basin has 21 reservoirs with a total capacity of 1.8 km^3 ; the Atlantic basin has 2 reservoirs with a capacity of 0.06 km^3 . The largest reservoirs are Poechos with a capacity of 1 km^3 Tinajones with 0.32 km^3 , San Lorenzo with 0.25 km^3 and El Fraile with 0.20 km^3 ; all in the coastal region.

4.6. Management of water resources by sector

Drinking water and sanitation. Domestic consumption in Peru represents 7 % of water extraction. The water and sanitation sector in Peru has made considerable progress over the past two decades, including increasing access to water from 30 % to 62 % between 1980 and 2004. Access to sanitation also increased from 9 % to 30 % from 1985 to 2004. Progress has also been made in the disinfection of drinking water and wastewater treatment. Despite these advances, water and sanitation services in Peru are characterized by low coverage and quality of service, as well as by the precarious financial situation of their suppliers. This, together with the lack of incentives to improve the management of the sector, has reduced investments to a minimum level, which is affecting the sustainability of the sector (see Drinking water and sanitation).

Irrigation and drainage. Approximately 80 % of the water extraction in Peru is used for irrigation; however, most of the water (65 %) is lost due to the dependence on inefficient irrigation systems.

Water quality. The gradual decrease in water quality in Peru is due to untreated discharges, especially from the illegal mining industry (small-scale mining) and environmental liabilities, but also from municipalities and agriculture. Of the 53 rivers in the coastal zone, 16 are partially contaminated with lead, manganese and iron (mainly by illegal mining) and threaten irrigation and increase the cost of drinking water supply to coastal cities. Specifically, MINAGRI considers the quality of the Moche, Santa, Mantaro, Chillón, Rimac, Tambo and Chili rivers to be alarming.

In addition, the 18 mining facilities located along the Mantaro River discharge untreated water into the main stream, threatening the water supply of the country's largest hydroelectric plant. Inefficient irrigation systems have generated problems of salinization and drainage in 300 thousand hectares of coastal valleys (with a total irrigated area of 736,000 hectares), endangering the productivity of these lands. Drainage problems also affect 150,000 ha of the Amazon region. In the altiplano and Amazon zones, excessive deforestation caused by nomadic agricultural practices is causing erosion and soil degradation. In the mountains, between 55 and 60 % of the area is affected by this problem which increases the transport of substances downstream [12].

4.7. How to implement iwrms – experiences

The proper legal and social environment. It is essential to guarantee the rights and assets of all stakeholders (individuals, organizations and companies in the public and private sector). Local or provincial policies and legislation constitute the “rules of the game” [19].

The Role of the Government. The government as a facilitator needs to create the conditions under which all the actors that have interests on particular issues can get involved and negotiate between them to reach acceptable solutions to water problems. The government as regulator and controller should play a more limited role as a service provider and concentrate more on the regulation and control of the provision of specific services Governments and water markets. All markets require the support of governments in the provision of an economic, social and legal environment, where they can carry out transactions.

Water Legislation. The legislation provides the basis for government intervention and action and establishes the context and framework for the action of nongovernmental entities; therefore, it is an important element for an appropriate socio-economic and social environment. The idea is to incorporate consultation and seek consensus with all the relevant ministerial lines and in all the ranks of the government, as well as with other

interested parties located in different places of a basin [20, 21].

Financing Structures and Allocating Funds for Investment for Water Resources Infrastructure [22, 23, 24].

- Private financing assumes the security of the investment: It is the government's responsibility to procure and facilitate the global investments necessary to develop and maintain an adequate water infrastructure.
- Growing competition for scarce resources for development assistance: The achievement of these challenges presents increasing difficulties for governments of developing countries. These problems favor the growing development of private sector financing, but this financing can only be carried out if the legislation provides security for the investment. Conditions for the performance of the private sector: While private sector companies may be more sensitive to productivity gains and consumer satisfaction, since their profits and survival in the business depend essentially on these factors, there is no guarantee that the Privatization will currently produce improvements in the desired performance. Simply converting a monopoly of the public sector into a private one does not provide any incentive for the company to operate efficiently, make the appropriate investments or respond to the demands of consumers. Thus, privatization itself can do little to improve the performance of the sector if governments are unwilling or unable to address such fundamental problems as the provision of public and meritorious goods, reduction of over-employment, restriction of inadequate political interventions and adequacy in water prices. The conditions under which the private sector will operate must be clearly explained in bids, contracts and regulatory procedures. Among these there is a clear agreement on the importance of conditions such as: the quality of the services provided, the price policy, especially the

subsidies or cross subsidies for the poor, and the varied range of decisions that must be made at the level of the public authority and those that rest only in the private company.

- Charging the total cost of water: In principle, charging for the total cost of water ensures the long-term viability of the water supply service and effectively restricts the demand for water, thereby ensuring the sustainability of the resource. These sustainability considerations require that over time, the direct and indirect beneficiaries of water use should, as far as possible, face prices that reflect the total cost of water.
- Sources of public investment: There are important water characteristics that justify the role for public investment in water-related infrastructure. For example, the control of floods and diseases that come from water are public goods, which can not be easily collected on the basis of benefit and individual use. Additionally, the large size and extremely long time horizons of some investments, combined with the risk inherent in political interference, can reduce incentives for private investment. To ensure adequate financing of the water sector, actions are needed to improve the donor-recipient dialogue on the mobilization of financial resources and their allocation to the development of water resources. The international community and governments (as well as donors and recipients) should be encouraged to maintain and increase assistance to the water resource sector, with the objective of solving specific problems. There is an added value in improving communication and cooperation between different financial groups (public, private, national, bilateral and international), introducing measures to mobilize the enormous untapped financial resources of the community and the provision of credit mechanisms that accelerate the independent efforts of individuals.

Cooperation in the International River Basins.

- Vulnerability of downstream riparian: Nearly half of the total world land rests between river basins covering parts of territories between two or more countries. Riparian downstream users are especially vulnerable since the source of the water they depend on is not in their national territory. This issue has created and still creates substantial political tensions and conflicts, throughout the world, at the regional level.
- Although there are substantive principles in international water law, such as equitable utilization and the prohibition of significant harm, there are procedural restrictions for its application on application because of the non-obligation for countries to resort to a third party to resolve the conflict, unless an agreement is reached on a solution procedure to a specific problem. The Helsinki rules, the International Law Commission and the UN Convention on the Use and Protection of Non-Navigational Waters are international instruments designed to facilitate collaboration. There are protocols developed at regional levels, such as the Protocol on Shared Water Courses Systems in the South African Development Community Region (CDSA). At the river basin level, (including shared lakes and groundwater aquifers) a large number of commissions and agreements have been established. Common to these agreements is the wide gap between rhetoric and action, not only at the political level in terms of the willingness to cooperate, but also at the practical level of establishing the appropriate data, information bases and analytical tools necessary for meaningful collaboration [19]. The Coastal States should cooperate on transboundary water resources, seeking negotiated agreements with respect to all the interests of the coastal countries, based on equitable and reasonable water uses. The international community and water-related organizations could act as catalysts and mediators to reach such negotiated agreements.

Institutional roles. Institutional development is critical for the formulation and implementation of IWRM policies and programs. Demarcations of faulty institutional responsibility among actors, inadequate coordination mechanisms, gaps or jurisdictional overlaps and failures to coordinate responsibilities, authorities and capacities for action are all major sources of difficulties in implementing IWRM. The agencies involved in the management of water resources must be considered in their varied geographical scenarios, including the political structure of the country, the unity of the resource in a basin or aquifer and the existence and capacities of community organizations [22].

Roles and Functions of Organizations at different levels.

1. Organizations at the national level: the establishment of a principal organ at the national level may be desirable for the realization of IWRM. It should at least be responsible for development and coordination policies and strategies and national planning regarding water resources. Preferably, it should be independent of the main water users and should report to a higher level government agency. National organizations can also have a role of accumulation and dissemination of information and in some conditions they can act to regulate and monitor the performance of lower level organizations [24].
2. State/provincial/regional management level: in many countries water is managed at the State/provincial/regional level and not at the national level. Closer to the resource and service users, this level of government should consider issues such as water allocation and waste discharge permits, water collection, application of conditions and standards and permits, monitoring and evaluation of water resources, conflict resolution and general questions about land use planning. Some countries have grouped municipalities, industries and other water users into organizations with a special purpose to implement adequate measures for water management. These types of organizations may have regulatory

functions to ensure that local service providers are effectively fulfilling their tasks.

3. Elements for the success of a basin organization: depending on current conditions and priorities, basin organizations (or lakes or aquifers basin) can vary between being executive bodies with mandates for the allocation of water rights and revenue collection, to be purely advisory and advisory bodies for the current executive and administrative bodies.
4. The participation of civil society and the community: these groups should be encouraged to participate in the operational management of water resources. For example, irrigation schemes can be transferred with appropriate regulations from governments to farmers' associations, and community-based organizations can take responsibility for the operation and maintenance of local water systems. In this way, there is a greater possibility of establishing a sense of ownership, which is often a precondition for improvements and a more sustainable management of assets and resources. As previously mentioned, there is a possibility for public and private associations and private operators, including communities and NGOs, to play a role in the management of water resources. The exact role of participation of each of these actors needs to be evaluated in light of local economic, social and political circumstances.

Developing institutional capacity. Developing an institutional capacity is a means to improve performance. In the context of IWRM, capacity development is the sum of efforts to nurture, increase and utilize the capacities of people and institutions at all levels, local, national, regional and international, so that they can progress in compliance with the objective. At the basic conceptual level, developing capacity involves empowering and equipping people and organizations with the appropriate tools and sustainable resources to solve their problems, as opposed to attempts to solve problems directly from a higher level of government.

Instruments for Integrated Water Resources Management. The management tools for the IWRM are the tools and methods that allow and help decision makers to carry out rational and informed choices between alternative actions. These elections should be based on agreed policies, available resources, environmental impacts and precision of economic and social consequences. A wide range of quantitative and qualitative methods are being offered by systems analysis, operational research and modern management theories.

Evaluation of water resources: availability and demand.

1. The management of water resources requires an understanding of the nature and extent of the problem in question: How can all the relevant problems of water resources be identified? how can we ensure that we can acquire useful information that allows us to identify and address current and future problems and solutions about water resources? As a basis for water management, it is useful to carry out an assessment of water resources to acquire such information.
2. The need for a knowledge base of water resources: in many countries the available information on water resources is scarce, fragmented, outdated or otherwise inadequate for management purposes. It is not possible to evaluate the resource or elaborate a quality-quantity balance demand, without adequate access to scientific information regarding the hydrological cycle and the associated ecosystems. Thus, the development of a knowledge base of water resources is a precondition for effective water management. Take the stock of the resource and establish the natural limits of management.
3. Objective of the evaluation of water resources: the concept of evaluating water resources is interpreted to imply a holistic view of the situation of water resources and their interaction with the use of society in a country or region. The evaluation should include the availability of water in time and space, both in quality and quantity,

superficial and underground, and contrast this availability with the demands regarding the resource. In this regard, there is a clear need for measures that compare the efficiency and intensity of different uses (eg product per drop). In the initial stage, the evaluation should preferably be based, as far as possible, on existing knowledge and information to avoid any unnecessary delay in the process of implementing improvements in administration.

4. Environmental Impact Assessment (EIA): the EIA plays a central role in acquiring information on the social and environmental implications of development programs and projects including the implications for water resources, identifying the necessary measures to protect the resource and related ecosystems and then ensuring that these measures are implemented. The IWRM approach involves an assessment of the impact of sectoral development on water resources and that such assessments are also considered in the designs, and priorities of development projects. The EIA is concerned not only about the impacts on the natural environment, but also about the effects on the social environment. Therefore, the EIA touches the center of the need for a cross-sectoral integration involving project managers, water managers, decision makers and the public and provides a mechanism or tool to achieve it.

Information and communication systems.

1. The principle of the participation of stakeholders in the management of water resources requires a serious effort to raise awareness among politicians, decision makers in the water sector, professionals, interest groups and the general public. In any attempt to attract the attention and support of water management of these groups, success will depend on communication mechanisms and the quality and relevance of the information available. Communication and information systems should consider the question of opportunity costs and transactions between

alternative water uses and projects, on the one hand, and other social investments on the other.

2. The information needs for the involvement of the interested parties in order to stimulate the participation of stakeholders in the management of water resources and for the participation process to be effective, the availability of timely and relevant information for all interested parties is an essential precondition. Therefore, official reports and inventories of water sources and supplies, records and up-to-date records of water and sewage uses, water rights and their beneficiaries, with their respective water allocations, should be available to the public. In addition, the results of the standards and performance evaluations of service providers should be publicly available, as this contributes to having transparent and competitive water services.

Water allocation and conflict resolution. To efficiently and effectively allocate water among competing users, the following issues should be considered

1. When markets do not fully incorporate the value of water, other mechanisms must be used to allocate water to higher value uses and users;
2. Market mechanisms (transaction systems and / or prices over total costs through valuation) can be improved in conjunction with appropriate regulatory systems; y
3. Conflict resolution mechanisms can be used to facilitate the shared use of water among competing users, such as stakeholders upstream, downstream, in the same course.
4. Assignment by market-based instruments: normal goods and services that are traded in perfectly functioning markets are assigned to their highest use value. In the case of water, due to the intrinsic attributes of the resource and the way in which it has been historically managed, not all water values (including social and environmental values) are or can be reflected in market prices. Thus,

to complement and correct the failures in the market valuation process, measures based on total costs are needed to improve valuation processes and the corresponding markets.

5. Conflict management techniques: a wide range of conflict management techniques, which involve building consensus or preventing and resolving the conflict, are available to assist those interested in their negotiations.

4.8. *Regulatory instruments*

Three groups of regulatory instruments: to establish appropriate management procedures and structures, water authorities have a multitude of regulatory instruments. These fall into three large groups: direct controls, economic instruments and stimulated self regulation.

Direct control executive regulations. There is a need for handling instructions and regulations that interpret and detail water legislation. If one is dependent on appropriate laws, which contain the basic substantive principles and the authorization for the delegation of authority and the disclosure of regulations, the usefulness of the executive regulations lies in the fact that they, contrary to the laws, can be amended with notifications quickly disclosed, responding to changes in environmental, economic and social circumstances:

Standards and guidelines: these instruments have been widely applied to:

1. Control the amount of water withdrawn from natural water systems by users in defined periods of time;
2. Control the discharge of waste products in the water courses (controls can be placed on the quantity, quality, time and location of the discharges);
3. Require the contracting of specific technologies (technology standards) to both reduce water use and waste loads; and
4. Specify product standards, water supply for specific users and for goods that are potential contaminants (water efficiency standards)

Economic instruments. The use of economic instruments is increasing, but it is far from reaching its potential. Until now, most governments have mainly had direct regulation in the management of water resources. However, economic tools can offer several advantages, such as providing incentives to change behavior, increasing income to help finance the necessary investments, establishing user priorities and achieving management objectives at the lowest possible global cost for the society. The prerequisites for a successful application of most economic tools are appropriate standards, effective administrations, monitoring, application and control and compliance capabilities, institutional coordination and economic stability.

After designing the appropriate economic instruments, it is required simultaneous considerations of efficiency, environmental sustainability, equity and other social concerns, as well as a complementary regulatory and institutional framework. Some notable examples of economic instruments include water prices, tariffs and subsidies, concessions and concession structure, water markets and taxes. There is fragmented, but suggestive evidence that breeding policies can have large impacts and at least 20-30 % of the water used for domestic use and industries can be saved by applying appropriate policy instruments. Experience shows that higher water prices and pollution charges result in a “win-win” situation of water conservation and reduction of its use.

Charge for waste discharges into the water: According to the “polluter pays” principle, effluent rates may be required for discharges of waste into the water bodies; these should be established to reflect both the cost of environmental externalities and those associated with the treatment of contaminated wastewater or receiving water.

Water markets as an economic regulation are widely used in the American West area. The availability of water supply and water rights are quantified and recorded. Water rights are granted under conditions of cash and beneficial use. The transfers are supervised and monitored by regulatory institutions. These markets have been active. Other countries have implemented water markets without the requirements of beneficial and

effective use. The supervision of governments is minimal. These markets have not been active. The lesson learned is that markets that operate under adequate government regulation, under principles of beneficial and effective use, and prevention of harm to third parties and the environment, have promoted efficient and equitable water reassignment [21, 25].

Taxes: The collection of taxes on products or taxes that harm the environment can be a powerful tool to affect behavior and are especially apt where users have an alternative production or alternatives to waste disposal that are less harmful to the environment. This tool can be applied to products that involve a high consumption of water and products that contribute to water contamination. For non-point pollution problems, especially those related to the use of agrochemicals, this option has turned out to be the most useful tool, since in this case, direct control of the discharge or treatment options is not feasible. Therefore, the reduction of pollution is achieved through the lower use of agrochemicals resulting from the higher prices of products. However, any adverse effect on food production resulting from the higher prices of fertilizers and pesticides should be considered.

Encouraging self-regulation. Transparency of information not only imposes incentives on water service providers to improve their performance (tables of main standards), but also allows civil society and government agencies to judge and press for performance improvements. In recent years, the high costs of controlling and controlling regulation have stimulated the development of “self-regulatory” mechanisms, supported by appropriate performance monitoring procedures. For example, professional organizations can produce better practical guides or governments can introduce “quality” comparison schemes; such schemes are now quite common in areas of product safety and the environment and can also be useful for water sector instruments.

Technology.

1. Technological advances towards sustainability: When evaluating the range of available

management tools, the role and field of technological advances should be carefully considered as a factor that can help achieve the sustainable management of water resources. There is a field of technological progress both in the refinement of technology, through the water sector itself, and in those other productive sectors that critically affect the supply and demand of water services. Traditional technologies such as harvesting with rainwater can also play a key role.

2. Research and development in technology: Technological innovation and adaptation are key components of many efforts in the water sector. At the conceptual level, forecast models and systems are being improved, particularly as a result of advances in computer technology, which allows better predictions about temporal and spatial variations in the quantity and quality of available water resources. This can help reduce uncertainty and risk in the use and management of resources. Water-saving technologies in irrigation (drip irrigation), improved and cost-effective methods for the treatment and reuse of wastewater in industries and household systems, water recharge technologies, human waste disposal systems require no or extremely small amounts of water and economic, but effective water purification systems for villages, are other examples of promising innovations which can promote the future sustainability of water resources. However, achieving such technological advances requires appropriate incentives and the willingness of the richer countries, particularly the industrialized nations, to invest in research on a long-term return.
3. Choice of technology: In addition to the promising prospects mentioned above, a warning word on the technological issue is justified. Many projects in the water sector have failed in developing countries due to discretion in the application of technologies that have served in industrialized countries but in different physical, social and economic

environments. It must be taken into account that technological choices must consider the specific conditions prevailing at the place of use. This means that the most advanced and modern technology is not necessarily the optimal decision in all cases. If the system can not be sustained due to lack of answers, lack of skilled labor or economic resources for the operation, this is not the most appropriate solution. Moreover, high-cost technologies can prevent the involvement of the community and families in water management.

4.9. *Some experiences cases [5, 6]*

In Bogor, Indonesia, as a result of a tariff increase of 200–300 % for different groups of consumers in 1990, a family with a monthly consumption of 30 m³ had to pay \$ 0.42 for one cubic meter of water (exceeding the consumption of 20 m³) instead of \$ 0.15. This produced significant reductions, such as 30 %, in the use of water for the affected groups.

In Sao Paulo, Brazil, in 1980, three industrial plants were required to pay effluent charges to the effluent treatment plant. The companies decided to economize through changes in production processes, substitution of supplies, use of more efficient equipment and the use of a mechanical washing machine instead of a washing machine by hand. In the pharmaceutical industry, the volume of effluents (and water consumption) per unit of product in 1982 was 49 % less than in 1980. In the food processing industry, water consumption and effluents decreased by 42 % per unit of product compared to 1980. The steps taken to achieve these reductions were changes in the processes of washing and recycling of effluents and modifications in the cleaning processes. In the dairy industry, the tributaries and the use of water were reduced by 62 % through improvements in the washing process and the expansion of the installation of a treatment plant.

A case of IWRM from Tamil Nadu, India: Several components of IWRM are being used in the Vaigai basin of Tamil Nadu in South India, including

- The participation of stakeholders ranging from government agencies to washerwomen.

- A decision support system that quantifies implications and transactions of alternative water allocations and policy decisions; and political and administrative support from the government and other agencies.

The problems in the Vaigai river basin, a fairly short water basin, include

- Conflicts among stakeholders due to the multiple uses of water.
- The involvement of multiple institutions in various aspects of planning (often overlapping) and watershed management.
- Conflicts upstream, downstream; and trans-sectoral conflicts that result from rapid urbanization, while the demand for traditional water remains.

International cooperation: Ten countries share the Nile basin. Nine of these ten countries have agreed to form a regional association known as the Nile Basin Initiative (NBI), built on previous cooperation efforts. Launched in February 1999, the NBI seeks to take advantage of the great potential of the Nile through the management and sustainable development of its waters for mutual benefit. The shared vision of the NBI is “to achieve sustainable socioeconomic development through equitable utilization and to benefit from the common water resources of the Nile Basin”. The NBI is governed by a council of ministers responsible for water affairs in the countries of the Nile Basin. The council is supported by the TAC (technical advice council) of the Nile and maintains its secretariat in Entebbe, Uganda.

Management of a river basin in France: In December 1964 a law divided the entire territory of France into six Water Agencies, its spatial boundaries follow hydrological divisions. Each Agency is organized as follows

- The staff prepares the program and implements it after its approval (conscience);
- A committee of about sixty representatives of all interested parties approves the program, fees, concessions and loans (the forum).

Each Agency has the following obligations

- Establish water management investment programs for five years.
- Collect payments for each m³ of water extracted from the natural water resource and for each ton of waste discharged into the natural water resource;
- Grant low-interest loans to all actors (cities, industries, etc.) who contribute to the implementation of the five-year program. Expenses and income must be in balance with the five-year program (the budget).

Localized subsidies- The Chilean experience [26]: Chile has been able to implement a well-functioning system of local subsidies on drinking water and sanitation. The success of the system depends on the joint efforts and institutional capacities of the national government, municipalities and water companies. Other countries in Latin America have tried to replicate Chile's very successful experience. However, the available funds did not match the needs of the users, nor did the institutional capacities of the government equalize the monitoring requirements for the implementation and execution of the system. For this reason, some countries such as Argentina have resorted to traditional cross-subsidies, despite the obvious disadvantages of the system. The lesson is that before suggesting so many localized or crossed subsidies, countries and financial institutions should guarantee, not only the economic and financial viability, but also that the institutional structure allows an effective implementation.

In the case of Peru, the Project "modernization of the integrated management of water resources" in selected basins -(PMGRH) was implemented. This project started in 2010 and culminated in 2015, in which the sustainability of the Watershed Councils was evaluated. Currently, the second stage of the PMGRH is on the run. In the years 1998 to 2006, the National Program for the Management of Hydrographic Basins and Soil Conservation, had a Sub-Directorate for Watershed

Management, in which the formation of the Micro-Basin Management Committees was promoted, most of them were not sustainable over time.

5. Conclusions

The Integrated Management of Water Resources is carried out at the basin level. In addition to the government, private companies and community-based organizations should be involved, facilitating the participation of women and economically disadvantaged groups, all stakeholders in the basin should be involved. The Government fulfills a role of facilitator, as regulator and controller. Legislation provides the basis for government intervention and action and establishes the context and framework for action. Downstream populations are especially vulnerable since the source of the water they depend on are not in their territory. In principle, the available water resources can be traded in a market so that the water is assigned to its highest values of use. Although theoretically more efficient, water markets can only work with appropriate institutional arrangements. Specific water laws have been stipulated in a considerable number of countries, but some still lack a water resources law. The private sector has a role to play in many countries to improve the technical and administrative capacities of public service companies and provide the necessary capital investment; however, the investment of private companies will only be carried out if the rates of return on capital are reasonable considering the perceived risk involved. In cases in which greater social concerns restrict the application of total cost in prices, in the short term it may be appropriate to base prices on the total cost of economic recovery or at the minimum on total supply costs. Implicit or explicit subsidies should be identified, with their objectives, and implemented in a transparent manner.

Restrictions and potential for sharing transboundary waters: The enabling environment equivalent to national or local legislation is the international agreement on the principles for managing and sharing transboundary waters; when capacity development is successful, the result is more

effective in individuals and institutions that are better prepared to provide products and services on a sustainable basis; the information available on water resources is scarce, fragmented, outdated or inadequate for management purposes; a key problem is how to include the value of the environment in the provision of water services, including the sustainable provision of the water resource itself. The value of the protection of the catchment area for downstream water users and the value of groundwater recharge areas has not been adequately incorporated by the planning methodologies.

Recommendations

It is necessary to involve the participation of women and economically disadvantaged groups, as well as the participation of private companies.

Integrated Management should be carried out by basin, involving all the stakeholders. The IWRM should consider the implementation of actions to protect the water resources in the upper parts of the watersheds. The IWRM should consider the implementation of actions to plant water in the upper parts of the basins. Incorporate traditional technologies for planting and harvesting water, as well as the recognition of non-traditional organizations for water management.

There is a special need to develop methodologies to assess the benefits of ecological services provided by nature; expand the scope of environmental assessment, relating the experience of economists with the analysis of hydrologists and ecologists; the valuation of the costs and benefits of the ecosystem have not been on the practical water management agenda so far; for this a multidisciplinary research is required.

Acknowledgement

The author thanks and recognize the National Water Authority (ANA) of Peru for the information provided on the country's water resources statistics and management given in internal reports, bulletins and presentations that has been used in the elaboration of this article.

Conflict of Interest: None

6. Referencias

- [1] Ediberto Guevara-Pérez. Planning of applied research in water development projects in peru. *Int. J Hydro.*, 2(3):266–276, 2018.
- [2] Edilberto Guevara. Evolución histórica de la gestión de los recursos hídricos en el Perú. *RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua*, 2:i–iv, 2016.
- [3] Adolfo Toledo. *El agua entre letras, tiempo y pensamiento: Acercamiento para un diálogo acerca del agua*, volume 191. Ediciones ANA, Lima, Perú, 2011.
- [4] Technical Council Committee, editor. *Integrated Water Resources Management*, volume No. 4 of *TAC background papers*. Global Water Partnership, Stockholm, Sweden, 2000.
- [5] UN-Water. Status report on integrated water resources management and water efficiency plans for CSD 16. Report, Coordinating the UN's work on water and sanitation, UN Commission on Sustainable Development, 2008.
- [6] UN-Water. Roadmapping for advancing integrated water resources management (IWRM) processes. Report, Coordinating the UN's work on water and sanitation, UN Commission on Sustainable Development, 2007.
- [7] Damián Indij and Mario Schreider. *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRG) y su Aprovechamiento para la Agricultura frente al Cambio Climático en la Región Andina*. GIZ GmbH–Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Bonn, Alemania, 2011. Serie Manuales/Manual No. 1.
- [8] UN-Water. Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos de las Naciones Unidas 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Informe, UNESCO, Paris, 2018.
- [9] Pedro Martínez-Santos, Maite M. Aldaya, and M. Ramón Llamas, editors. *Integrated Water Resources Management in the 21st Century. Revisiting the Paradigm*. A Balkema Book. CRC Press, Balkema. Ne, 2014.
- [10] Miguel Solanes y Frenando González-Villarreal, editors. *Los Principios de Dublín Reflejados en una Evaluación Comparativa de Ordenamientos Institucionales y Legales para una Gestión Integrada del Agua*. WWP. TAC background papers No. 3. Global Water Partnership (GWP), Brasilia, Brazil, 2001.
- [11] Edilberto Guevara Pérez. Evolución histórica de la legislación hídrica en el Perú. *Derecho Ambiental. Revista de Derecho Administrativo*, 15:319–334, 2015.
- [12] ANA–Autoridad Nacional del Agua. National water resources plan. Executive summary, ANA–MINAGRI, Lima, Perú, 2015.
- [13] Edilberto Guevara. *El hombre y su ambiente: Contaminación y conservación ambiental*. Dirección General de Medios, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2003.

- [14] Iván Ortiz. El tribunal nacional de resolución de controversias hídricas de la autoridad nacional del agua del Perú. *Derecho Ambiental. Revista de Derecho Administrativo*, 15:303–317, 2015.
- [15] Iván Ortiz. El tribunal nacional de resolución de controversias hídricas de la autoridad nacional del agua y los conflictos socio ambientales en el Perú. In Patricia Urteaga y Aaron Verona, editors, *Cinco años de la Ley de Recursos Hídricos en el Perú. Segundas Jornadas de Derecho de Aguas*, Lima, Perú, 2014. Departamento Academico de Derecho, CICAJ e INTE PUCP.
- [16] ANA. Compendio de Normas. Normativa, Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, 2012.
- [17] Laureano Del Castillo Pinto. Ley de recursos hídricos: necesaria pero no suficiente. *Debate Agrario*, 45:91–118, 2011.
- [18] Edilberto Guevara. *Modelos de Administración aplicados al manejo de cuencas hidrográficas*. Dirección General de Medios, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2004.
- [19] Miguel Solanes. Descentralization of water management: The case of water users' associations. In *14th World Bank Agricultural Symposium, Agriculture in Liberalizing Economies: Changing Roles for Governments*, New York, 1993. World Bank.
- [20] Dante A. Caponera and Marcella Nanni. *Principles of Water Law and Administration*. CRC Press, Países Bajos, 2 edition, 1992.
- [21] Bonnie G Colby, K Crandall, and DB Bush. Water right transactions: Market values and price dispersion. *Water Resources Research*, 29(6):1565–1572, 1993.
- [22] NU CEPAL. Red de cooperación en la gestión integrada de los recursos hídricos para el desarrollo sustentable en américa latina y el caribe. Carta Circular de Recursos Hídricos 44, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2016.
- [23] OEDCE. Stakeholder engagement for inclusive water governance. *Oecd studies on water*, The Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 2015.
- [24] OEDCE. Water governance in oecd. a multilevel approach. *Oecd studies on water*, The Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 2011.
- [25] Bonnie Colby-Saliba and David Bush. *Water Markets in Theory and Practice: Market Transfers, Water Values and Public Policy*. Number 12 in Studies in Water Policy and Management. Westview Press, New York, 1987.
- [26] MOP Chile. *Atlas del Agua, Chile 2016*. Dirección General de Aguas, Santiago.

Mechanical behavior of mixtures of polylactic acid (PLA) with polystyrene (PS)

Jhonny Medina^{*,a}, Patricia Cedeño^a, Ricardo Heras^a, Juan Carlos Hernández^a y Carlos Zapata^b

^aLaboratorio de Polímeros, Centro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bLaboratorio de Polímeros, Departamento de Polímeros, Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, Valencia, Venezuela.

Abstract.- The main objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of mixtures of polylactic acid (PLA) with polystyrene (PS). For this, mixtures were prepared using the direct mixing technique, and different mechanical tests were carried out, such as: the flow index, hardness test, stress and impact tests. In addition, infrared spectroscopy, with the purpose of obtaining a mixture of PLA with PS, with suitable characteristics for the development of new products that are friendly to the environment. The method of direct mixing was adequate, because the values of the mechanical properties analyzed are in the intermediate range of the values of the pure polymers. The mixture 50 % PLA / 50 % PS was the one that had the lowest flow index, so it was considered as the mixture with the best mechanical behavior. The displacements of the bands in the infrared spectra indicate that there are certain interactions between the constituents of the mixtures, associated with their miscibility. The incorporation of 2,5 % of DOP to the mixture causes an antiplastification effect, which produces a material with a fluidity index of 3,24 g / 10min, a hardness (Shore A) of 93,3 adm, an impact resistance of 43,19 J / m² and a tensile strength of 2,90 MPa.

Keywords: mechanical behavior; polystyrene; polylactic acid; polymer mixtures.

Comportamiento mecánico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS)

Resumen.- El objetivo fundamental de esta investigación fue evaluar el comportamiento mecánico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS). Para esto, se prepararon mezclas mediante la técnica de mezclado directo, y se realizaron diferentes pruebas mecánicas, tales como: el índice de fluidez, ensayo de dureza, pruebas de tensión e impacto. Además, de espectroscopia infrarroja, con el propósito de obtener una mezcla de PLA con PS, con características adecuadas para el desarrollo de nuevos productos que sean amigables con el ambiente. El método de mezclado directo resultó adecuado, debido a que los valores de las propiedades mecánicas analizadas se encuentran en el rango intermedio de los valores de los polímeros puros. La mezcla 50 %PLA / 50 %PS fue la que tuvo el menor índice de fluidez, por lo que se consideró como la mezcla con mejor comportamiento mecánico. Los desplazamientos de las bandas en los espectros infrarrojos indican que existen ciertas interacciones entre los constituyentes de las mezclas, asociados a la miscibilidad de los mismos. La incorporación de 2,5 % de DOP (estabilizante térmico) a la mezcla ocasiona un efecto anti plastificación, lo que produce un material con un índice fluidez de 3,24 g/(10 min), una dureza (Shore A) de 93,3 adm, una resistencia al impacto de 43,19 J/m² y una resistencia a la tensión de 2,90M Pa.

Palabras claves: comportamiento mecánico; poliestireno; ácido poliláctico; mezclas de polímeros.

Recibido: enero 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

En la actualidad la industria del plástico depende en gran medida de los polímeros derivados del petróleo. La baja degradabilidad de estos materiales representa un problema ambiental. Por lo que, existe la necesidad de sustituirlos por materiales biodegradables cuyo comportamiento

* Autor para correspondencia:

Correo-e: jhonnymedina@yahoo.com (Jhonny Medina)

mecánico y costos de producción sean atractivos para su procesamiento a nivel industrial. En este sentido, El ácido Poliláctico (PLA) es una alternativa para enfrentar dicha problemática, debido a que es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico que se obtiene a partir de recursos renovables tales como el maíz, la remolacha, el trigo, entre otros. Este polímero tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de polímeros petroquímicos a excepción de una baja elongación. Por ser biodegradable y reabsorbible el PLA tiene múltiples aplicaciones en la medicina, en la industria textil, cosméticos, en el sector de los alimentos, bebidas, entre otras [1, 2, 3].

A pesar de la biodegradabilidad del PLA, sus características mecánicas hacen de éste un polímero con ciertos inconvenientes para su procesamiento a nivel industrial. Es por eso, que debe combinarse con otros polímeros biocompatibles, con rellenos, reforzantes, plastificantes u otros aditivos para así mejorar sus propiedades mecánicas. En este sentido, se ha incrementado el interés en el estudio de mezclas de PLA con diversos polímeros. Ponce, en el año 2014, analizó la mezcla de ácido poliláctico con polipropileno (PP) [4], en tanto, que Biresaw y Carrier, en el año 2003, estudiaron las propiedades del PLA con poliestireno (PS) [5]. Los resultados obtenidos en las investigaciones señaladas sugieren que se debe profundizar en el estudio del comportamiento de mezclas poliméricas con PLA, ya que se obtuvieron mejoras favorables en las propiedades de dicho polímero. Es por ello, que en esta investigación se busca profundizar en el estudio de la mezcla polimérica de PLA con PS como alternativa para su aprovechamiento y para contribuir con el saneamiento ambiental, promoviendo un mayor consumo de polímeros biodegradables, y de esta manera, disminuir la dependencia de polímeros derivados del petróleo; ya que, estos son contaminantes y la mayoría no son reciclables, ni biodegradables [1].

Es de resaltar, que el poliestireno (PS), es un polímero termoplástico que se caracteriza por ser liviano, resistente al agua, resistente mecánicamente, y ofrece una gran dureza y rigidez. El PS es un material que no tiene peligro en su

uso cotidiano. Lo cual ha sido demostrado por su amplio uso en el mundo como material de envases y embalajes en el sector agro-alimentario. El cual, implica un contacto directo con los alimentos. Este polímero ocupa el cuarto lugar en el mundo, en cuanto a consumo se refiere.

Ahora bien, la preparación de mezclas poliméricas se orientan a la creación de nuevos productos amigable con el ambiente, como estrategia para la diversificación de la producción nacional e incidencia en la economía del país, ya que se promueve el uso de productos elaborados a partir de fuentes naturales, tal como el ácido poliláctico y no los comúnmente usados que provienen de los derivados del petróleo [6]. Entre los métodos que se emplean en la actualidad para la preparación de mezclas poliméricas, se encuentra el método de mezclado en físico debido a que los productores de la industria del plástico buscan desarrollar nuevos materiales a partir de este proceso, dado que se requiere de una menor inversión de capital [7]. Esta afirmación, se corrobora con lo señalado por otros autores, quienes señalan que el mezclado de dos o más polímeros para formar un nuevo material se establece ampliamente como un medio para obtener nuevos productos con propiedades a la medida de las necesidades del ser humano, presentándose como una forma alterna a la síntesis de copolímeros que generalmente envuelven costos elevados [8].

En este sentido, diferentes autores realizaron una investigación exploratoria para conocer las últimas tendencias y logros en el campo de la compatibilización de mezclas de polímeros de base biológicas y biodegradables. Los autores concluyeron que la modificación de estos polímeros es una manera de mejorar sus propiedades y lograr combinaciones con características adecuadas para aplicaciones específicas. Además, establecieron que la técnica de mezclado directo es un método relativamente barato y rápido para mejorar las propiedades de los plásticos. Pero, que era necesario realizar estudios para profundizar en las relaciones entre la miscibilidad, estructura y propiedades de estos materiales para poder utilizar todas las potencialidades de la mezcla preparada [6].

En virtud de lo anterior, se planteó en esta investigación la preparación de mezclas de ácido Poliláctico (PLA) con Poliestireno (PS) mediante la técnica de mezclado directo, para analizar el comportamiento mecánico de las mismas. Para esto, se realizaron diferentes pruebas mecánicas, tales como: el índice de fluidez, ensayo de dureza, pruebas de tensión e impacto. Además, de espectroscopia infrarroja, con el propósito de obtener una mezcla de PLA con PS, con características adecuadas para el desarrollo de nuevos productos que sean amigables con el ambiente.

2. Metodología

El ácido poliláctico, marca NatureWords, utilizado en esta investigación fue adquirido de un proveedor en Louisiana en los Estados Unidos de Norteamérica. En tanto que el poliestireno tipo expandido fue obtenido de las bandejas B-4 de Industrias Gran Parada, C.A. ubicada en Valencia, Venezuela. Los materiales fueron trasladados al Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas (CIQ) para su tratamiento. En este sentido, las bandejas de Poliestireno fueron cortadas en trozos de aproximadamente 4x4 cm con la ayuda de una tijera, luego se colocaron en un vaso de precipitados para disolverlas en cloroformo. El polímero disuelto se colocó en una estufa modelo Precisión Scientific a 100 °C durante 4 horas para evaporar el solvente y obtener el Poliestireno de manera compacta. Luego, se procedió a moler el Poliestireno obtenido y el ácido poliláctico, por separado, en un molino marca Condux-Werk modelo LV 15/M. Posteriormente, se tamizó cada material en un tamiz ASTM-N° 10 con una abertura de 0,0787 pulgadas, y se almacenaron en frasco de vidrio.

Se prepararon mezclas de PLA con PS mediante mezclado directo de los materiales, en las siguientes proporciones: 100/0 ($M_{100/0}$); 50/50 ($M_{50/50}$); 60/40 ($M_{60/40}$); 70/30 ($M_{70/30}$); 80/20 ($M_{80/20}$); 90/10 ($M_{90/10}$) y 0/100 ($M_{0/100}$). Para esto, los materiales se colocaron en un vaso precipitado de 100 mL, y se agitaron

vigorosamente con una varilla de vidrio. Las mezclas obtenidas fueron caracterizadas mediante el Índice de Fluidez y por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), tal como se describe a continuación [1].

La determinación del índice de fluidez (MFI), se realizó en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, en un equipo CEAST MeltFlow Junior P/N 6943.000, empleando el procedimiento establecidos en la Norma ASTM D 1238-13 [9]. El equipo posee un indizador de fusión manual para hacer los cortes del material a intervalos de tiempo, los cuales son pesados en una balanza analítica para determinar el MFI. En la Tabla 1 se muestran las condiciones del equipo según el índice de fluidez que se espera obtener, de acuerdo al valor teórico de los constituyentes de la mezcla. Esta prueba, se realizó por triplicado para cada mezcla y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D. La determinación del índice de fluidez (MFI), se realizó en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, en un equipo CEAST MeltFlow Junior P/N 6943.000, empleando el procedimiento establecidos en la Norma ASTM D 1238-13 [9]. El equipo posee un indizador de fusión manual para hacer los cortes del material a intervalos de tiempo, los cuales son pesados en una balanza analítica para determinar el MFI. En la Tabla 1 se muestran las condiciones del equipo según el índice de fluidez que se espera obtener, de acuerdo al valor teórico de los constituyentes de la mezcla. Esta prueba, se realizó por triplicado para cada mezcla y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D.

Para la obtención de los espectros infrarroja de las mezclas preparadas se utilizó en un equipo SHIMADZU modelo FTIR-8400S del Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FACYT) de la Universidad de Carabobo. Para esto, se siguió el procedimiento establecido en la Norma ASTM E821 [10], y se prepararon por disolución películas delgadas de las muestras. Los resultados obtenidos en estas pruebas, fueron empleados para seleccionar la proporción de las mezclas preparadas, con la cual

Tabla 1: Condiciones del equipo según el índice de fluidez teórico.

MFI g/(10 min)	P_{re} g	t_c min
0,15 a 10	2,5 a 3,0	6,00
>1,0 a 3,5	3,0 a 5,0	3,00
>3,5 a 10	4,0 a 8,0	1,00
>10 a 25	4,0 a 8,0	0,50
>25 a 50	4,0 a 8,0	025

t_c : Tiempo de corte.

P_{re} : Peso recomendado de la muestra en el barril.

se realizó los ensayos posteriores.

Para determinar el efecto de un agente compatibilizante sobre el índice de fluidez de la mezcla seleccionada, se utilizó DOP (Ftalato de 2-etil-hexilo), en proporciones de 2,5 %, 5,0 % y 7,5 %. Esta prueba, se realizó por triplicado y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D. Esto permitió, establecer la mezcla de PLA/PS/DOP que se utilizó en los ensayos de impacto, dureza y tensión, tal como se describe a continuación.

Para llevar a cabo los ensayos de impacto, dureza y tensión se preparó una lámina de la muestra en estudio. Para esto, se utilizó un equipo Carver el cual consta de una prensa de calentamiento modelo 6051000 serial 17807, en donde se colocó la muestra sólida entre placa metálica de 3mm de espesor que actúan como molde. Luego, se aplicó presión y se aumentó la temperatura hasta fundir el material. Las condiciones establecidas para la preparación de las láminas de las diferentes mezclas se muestran en la Tabla 2.

Obtenidas las láminas se procedió a cortarlas, para esto se utilizó una cortadora CEAST, siguiendo lo establecido en la Norma respectiva para la elaboración de probeta según el ensayo que se realizó. En este sentido, para la prueba de impacto se usó la Norma Técnica ASTM D 656-04, método entandar para determinar la resistencia al impacto en plásticos utilizando péndulo izod. En tanto que, para la prueba de tensión se utilizó la Norma Técnica ISO 527-2. De cada lámina se cortaron tres probetas con el troquelado y ejerciendo presión con una palanca sobre las láminas.

Para el ensayo de Impacto, las probetas obtenidas fueron sometidas a la prueba de Dureza, en un equipo Ceast modelo 6963 serial 17382, siguiendo el procedimiento establecido en la Norma ISO 13802; ISO 179-2 y la ASTM D 256. Este equipo posee una velocidad de impacto de 3,46m/s, una energía potencial de 2,75 J, un ángulo inicial de 150° y una longitud de 0,3268m.

Para el ensayo de tensión, se utilizó una máquina modelo CEAST controlado por un programa llamado NEXYGEN plus. Los parámetros establecidos para la prueba fueron: la longitud de la extensión de 100mm, la longitud, el ancho y espesor de la probeta según la Norma ISO 527-2 se establecieron en 40mm, 5mm y 3mm. Luego se colocó la probeta en el soporte y se le pulsó STAR al programa para dar inicio al ensayo. La prueba finalizó cuando la probeta se fracturó. El programa generó una gráfica de esfuerzo en función de la extensión.

El ensayo de dureza, se realizó en un Durómetro para plásticos Modelo 306L Tipo A que sigue los parámetros establecidos en la Norma ASTM D2240, el cual se basa en la penetración de un indentador específico cuando se presiona el material con el mismo. Para esto, se realizaron medidas de cada una de las probetas utilizadas tanto para en el ensayo de tensión como en la prueba de impacto, en tres puntos de cada probeta. En el caso de las probetas de impacto se colocó el indentador en el centro y en los extremos de la misma y en el caso de las probetas para tensión se colocó el indentador en la zona de fractura específicamente en los extremos y en el centro. En la Figura 1 se muestran los lugares donde se tomaron las medidas.

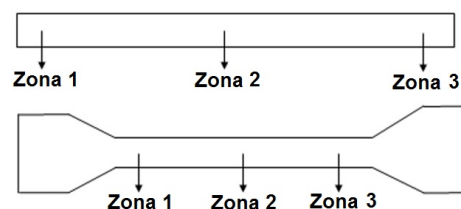


Figura 1: Zonas de las probetas donde se aplicó el ensayo de dureza.

Tabla 2: Condiciones empleadas en el proceso de elaboración de probetas de los distintos materiales.

Material	Masa (g)	Temperatura ± 3 °C	t_i $\pm 0,01$ s	\bar{t} $\pm 0,01$ s	t_f $\pm 0,01$ s	P_i ± 250 psi	\bar{P} ± 250 psi	P_f ± 250 psi
PLA	45	170,0	180,00	10,00	30,00	0	2500	3000
PS	45	170,0	45,00	10,00	20,00	0	3500	4000
PLA/PS	45	170,0	180,00	10,00	25,00	0	2000	2500
PLA/PS/DOP	45	170,0	180,00	10,00	25,00	0	2000	2500

 t_i : Tiempo inicial. P_i : Presión inicial. \bar{t} : Tiempo promedio. \bar{P} : Presión promedio. t_f : Tiempo final. P_f : Presión final.

3. Resultados y discusión

El método de mezclado directo utilizado para preparar las mezclas de poliestireno (PS) con ácido poliláctico (PLA) resultó adecuado, debido a que los valores de índice de fluidez (MFI) obtenidos se encuentran en el rango intermedio de los índices de los polímeros puros. Es de resaltar, que a medida que se aumenta la proporción de ácido poliláctico en las mezclas, el índice de fluidez se incrementa, esto implica que la viscosidad disminuye, tal como se muestra en la Tabla 3. Este comportamiento fue similar al reportado por algunos autores [11].

Tabla 3: Índice de fluidez de las muestras analizadas.

Muestra	MFI $\pm 2,0$ g/(10 min)
Ácido Poliláctico	9,8
$M_{50/50}$	3,8
$M_{60/40}$	4,3
$M_{70/30}$	4,7
$M_{80/20}$	5,3
$M_{90/10}$	6,6
Poliestireno	0,5

El índice de fluidez del Ácido Poliláctico fue de $9,8 \pm 2,0$ g/(10 min). En tanto que, el del poliestireno fue de $0,5 \pm 2,0$ g/(10 min). Estos valores difieren de los reportados por diversos autores [12, 13], debido a que en las formulaciones de PLA existen muchas discrepancias en los valores de índice de fluidez [14], y que el PS utilizado fue obtenido de bandejas comerciales, por lo que los aditivos que contiene influyen en la variación

observada. En este sentido, Aranzazu y Rojas, en el año 2015, reportaron valores de índice de fluidez para el PLA entre 14,20 g/(10 min) y 24,70 g/(10 min), y de 3,55 g/(10 min) para el PS [15]. En tanto, que Álvarez, en el año 2013, señaló un valor de 114,17 g/(10 min) para el PLA [11]. Sánchez, en el año 2004, reportó un valor de 4,17 g/(10 min) para el PS [16]. Estos resultados, indican que el PLA fluye con mayor facilidad que el PS. Por lo que, este último requiere de mayor esfuerzo mecánico para fluir, lo que lo hace un material con mejores propiedades mecánicas que el PLA.

Es de hacer notar, que diversos autores han señalado que el índice de fluidez (MFI) puede ser utilizado como una herramienta de control de calidad y que además es una medida utilizada en la fabricación de polímeros, ya que es una característica fundamental de las resinas poliméricas, que depende inversamente del peso molecular, así como, también del número, clase y distribución de las ramificaciones. Es decir, es una medida del esfuerzo mecánico que requiere o no una muestra polimérica para fluir. Es por esta razón, que el índice de fluidez puede ser relacionado como un parámetro que indique las propiedades mecánicas que posea un material polimérico [17, 12, 13].

En cuanto, a la variación del MFI de las muestras preparadas a medida que se incrementa la cantidad de PLA, esto indica que la cantidad de Poliestireno aporta menos flexibilidad y menos fluidez a la mezcla, lo que implica un aumento en esfuerzo mecánico para fluir. Este comportamiento concuerda con lo reportado por algunos autores

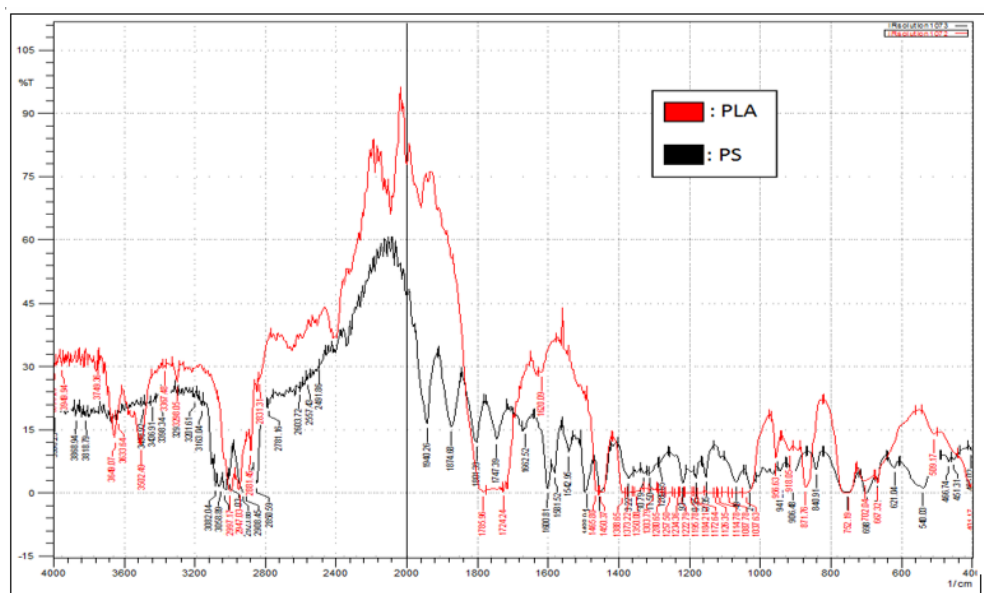


Figura 2: Espectros Infrarrojos del ácido poliláctico y el poliestireno.

[11].

En la Figura 2 se muestra el espectro infrarrojo obtenido para el ácido poliláctico y el poliestireno. Para el PLA (ácido poliláctico), se observa que entre las longitudes de onda de $1743,53$ y $1785,96 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente, se evidencia una banda estrecha la cual corresponde a la vibración stretching del grupo carbonilo de éster. La banda larga ubicada entre 1050 y 1350 cm^{-1} respectivamente, tiene una intensidad bastante baja y es debido a la presencia característica de -C-O- , ya que la longitud de onda evidenciada alrededor de $1087,78$ y $1222,79 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente, se debe a una vibración stretching simétrica -C-O- , mientras que alrededor de $1126,35 \text{ cm}^{-1}$ ocurre una tensión asimétrica del mismo grupo. Por otro lado, la banda ubicada alrededor de $1373,22 \text{ cm}^{-1}$ es causada por una deformación simétrica del grupo -CH_3 y en $1450,80 \text{ cm}^{-1}$ se genera una longitud de onda debida a una vibración bending de los grupos -CH_3 y -CH , estos mismos grupos generan una vibración stretching en $2997,17$ y $2947,03 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente. Por su parte a una longitud de 956 cm^{-1} se genera una banda por vibración a modo de balanceo del -CH_3 . Las bandas descritas anteriormente concuerdan las reportadas para el PLA por diversos autores [18, 19].

En cuanto, al espectro infrarrojo del poliestireno

se observa que presenta una banda larga debido a una vibración stretching entre $3028,03$ y $2908,45 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente de los grupos -CH_3 y -CH del grupo aromático del compuesto, mostrando banda corta en $1600,81 \text{ cm}^{-1}$ la cual es una flexión del grupo -OH , apreciándose $1453,23 \text{ cm}^{-1}$ otra vibración stretching debido a una flexión de los grupos -CH_3 y -CH . Por otro lado en $1218,20 \text{ cm}^{-1}$ se ha de notar una vibración stretching simétrica -C-O y en $1180,36 \text{ cm}^{-1}$ una banda corta por una tensión asimétrica del grupo antes mencionado. Cada una de estas bandas corresponde a las reportadas por algunos autores [20].

En la Figura 3 se muestra los espectros infrarrojos de las mezclas preparadas. En ella, se observa que las mezclas $M_{50/50}$ y $M_{60/40}$ presentan intensidades, y longitudes de ondas similares, se evidencia en ambos casos que la banda alrededor de los 3000 cm^{-1} , la cual es causada por el estiramiento de los grupos -CH_3 y -CH , no se encuentra tan definida y es ancha. Además se aprecia claramente que a partir de 3000 cm^{-1} al aumentar la longitud de onda, la intensidad es baja respecto a los polímeros puros, alrededor de un 4 % lo cual indica que si existieron interacciones entre los polímeros. A su vez las longitudes entre 1050 y 1350 cm^{-1} ocasionadas por -C-O- aumentan su intensidad. Por su parte la banda característica del

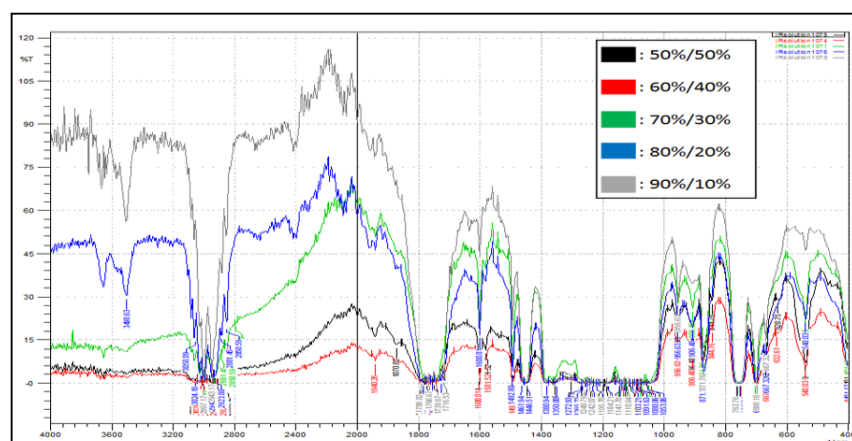


Figura 3: Espectros infrarrojos de las mezclas de ácido poliláctico y poliestireno.

grupo carbonilo del PLA se puede ver alrededor de $1770,53\text{ cm}^{-1}$ y la del PS alrededor de $3024,18$ y $2904,60\text{ cm}^{-1}$ respectivamente.

Por su parte, las mezclas $M_{70/30}$, $M_{80/20}$ y $M_{90/10}$ presentan características diferentes que las analizadas anteriormente, destacando que entre estas, las últimas dos muestran similitud. Se evidencia que a partir de 3000 cm^{-1} al aumentar la longitud de onda, la intensidad se incrementa, y se ubica alrededor de 60 % de intensidad. De igual manera se observa que las bandas características del PLA y del PS, desplazadas respecto a las apreciadas en los polímeros puros. Dichas variaciones ocurridas en cada una de las mezclas se deben a las interacciones entre los grupos funcionales tanto del poliestireno como del ácido poliláctico, lo cual hace notar que la mezcla tuvo cierta miscibilidad, es decir, se establecieron diversas interacciones entre los grupos funcionales de los materiales poliméricos lo cual ocasiona un desplazamiento en las bandas características de los polímeros puros. En este sentido, diversos autores señalan que en mezclas miscibles o parcialmente miscibles de polímeros pueden observarse cambios significativos en la intensidad y/o frecuencia de las bandas [21].

En virtud de los señalamientos anteriores, se establece que la mezcla $M_{50/50}$ fue la que presentó el mejor comportamiento mecánico. Por lo tanto, fue la mezcla seleccionada para continuar con los ensayos planteados en esta investigación.

En la Tabla 2 se muestran los valores de

Tabla 4: Índice de fluidez de las mezclas preparadas con DOP.

Muestra	MFI $\pm 0,08\text{ g/(10min)}$	Variación, %
$M_{50/50}$	3,85	0,00
$(M_{50/50})_{2,5}$	3,24	-15,84
$(M_{50/50})_5$	3,81	-1,04
$(M_{50/50})_{7,5}$	5,99	+55,58

índice de fluidez de la muestra preparada con 50 %PLA y 50 %PS. Así como, de las muestras con 2,50 % ($(M_{50/50})_{2,5}$), 5,00 % ($(M_{50/50})_5$) y 7,50 % ($(M_{50/50})_{7,5}$) de ftalato de di-2-etil-hexilo (DOP). En ella, se observa que la incorporación del 2,5 % de plastificante a la mezcla seleccionada ocasiona una disminución del MFI del 15,84 %. En tanto, que este valor disminuye en 1,04 % cuando se le añade 5,00 % de plastificante y aumenta en 55,58 % con 7,50 % de DOP. Estos resultados indican, que al aumentar la cantidad del plastificante se incrementa su fluidez. Esto concuerda con lo señalado por diversos autores; quienes indican que los plastificantes de bajo peso molecular se agregan principalmente para aumentar la flexibilidad, procesabilidad y elongación del polímero, lo que mejora las propiedades mecánicas al reducir su fragilidad del mismo [22, 23, 24].

Por su parte, se obtuvo que la adición de pequeñas cantidades de plastificantes generó un efecto contrario al de la plastificación. En este caso, al añadir 2,50 % del plastificante se produce

un efecto de antiplastificación, el cual se le atribuye al bloqueo de movimientos moleculares a causa de las interacciones polímero-plastificante, al ordenamiento de las cadenas y al aumento de la cristalinidad producido por el plastificante [25, 26].

Tabla 5: Propiedades mecánicas de las mezclas analizadas.

Muestra	H_{ShA}	$R_{imp} \text{ J/m}^2$	$R_{ten} \text{ MPa}$
PLA	90,8	135,64	27,67
$M_{50/50}$	92,0	69,19	7,23
$(M_{50/50})_{2,5}$	93,3	43,19	2,90
PS	94,0	22,30	3,08

H_{ShA} : Dureza Shore A.

R_{imp} : Resistencia al impacto.

R_{ten} : Resistencia a la tensión.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas realizadas a los matriles en estudio. En ella se observa, que el Poliestireno presentó la mayor dureza, con un valor de 94,0. En tanto, que el PLA mostró una dureza de 90,0. Por su parte, las mezcla $M_{50/50}$ sin plastificante de 92,0 y con plastificante de 93,3. Estos resultados, corroboran lo señalado anteriormente sobre el método de mezclado empleado en la preparación de las mezclas, el cual generó una adecuada combinación de los materiales a obtener valores de dureza en el rango intermedio de los polímeros puros. Es de resaltar, que la incorporación de DOP a la mezcla incrementó la dureza del material. Esto indica, que el material presenta buena resistencia a la penetración y al rayado, lo que evidencia que el efecto de antiplastificación ocasionado mejora las propiedades mecánicas de la mezcla [1].

El efecto de antiplastificación que se presenta a añadir pequeñas cantidades de DOP a la mezcla en estudio, se pone de manifiesto nuevamente en las pruebas de resistencia al impacto y resistencia a la tensión. En la primera prueba el PLA presentó un valor de $135,64 \text{ J/m}^2$, mientras que el PS de $22,30 \text{ J/m}^2$. Esto indica, que el PS es un material frágil y rígido en comparación con el PLA, tal como lo corroboran algunos autores [15, 16]. En cuanto a, la mezcla sin DOP el valor de resistencia

al impacto fue de $69,19 \text{ J/m}^2$, mientras que con DOP fue de $43,19 \text{ J/m}^2$. Esto indica, que la mezcla con DOP es frágil y rígida, con valores que se acercan al comportamiento obtenido con el Poliestireno [1].

En cuanto, a la resistencia a la tensión el PLA presentó un valor de 27,67 MPa, mientras que el PS de 3,08 MPa. Estos resultados, señalan el PLA es un material blando y flexible, por lo que se requiere de mayor esfuerzo para que este se rompa, en comparación al PS [27]. En cuanto a, la mezcla sin DOP el valor obtenido fue de 7,23 MPa, mientras que con DOP fue de 2,90 MPa. Esto, afirma que al agregar una proporción baja de DOP hace resistencia a la tensión disminuya debido al efecto señalado anteriormente.

4. Conclusiones

El método de mezclado directo utilizado para preparar las mezclas de poliestireno (PS) con ácido poliláctico (PLA) resultó adecuado, debido a que los valores de las propiedades mecánicas analizadas se encuentran en el rango intermedio de los valores de los polímeros puros. La mezcla 50 %PLA/50 %PS fue la que tuvo el menor índice de fluidez, por lo que se consideró como la mezcla con mejor comportamiento mecánico. Los desplazamientos de las bandas en los espectros infrarrojos indican que existen ciertas interacciones entre los constituyente de las mezclas, asociados a la miscibilidad de los mismos. La incorporación de 2,5 % en DOP a la mezcla ocasiona un efecto antiplastificación, lo que produce un material con propiedades mecánicas adecuado para su uso.

Agradecimientos

Al FONACIT por el financiamiento recibido a través del proyecto N° 2011001269, el cual permitió sufragar parte de los costos involucrados para la realización de este trabajo. Al personal docente y técnico que labora en el Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas, en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Ingeniería, en el Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FACYT) de la Universidad de

Carabobo y a los que laboran en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia (IUTVAL) por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

5. Referencias

- [1] P. Cedeño and R. Heras. Comportamiento mecánico y térmico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS). Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2016.
- [2] Magda Elva Perales Castro. Modificación estructural del polietiléntereftalato con ácido poliláctico. síntesis de polímeros biodegradables. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.
- [3] Maribel Herryman Munilla and Gladys Blanco Carracedo. Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1):49–59, 2005.
- [4] Juana Suhey Ponce Hernández. Estudio de propiedades y compatibilidad de mezclas polipropileno (pp), ácido poliláctico (pla) y nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2), mediante extrusión y mezclado físico. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2014.
- [5] Girma Biresaw and C. J. Carriere. Compatibility and mechanical properties of blends of polystyrene with biodegradable polyesters. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 35:313–320, 2004.
- [6] Balázs Imre and Béla Pukánszky. Compatibilization in bio-based and biodegradable polymer blends. *European Polymer Journal*, 49(6):1215–1233, 2013.
- [7] Angélica M. Grillo Nerio. Cristalización de la poli (ϵ -caprolactona) en mezclas poli (d,l ácido láctico)/pcl degradadas en medio ácido. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2007.
- [8] Sandra Karina Mascarenas Espino. *Estudio del efecto compatibilizante del copolímero san en mezclas de PVC/ABS*. Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional, México, 2008.
- [9] ASTM D1238-13(2013), standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer, 2013.
- [10] ASTM E821-16(2016), standard practice for measurement of mechanical properties during charged-particle irradiation, 2016.
- [11] Elvira Castellanos Álvarez. Formulación de polímeros biodegradables HDPE-PLA mediante molienda mecánica y extrusión. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [12] Adriana B. Guajardo, Laura E. Najar, Susana B. Prósperi, and María G. Molina. Propiedades de los plásticos reciclados. In *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 26 (AIDIS 98), pages 1–13. APIS, 1998.
- [13] Rubén Eduardo Alarcón Salas. Estudio de la relación entre la estructura, PIAT, grado de cura y resistencia al impacto en productos monocapa de polietileno rotomoldeado. Trabajo Especial de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2007.
- [14] Alfonso Reyes Quezada. Obtención de los parámetros de sellado de un empaque resellable. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [15] A. F. Rojas and L. M. Aranzazu. Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso. *Revista Mutis*, 5(1):37–45, 2015.
- [16] Angel López Sánchez. *Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas*. Tesis Doctoral, Universitat de Girona, España, 2004.
- [17] Andrés F. Rigail-Cedeño. Aplicaciones del melt flow index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 19(1):79–84, 2006.
- [18] Pablo Jiménez Bonilla, María Sibaja Ballesteros, and José Vega-Baudrit. Síntesis y caracterización de poli(ácido l-láctico) por policondensación directa, obtenido del fermento de desechos agroindustriales de banano (*musa acuminata* aaa variedad *cavendish* cultivar *gran naine*) en Costa Rica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(2):52–59, 2012.
- [19] Lucila Araceli Montero Palacios. *Métodos físico-químicos de caracterización de las fibras de polilactida*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2012.
- [20] M. D. Samper, M. I. Rico, S. Ferrandiz, and J. López. Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. In *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, Castellón, 2008.
- [21] Vittoria Balsamo, Laura M. Gouveia, Lenin Herrera, Estrella Laredo, and Bernardo Méndez. Miscibilidad en mezclas de poli (estireno-co-anhídrido maleico) y poli (e-caprolactona)(SMA/PCL). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 24(1-2):17–30, 2004.
- [22] Oscar Yesid Suárez Palacios. *Producción y modelamiento de gliceril-ésteres como plastificantes para PVC*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011.
- [23] F. Billmeyer. *Ciencia de los polímeros*. Editorial Reverté, España, 2^{da} edition, 1978.
- [24] D. Sojo. Optimización de formulaciones de PVC para aplicaciones de cables comercializadas por Gravinil S.A. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2009.
- [25] Pilar Tiemblo Magro. *Microestructura molecular y propiedades físicas del PVC: nuevas correlaciones con configuraciones locales terminales de secuencias tácticas*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de

Madrid, España, 1994.

- [26] Lorena Hoyos Madrigal. Caracterización térmica, mecánica y de sorción de sistemas de almidón de yuca y aceite de maíz. Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2010.
- [27] Jorge Armando Tello González. Estudio de las propiedades mecánicas de bioplástico que contiene ácido poliláctico mediante pruebas de intemperismo. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, México, 2017.

Evaluation of resistance to corrosion by pitting of stainless steel duplex SAF 2304

Laura Sáenz^{*,a}, Jesús García^b y Omar Guzmán^b

^aUniversidad de las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga- Ecuador.

^bEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- It was evaluated the corrosion resistance of a duplex SAF 2304 stainless steel. Pitting corrosion tests were carried out under ASTM G48-03 at a temperature of 50 °C for 72 hours in ferric chloride at 6 % concentration and electrochemical polarization tests under ASTM G5-87 at a temperature of 22 °C for 0.5hrs in sodium chloride at 3.5 % concentration. 9 cylinders samples of stainless steel SAF 2304 duplex were used, 6 samples for the pitting corrosion test and 3 samples for the electrochemical polarization test. Weight loss analysis, macroscopy, optical microscopy and Vickers Microhardness were performed. In the electrochemical test the value of the anodic slope turned out to be very high, in the sting tests where the formation of passive films on the surfaces of the samples tested, a process of localized corrosion could be appreciated with the presence of large amount of pitting. It was observed a localized deterioration in the interphases austenite-ferrite phases, with presence of pitting. The corrosion rate presented a variation similar to that obtained for the weight loss, which demonstrated the heterogeneity of the material.

Keywords: duplex stainless steel; corrosion stress; pitting.

Evaluación de la resistencia a la corrosión por picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304

Resumen.- Se evaluó la resistencia a la corrosión por picadura de un acero inoxidable dúplex SAF 2304. Se realizaron ensayos de corrosión por picadura bajo la norma ASTM G48-03, a una temperatura de 50 °C, durante 72 horas en cloruro férrico al 6 % de concentración, y ensayos electroquímicos de polarización bajo la norma ASTM G5-87, a una temperatura de 22 °C, durante 0,5hrs en cloruro de sodio al 3,5 % de concentración. Se utilizaron 9 probetas de acero inoxidable dúplex SAF 2304, 6 para el ensayo de corrosión por picadura, y 3 para el ensayo electroquímico de polarización. Se realizó análisis por pérdida de peso, macroscopía, microscopía óptica y Microdureza Vickers. En el ensayo electroquímico el valor de la pendiente anódica resultó ser muy alto, en los ensayos de picadura donde se observó la formación de películas pasivas sobre las superficies de las muestras ensayadas, se pudo apreciar un proceso de corrosión localizada con presencia de gran cantidad de picaduras. Se observó un deterioro localizado en las intercaras fases austenita-ferrita, con presencia de picaduras. La velocidad de corrosión presentó una variación similar a la obtenida para la pérdida de peso, lo que demostró la heterogeneidad del material.

Palabras claves: acero inoxidable dúplex; resistencia a la corrosión; picaduras.

Recibido: marzo 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

Los aceros inoxidables dúplex son aleaciones de uso creciente en la actualidad para industrias químicas y derivados del petróleo, así como en aplicaciones específicas de generación de energía,

plantas offshore, industria de la pulpa y el papel, etc. Las propiedades mecánicas óptimas de estas aleaciones son generadas por una estructura bifásica o dúplex constituido por una fase ferrítica y una austenítica, sus ventajas frente a otros aceros inoxidables y aceros estructurales se refieren a mejores propiedades mecánicas, y de resistencia a la corrosión [1, 2, 3].

Sin embargo, los aceros inoxidables son susceptibles, en determinadas circunstancias, a ciertas formas de ataque, de entre las cuales destaca la corrosión por picaduras. La corrosión por

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lasaenz@espe.edu.ec (Laura Sáenz)

picaduras es una forma de ataque localizado. Es un tipo de corrosión destructivo, que puede causar la destrucción de equipos mediante perforación, con muy pequeñas pérdidas de peso [4, 5, 6, 7].

Actualmente existen ciertas variedades de aceros convencionales, que le permite al sector industrial (alimenticio o petroquímico) priorizar entre la resistencia a la corrosión o las propiedades a la resistencia mecánica, tenacidad y dureza. Una alternativa son los aceros inoxidable ferríticos y los austeníticos, que de igual forma se oxidan, pero en vez de óxido común, lo que se forma en la superficie es una tenue película de óxido de cromo muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. En el desarrollo de nuevas aleaciones ha surgido dentro de la familia de los aceros inoxidable los dúplex, considerados como aleaciones pioneras en las aplicaciones que demanden gran resistencia mecánica en medios corrosivos que ofrece soluciones donde los aceros al carbono y austeníticos han fallado, para este estudio se tomara en cuenta la serie 2304, que es una aleación con bajo contenido de níquel, no contiene Molibdeno y que forman una mezcla de cantidades aproximadamente iguales de austenita y ferrita [Aceros dúplex]. Una de las motivaciones del estudio fue la poca información especializada existente referente a la influencia de los cloruros y la susceptibilidad a la corrosión localizada en este tipo de aleación. El objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento de un acero inoxidable dúplex SAF 2304 frente a la corrosión por picadura en un medio clorurado.

2. Materiales y métodos

2.1. Material

Se utilizó un acero inoxidable dúplex SAF 2304 de composición química mostrada en la Tabla 1.

Para realizar el corte del material se utilizó una máquina de electroerosión de hilo (inyección de agua).

2.2. Ensayo de corrosión

Se realizaron dos tipos de ensayos, ensayo por picadura ASTM G48-03 [9] método A y ensayo electroquímico de polarización normalizado

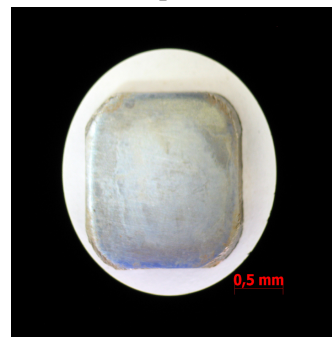
Tabla 1: Composición química del acero dúplex SAF 2304, (% peso) [8].

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0,03	1,00	2,50	0,04	0,03
%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu
23,00	4,25	0,33	0,13	0,33

ASTM G5-87 [10]. En la Figura 1 se muestran las dimensiones de las probetas utilizadas. Las muestras de acero dúplex SAF 2304, fueron divididas en dos grupos de probetas “A” y “B”, donde el primer grupo de muestras pertenecientes a las probetas tipo “A” fueron sometidas a un ensayo de corrosión por picadura a una temperatura de 50°C, durante 72hrs en cloruro férrico al 6% de concentración, y el segundo grupo de muestras pertenecientes a las probetas tipo “B” fueron sometida a un ensayo electroquímico de polarización a una temperatura de 22°C, durante 0,5 hrs en cloruro de sodio al 3,5 % de concentración.



(a) Probeta A usada para el ensayo de picadura, de 20x50 mm, con espesor de 10 mm



(b) probeta B usada para el ensayo electroquímico de polarización de 14 x 14 mm con un espesor 2,5 mm [8].

Figura 1: Diagrama esquemático de las probetas del ensayo.

2.3. Evaluación de la pérdida de peso y la velocidad de corrosión para el acero expuesto a cloruro férrico al 6 %

Se utilizó una balanza analítica marca, Ohaus con capacidad de 201 g. y precisión 0,0001 g.

Para evaluar la pérdida de peso, se utilizó la ecuación (1).

$$W = W_{inicial} - W_{final} \quad (1)$$

Donde, W es la Pérdida de peso en gramos (g), $W_{inicial}$ es el peso inicial en gramos (g) y W_{final} es el peso final en gramos (g).

Para el cálculo de la velocidad de corrosión se utilizó la ecuación (2) de acuerdo a la norma ASTM G31 – 72(2004) [11] que viene expresada:

$$V_c = \frac{KW}{A \Delta t} \quad (2)$$

Donde,

K: Constante que viene expresada en función del sistema métrico de trabajo, y cuyo valor depende de la unidad utilizada para expresar la velocidad de corrosión.

V_c : Velocidad de corrosión expresada en milipulgadas por año (mpy).

T: Tiempo de exposición en horas (h).

A: Área de la superficie de exposición en centímetros cuadrados (cm^2).

W: Pérdida de peso en gramos (g).

D: Densidad del material de la muestra en gramo/cm^3 (g/cm^3).

$$\delta = \sqrt{\frac{(x_i - x)^2}{n}} \quad (3)$$

Donde δ es la desviación estándar, x_i es la pérdida de peso de la muestra (g), n es la cantidad de muestras y x es el promedio de la pérdida de peso.

2.4. Microscopia óptica

Las muestras fueron preparadas por las técnicas metalográficas convencionales y el reactivo de ataque utilizado fue: 15 ml HCl, 50 ml H_2O y 1 g de bisulfito de sodio. La microestructura de las muestras se determinó utilizando un microscopio óptico marca Unión modelo MC 86267.

2.5. Microdureza

Para la realización de los ensayos se utilizó un Microdurómetro marca Buehler, modelo Indentamet 110. Se utilizó una carga de 25 g. durante por 5seg., se realizaron un número de 5 indentaciones por muestra, basado en la norma ASTM E384-11 [12].

2.6. Evaluación de la resistencia a la polarización para el acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

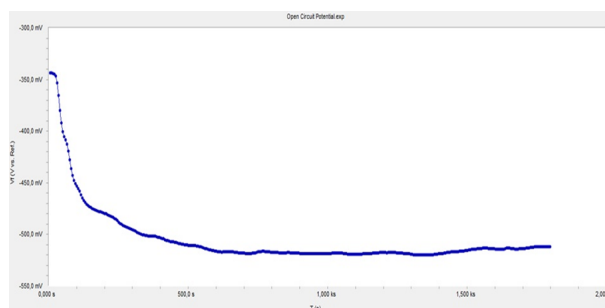
Con el propósito de obtener una medición cuantitativa de la resistencia a la polarización de las muestras ensayadas, y así poder determinar la velocidad de corrosión del material en estudio, se traza la curva de resistencia a la polarización, utilizando el método de polarización lineal, en la cual se extrapola la curva para obtener la pendiente de la resistencia a la polarización. La curva se grafica a partir del potencial de equilibrio [13] (la muestra se polariza entre ± 20 mV con respecto al potencial de equilibrio, con una velocidad de barrido de 2 mV s^{-1}), que se obtiene luego de polarizar la muestra en el medio de exposición, hasta alcanzar la estabilización del potencial. En la Figura 2 se puede observar la estabilización del potencial de la muestra al medio de exposición.

Mediante la ecuación (4) y sustituyendo el valor de alguna de las pendientes de Tafel en la ecuación (5), se obtiene el punto de intersección de ambas pendientes, que representará el valor de la corriente de corrosión.

$$p = \frac{\eta}{i_t} = R_p \quad (4)$$

Donde, p es la pendiente y está expresada en $\frac{\Omega}{\text{cm}^2}$.

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2,3 R_p (b_a + b_c)} \quad (5)$$



Polarización de la muestra desde -300 mV.
Barrido de potencial constante: 2 mVs^{-1}
Comportamiento de la muestra: catódico
Tiempo de estabilización: 667 s – 1800 s
Potencial de equilibrio: -521,77 mV.

Figura 2: Potencial de equilibrio (o estabilización) de la muestra de acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

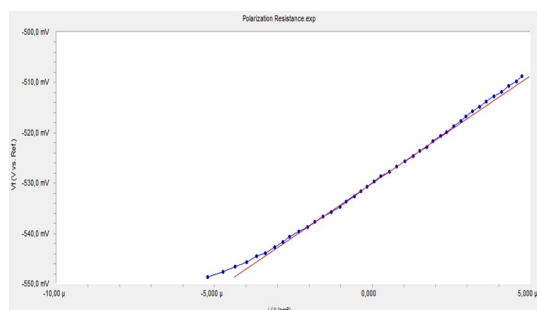


Figura 3: Curva de resistencia a la polarización del acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

Esto se realiza a través de la interfaz gráfica del software asociado al equipo utilizado para el desarrollo del ensayo. basado en los datos registrados por el procesador de cómputos del potenciostato Gamry reference 600, se grafica la curva de polarización lineal, de la cual se obtiene el valor de corriente de corrosión, donde el valor obtenido de la corriente de corrosión es igual a $i_{corr} = 60.10 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ (Figura 3).

3. Resultados y discusión

3.1. Pérdidas de peso

Las Tablas 2 y 3 presentan los pesos iniciales y finales de las muestras evaluadas, la pérdida de peso y las velocidades de corrosión obtenidas para cada uno de los ensayos realizados. También se muestran los valores de desviación estándar de la

pérdida de peso y velocidad de corrosión para cada uno de los ensayos.

Tabla 2: Pérdida de peso promedio para el acero dúplex SAF 2304, expuesto a 50°C por 72 horas.

Muestra	Peso Inicial Winicial (g)	Peso Final Wfinal (g)	Pérdida de Peso W (g)
1	78,9912	77,5982	1,393
2	79,5047	78,0541	1,4506
3	79,3073	77,9260	1,3813
4	79,8003	78,2286	1,5717
5	79,9270	78,2600	1,6670
6	79,8748	78,4648	1,4100
Desviación Estándar de la pérdida de peso			0,1052
Pérdida de peso promedio W(g)			1,4789

En la Tabla 2 se observa que la probeta 5 es la que presenta la mayor pérdida de peso del grupo de muestras ensayadas, mientras que la probeta 3 es la que presentó menor pérdida de peso en este estudio, con un rango de 0,2857 g, esto posiblemente debido a discrepancias en la homogeneidad del material durante su proceso de solidificación y laminación. La pérdida de peso 1,4789 g y su desviación estándar de δ , es 0,1052.

3.2. Velocidad de Corrosión

Considerando que la velocidad de corrosión es una función de la pérdida de peso del material, se verifica mediante la Tabla 3 que la probeta 5 tiene la mayor velocidad de corrosión del grupo de muestras ensayadas, mientras que la probeta 3 es la que tiene menor velocidad de corrosión de todo el grupo del estudio. La velocidad de corrosión promedio del grupo de muestras es de 267,2667 mpy y su desviación estándar es de 18,9667.

En la Figura 4 se muestra la curva de comportamiento de la pérdida de peso para el acero dúplex SAF 2304, sometido a 50°C , se observa que el mayor rango de diferencia en los valores de pérdida de peso obtenidos se presenta entre las probetas 5 y 3, en donde la media entre ambos valores es de 0,2857 g. Al comparar los resultados de la velocidad de corrosión de cada una de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304, se obtuvo un resultado similar al de la pérdida de peso, en el cual el rango obtenido a partir de los valores

Tabla 3: Velocidad de corrosión promedio y desviación estándar para SAF 2304, expuesto a 50 °C.

Muestra	Velocidad de Corrosión (mpy)	Velocidad de Corrosión Promedio (mpy)	Desviación estándar
1	251,6890	267,26667	18,9667
2	262,0962		
3	249,8822		
4	283,9767		
5	301,1956		
6	254,7606		

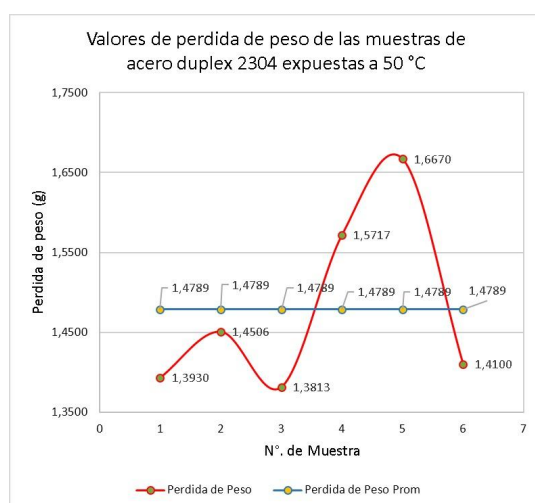


Figura 4: Curva de pérdida de peso de las muestras de acero dúplex 2304, expuestas a 50 °C

máximo y mínimo de las muestras en estudio se presenta entre las probetas 5 y 3, y es igual a 51,3134 mpy, y en donde a partir del coeficiente de variación se determinó que la variación en el caso de la pérdida de peso es mayor al obtenido para la velocidad de corrosión, esto concluye que la dispersión en los valores de la pérdida de peso tienen una leve diferencia a los obtenidos para la velocidad de corrosión, debido que el peso se obtuvo en forma experimental y la velocidad de corrosión se calculó por la ecuación [2].

Como se pudo observar en las Figuras 4 y 5 existe una diferencia considerable entre las muestras 3 y 5 con respecto al valor promedio, esto se debe a discrepancias en las propiedades del material, posteriormente será evaluada la homogeneidad de

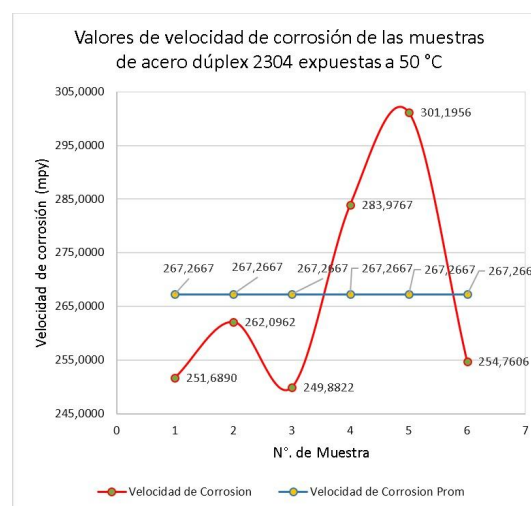


Figura 5: Curva de velocidad de corrosión de las muestras de acero dúplex 2304, expuestas a 50 °C

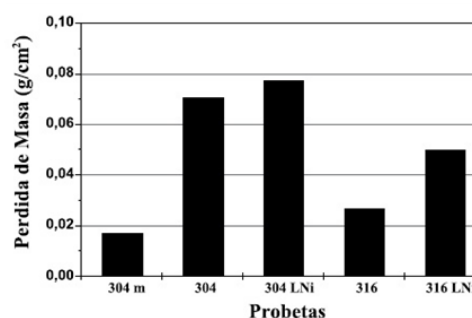


Figura 6: Pérdida de masa de un grupo de muestras de acero inoxidable sometidas a un medio corrosivo de cloruro férrico al 6,5 %, expuestas a 50 °C

la microestructura.

Los resultados del presente estudio son comparados con la investigación realizada por Otero [1], en donde se evaluó la pérdida de masa mediante un ensayo de picadura utilizando la norma ASTM G 48-00 [9] para un grupo de muestras de acero inoxidable, de las cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6.

Se puede observar como la relación de la velocidad de corrosión del acero inoxidable dúplex SAF 2304 con la de los otros aceros inoxidables estudiados por Otero [1], posee un resultado análogo a lo obtenido en el caso de la pérdida de peso, en donde el valor más aproximado de la velocidad de corrosión que se obtuvo para el acero inoxidable dúplex SAF 2304 lo presentaba el acero

inoxidable 316 LNi. Esto le da cierta relevancia al contenido de níquel en el acero inoxidable, para la resistencia a la picadura en medios clorurados.

Tabla 4: Comparación entre los valores pérdida de masa y velocidad de corrosión del acero inoxidable dúplex 2304 con los aceros inoxidables estudiados por Otero [1].

Material	W (g/cm ²)	V _C (mpy)
Acero inoxidable dúplex SAF 2304 (%C= 0,03 ; %Mn = 2,5)	0,0440	267,2667
Acero inoxidable 304 M (%C=0,022 ; %Mn=0,18)	0,0166	100,0766
Acero inoxidable 304 (%C= 0,049 ; %Mn=0,22)	0,0700	420,3216
Acero inoxidable 304 LNi (%C= 0,081 ; %Mn=10,59)	0,0775	465,3561
Acero inoxidable 316 (%C= 0,021 ; %Mn =1,28)	0,0250	150,1149
Acero inoxidable 316 LNi (%C= 0,024 ; %Mn = 8,02)	0,0500	300,2297

W: Pérdida de masa

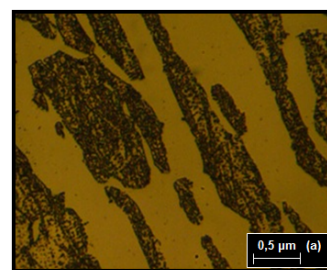
V_C: Velocidad de corrosión

En la Tabla 2, se observa como el acero inoxidable 304 (a pesar de tener alto contenido de níquel) muestra una mayor pérdida de peso y una rápida velocidad de corrosión, el cual lleva analizar los demás porcentajes en peso de los aleantes presentes. En correlación a las Tablas 3 y 2, y además comparando a los materiales que tienen mayor pérdida de masa con su composición química en % de peso de los aleantes, se observa que tanto el Carbono (C) como el Manganeseo (Mn) tienen altos valores para el 304 y el 304 LNi, siendo más determinante el Carbono por que el 316 LNi a pesar de tener un valor alto de contenido del Manganeseo la pérdida de masa no es tan alta como la del 304 y 304 LNi.

3.3. Evaluación Microestructural

3.3.1. Muestras Condición Original

En la Figura 7a, se muestra la microestructura del material original del acero dúplex SAF 2304, formada por ferrita (zonas oscuras) y austenita (zonas claras).



(a) Condición original 400x.



(b) Sección longitudinal sometido a 50°C 400x.



(c) Sección transversal sometido a 50°C 400x.

Figura 7: Microscopía óptica acero dúplex SAF 2304.

3.3.2. Muestras de acero inoxidable dúplex 2304 sometidas a 50°C

En las Figuras 7b y 7c se puede apreciar como las muestras de acero dúplex SAF 2304 (tanto en su sección longitudinal como transversal respectivamente), presentan intercaras fases austenita-ferrita bien definidas, con una posible precipitación de los carburos de cromo.

En la Figura 7c se puede observar además un proceso de deformación plástica en donde se ve claramente una distribución grosera o basta, en la microestructura de las fases austenita-ferrita, esto posiblemente debido a un descontrol durante la solidificación y laminación del material, hecho que a su vez incide en los resultados obtenidos para la pérdida de peso y velocidad de corrosión, en

donde se evidenció la presencia de heterogeneidad en el material, lo que explica la discrepancia en estos resultados al comparar las muestras 3 y 5 del ensayo.

3.4. Análisis Macroscópico de las muestras de aceros inoxidable dúplex SAF 2304

Se realizó un estudio de las muestras utilizando imágenes tomadas con el microscopio óptico con un aumento máximo de 10X.

3.4.1. Vista Transversal

En la Figura 8a se puede apreciar la formación de una capa de óxido, la cual presentó corrosión localizada con una mayor densidad de picaduras profundas que se presentaban hacia la zona del borde de la muestra, y con una gran pérdida de material en algunas áreas del borde como se observa en la Figura 8b. En la Figura 8a además podemos observar la formación de micro-hoyuelos en gran parte de la superficie de la muestra. En la Figura 9a se puede observar la formación de una película de óxido, con picaduras causadas por la corrosión localizada (figura 9b), con agujeros de gran profundidad y una significativa pérdida de material. En la Figura 9a también se aprecia la formación de ranuras profundas a lo largo de la superficie.

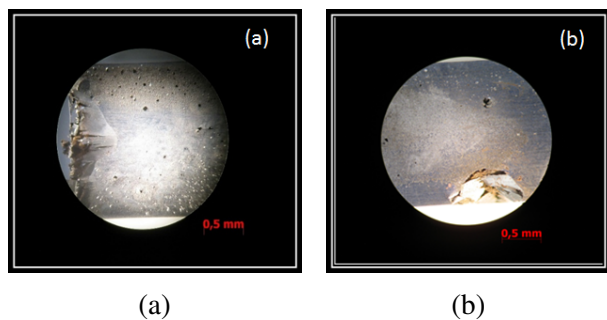


Figura 8: Imágenes macro (sección transversal) a un aumento de 10X de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a 50°C.

3.4.2. Vista longitudinal

En la Figura 8 se pueden observar un ataque generalizado en toda la superficie, con formación de la capa de óxido y picaduras de gran profundidad

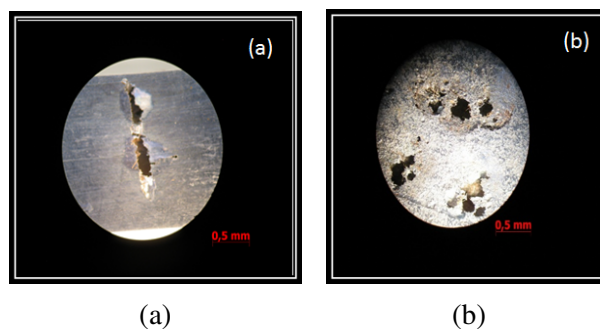


Figura 9: Imágenes (sección transversal) a un aumento de 10X de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a 50°C.

como las que se aprecian en la Figura 10a. En la Figura 10b se observan picaduras en el borde que coinciden con una ranura en la cara transversal.

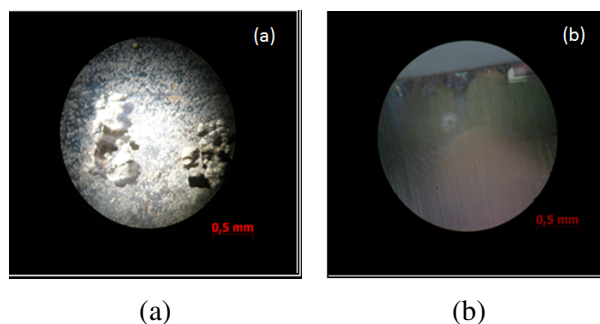


Figura 10: Imágenes (sección longitudinal) a un aumento de 10X de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a 50°C.

3.5. Índice equivalente de resistencia a la picadura, PRE (Pitting Resistance Equivalent)

Al calcular el índice PRE, ecuación (6) para el acero inoxidable dúplex SAF 2304, el cual es igual a 24, y se comparó con los resultados obtenidos por Otero [1] para los distintos tipos de aceros inoxidables usados durante el estudio, se aprecia en la Figura 11.

$$PRE = \%Cr + 3,3(\%Mo) + 16(\%N) \quad (6)$$

Donde,

PRE = índice de corrosión por picaduras.

%Cr = porcentaje en peso de Cromo.

%Mo = porcentaje en peso de Molibdeno.

%Ni = porcentaje en peso de Nitrógeno.

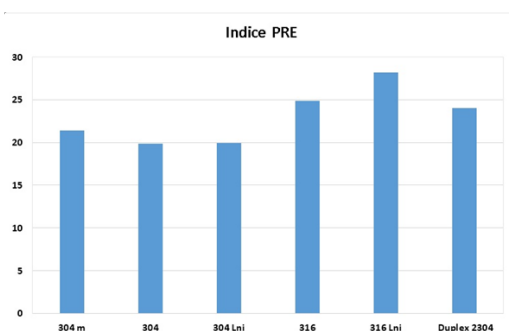


Figura 11: Comparativa del Índice equivalente de resistencia a la picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304, con los estudiados por Otero [1].

El índice *PRE* en este caso para el acero inoxidable dúplex SAF 2304 resulta ser similar a los aceros inoxidables 316 y 316 LNi, con valores de 24,9 y 28,156 respectivamente, esto demostró que aunque hay discrepancias en los resultados, por las significativas variaciones del contenido de molibdeno en algunos aceros (hecho que impacta de forma considerable el valor del *PRE*), se evidenció la influencia en el contenido de níquel para los aceros inoxidables en la resistencia a la corrosión por picadura en medios clorurados.

3.6. Microdureza Vickers (HV)

En la Tabla 3 se muestran los valores de microdureza Vickers para el acero dúplex SAF 2304 en su condición original y luego de ser expuesto al medio corrosivo respectivamente.

De los valores obtenidos en la Tabla 3 se puede observar que existe una disminución en la dureza del material acero inoxidable dúplex SAF 2304 para ambas fases (Ferrita y Austenita) luego de ser sometido al cloruro férrico al 6 % de concentración a 50 °C, y al comparar los valores máximos y mínimos obtenidos en los promedios de las muestras se puede observar una diferencia de hasta un 65 % para la fase Ferrita y de 70 % para la Austenita de disminución en la microdureza.

Tabla 5: Microdureza Vickers, HV con 25 g, 5 seg, para acero inoxidable Dúplex 2304.

Probeta	Microdureza Vickers promedio HV (Kg/mm ²)	
	Ferrita, α	Austenita, γ
Original	310,80	361,60
MLA	184,20	211,80
MTA	213,00	271,00
MLB	181,40	239,40
MTB	241,00	298,80

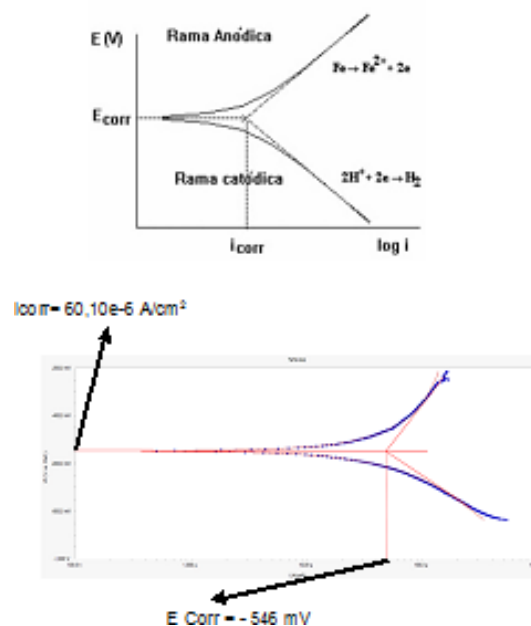


Figura 12: Curvas de Tafel anódicas y catódicas del acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

3.7. Resistencia a la polarización para el acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %

Aplicando el método de las pendientes de Tafel, en donde se polariza la muestra a un potencial de circuito abierto de ± 300 mV respecto al potencial de equilibrio con una velocidad de barrido de 2 mV s^{-1} . Graficando las curvas de Tafel (Figura 12) mediante la ecuación (4) y extrapolando ambas funciones (anódicas y catódicas) representándolas como una función del potencial respecto a la corriente de corrosión, es decir $\eta = f(\log i_t)$, se obtienen las pendientes de Tafel (ecuaciones (4) y (5)).

El valor de la velocidad de corrosión se pudo obtener aplicando las leyes de Faraday, en donde $V_{corr} = 27,53$ mpy.

Los datos obtenidos durante el ensayo fueron capturados mediante los electrodos que componen el experimento, los cuales son los que permitieron procesar las diferentes variaciones de voltaje y amperaje, y así obtener la interpretación de los resultados mediante el software utilizado para graficar las curvas. En la Tabla 6 podemos observar los resultados finales del ensayo.

Tabla 6: Potencial y velocidad de corrosión del acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %, sometido a 22 °C.

Muestra de acero dúplex SAF 2304	
E _{corr}	-546,0 mV
I _{corr}	60.10×10^{-6} A/cm ²
R _p	4.274×10^{-3} Ω cm ²
V _{corr}	27,53 mpy
b _a	1.000×10^{15} V/década
b _c	676.1×10^{-3} V/década

El valor que se obtuvo de la pendiente anódica resultó ser muy alto, lo cual pudiera sugerir un proceso de corrosión controlado por pasivación, que corresponde con los resultados obtenidos en los ensayos de picadura, donde se observó la formación de películas pasivas sobre la superficies de las muestras ensayadas, sobre todo por las caras transversales donde se pudo apreciar un proceso de corrosión localizada con presencia de una gran cantidad de picaduras y pérdida de material.

Al comparar estos valores con los obtenidos para el acero inoxidable dúplex 2304, en donde la pérdida de masa para el dúplex SAF 2304 fue de 1,4789 g x 34 cm² (es decir 0,044 g/cm²), se puede observar que presenta un valor semejante al del acero inoxidable 316 LNi, este resultado corresponde con los contenidos de níquel en ambos aceros (donde para el caso de acero inoxidables dúplex SAF 2304 es de 4,25 % y para el del acero inoxidable 316 LNi es de 6,04 %), y esto se traduce en la influencia que representa el contenido de níquel para la resistencia a la picadura de los aceros inoxidables en medios clorurados.

3.8. Análisis General

Ambos ensayos proponen diferentes comportamientos para el acero dúplex SAF 2304, en donde en el caso del ensayo de corrosión por picadura se refleja una mayor degradación el material al medio clorurado en exposición con respecto al ensayo de polarización. Como se pudo observar para el ensayo de corrosión por picadura el material presentó una pérdida de peso promedio de 1,4789 g y una elevada velocidad de corrosión promedio de 267,2667 mpy, en comparación el material alcanzó una velocidad de corrosión promedio de 27,53 mpy durante el ensayo de polarización. Estos resultados demuestran que aunque en ambos ensayos se evidenció un proceso de corrosión controlado por pasivación, en el caso del ensayo de picadura el acero dúplex 2304 presentó un mayor deterioro microestructural localizado en las intercaras fases austenita-ferrita, como lo demostraron las imágenes (Figuras 5 y 6) obtenidas en la microscopía óptica, esto debido principalmente al bajo contenido de níquel presente en este acero.

En el caso de la desviación estándar se puede observar, que en la pérdida de peso se presentó la mayor variación, esto es debido posiblemente a discrepancias en la homogeneidad del material, ocurrido durante el proceso de laminación, causando que la pérdida de peso en algunas muestras fuese significativamente mayor respecto a otras.

4. Conclusiones

El acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a una temperatura de 50 °C en cloruro férrico al 6 % de concentración durante 72 horas presentó una pérdida de peso promedio de 1,4789 g.

La velocidad de corrosión promedio del grupo de muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 es de 267,2667 mpy, este valor ofrece una buena resistencia a la corrosión por picadura, ya que no es tan rápida su velocidad de corrosión en comparación con los aceros inoxidables estudiados por Otero [1] y expuesto en la Tabla 2.

A través del análisis microestructural se determinó que el acero inoxidable está conformado por

microestructura bifásica compuesta de austenita y ferrita y donde se evidencio corrosión localizada y por picadura a través del análisis macroscópico.

En el caso del acero dúplex SAF 2304 la pérdida de peso es $0,044 \text{ g/cm}^2$ siendo similar a la obtenida para el acero inoxidable 316 LNi, por Otero [1] en su trabajo de investigación donde la pérdida de peso fue de $0,050 \text{ g/cm}^2$, se determina que el dúplex SAF 2304 ofrece una mejor alternativa en bajo costo manteniendo una buena resistencia a la corrosión por picadura debido a que su % en peso del Níquel que contiene es del 4 % menor al del 316 LNi que es del 6,04 %.

Se puede evidenciar que el contenido de Níquel influye en la resistencia a la corrosión por picadura para los aceros inoxidables expuestos a medios clorurados, sin embargo el % en peso del Níquel no es determinante, ya que otros elementos químicos como el Carbono y Manganeso provocan que esta resistencia disminuya aumentando su pérdida de masa y velocidad de corrosión.

Aunque no se puede comparar los resultados obtenidos para el cálculo de la velocidad de corrosión en el caso del ensayo de picadura con el del ensayo polarización, ambos ensayos demuestran la presencia de un proceso de corrosión controlado por pasivación, con la formación de una capa de óxido, en donde en el caso electroquímico de del ensayo de picadura se evidenció mediante la microscopia óptica el proceso de degradación microestructural localizado en las intercaras fases austenita-ferrita.

5. Referencias

- [1] E. Otero, M. V. Utrilla, A. Urena, and C. J. Munez. Influencia de la composición química en la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidables. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 43(2):190–192, 2004.
- [2] Laureano Soria Conde. *Medida de la susceptibilidad a la corrosión por picaduras de los aceros inoxidables austeníticos*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, España, 1988.
- [3] E. R. Ruiz, R. S. Stampella, and C. M. Méndez. Evaluación del ataque corrosivo localizado en aceros inoxidables de alto cromo expuestos a medios oxidantes clorurados. *Revista de Ciencia y Tecnología*, (4b):61–67, 2002.
- [4] Walter Moreira Lima. *Materiales compuestos de matriz acero inoxidable austenítico reforzado con intermetálicos: comportamiento mecánico, a corrosión y desgaste*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, España, 1999.
- [5] Laura Molina Pérez. Estudio avanzado de corrosión: Análisis del estado de corrosión de un edificio modernista de barcelona y estudio de mecanismos de protección basados en recubrimientos orgánicos. trabajo final de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2011.
- [6] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España). *Corrosión y protección metálicas*, volume 1. Editorial CSIC-CSIC Press, 1991.
- [7] Adrián Sánchez García. Montaje y puesta a punta de un potenciostato comercial para llevar a cabo medidas de corrosión electroquímica. Trabajo Especial de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2009.
- [8] Jesús García and Omar Guzmán. Evaluación de la resistencia a la corrosión por picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2015.
- [9] ASTM G48 - 03(2009), standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution, 2009.
- [10] ASTM Designation: G 5 - 87, standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodicpolarization measurements, 1987.
- [11] ASTM G31-72(2004), standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, 2004.
- [12] ASTM E384 - 11e1(2011), standard test method for knoop and vickers hardness of materials, 2011.
- [13] Florian Mansfeld and Martin Kendig. Technical note: Concerning the choice of scan rate in polarization measurements. *CORROSION*, 37(9):545–546, 1981.

Extraction optimal conditions evaluation in regenerative steam power plants by a computational tool

Vanessa Hurtado^a, Alejandro Bolívar^b y Ángel D. Almarza^{*b}

^a*Departamento de Térmica y Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Departamento de Computación, Dirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- Steam power plants are widely used to supply the world's energy demand. Improvement in the efficiency of such systems has been studied from different perspectives as adjustments in cycle operation scheme, including the analysis of use of different working fluids, and materials of the equipment involved. Thus, regenerative steam power plants allow an improvement in efficiency by the reduction of the system heat demand. In this sense, a computational tool is proposed to determinate in regenerative cycles optimal extraction conditions, at first, thermal calculations associated with each of the elements of the system and estimation of thermodynamic properties required for this, in order to obtain the graphical and analytical behavior of the decrease in the heat demand of the cycle with respect to heating suffered by the water fed to the boiler, which is closely linked to the conditions of the extraction taken for the regenerator, which in turn are related with the improvement in the thermal efficiency of the cycle.

Keywords: regenerative rankine cycle; optimization; decrease in heat demand.

Evaluación de las condiciones óptimas de extracción en plantas de potencia a vapor regenerativas por medio de una herramienta computacional

Resumen.- Las centrales termoeléctricas a vapor son ampliamente utilizadas para suplir la demanda energética mundial. La mejora en la eficiencia de este tipo de sistemas ha sido estudiada desde diversas perspectivas, como lo son ajustes en el esquema de operación del ciclo, incluyendo el análisis de uso de distintos fluidos de trabajo, y de materiales de los equipos involucrados. Así, las plantas de potencia a vapor regenerativas permiten obtener una mejora en la eficiencia a partir de la disminución de la demanda de calor en el sistema. En este sentido, se propone una herramienta computacional por medio de la cual se determinan las condiciones óptimas de extracción en ciclos regenerativos, tomando como punto de partida los cálculos térmicos asociados a cada uno de los elementos del sistema y la estimación de las propiedades termodinámicas requeridas para ello, a los fines de obtener el comportamiento gráfico y analítico de la disminución de la demanda de calor del ciclo con respecto al calentamiento sufrido por el agua de alimentación a la caldera, que está estrechamente vinculado a las condiciones de la extracción tomada para el regenerador, que a su vez están relacionadas con la mejora en la eficiencia térmica del ciclo.

Palabras claves: ciclo rankine regenerativo; optimización; disminución de demanda de calor.

Recibido: abril 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

Las centrales termoeléctricas son ampliamente utilizadas y prácticamente las responsables del

80 % de la producción mundial de electricidad. Así, este tipo de plantas producen cerca del 91 % de la demanda energética de Estados Unidos y el 78 % de la de Europa [1] y se prevé un incremento del 70 % en la demanda mundial de energía eléctrica para el año 2035 [2], lo cual justifica la pertinencia de éste tipo de sistemas, sin dejar de reconocer los esfuerzos realizados en materia de energías renovables.

Dentro de este contexto, el comportamiento de

*Autor para correspondencia: Ángel D. Almarza
adalmarza@gmail.com

la eficiencia de las centrales térmicas a vapor ha sido objeto de análisis desde diversas perspectivas, encontrándose entre las opciones más comunes para mejorarlo, el uso del recalentamiento y la regeneración. Sin embargo, de acuerdo con Wang y otros [3], aún son muy complejos e incluso escasos los estudios específicos de optimización del esquema regenerativo en el ciclo Rankine.

Así, Rashidi y otros [4], evalúan para condiciones específicas, la relación entre parámetros de operación del ciclo regenerativo, como lo son la presión de condensación y la presión de los calentadores con la eficiencia térmica del mismo, a través del estudio de la primera y segunda ley en este tipo de sistemas. Por otro lado, Vianna y otros [5], han enfocado el análisis de minimización del consumo de combustible, y costos de operación y mantenimiento en plantas de potencia a vapor, desde otra perspectiva, a través de modelos de programación lineal. Paralelamente, se han llevado a cabo evaluaciones desde el punto de vista técnico y económico de la incorporación de recalentamiento y regeneración, como una forma de aumentar la eficiencia de los sistemas energéticos en contextos específicos como el sector azucarero [6].

En tal sentido, con la intención de analizar el efecto de las condiciones de operación de extracción en ciclo Rankine regenerativo y determinar de forma automática la presión óptima de operación del regenerador, que está vinculada a mejores valores de eficiencia energética, queda planteada la meta del presente trabajo. Este estudio, propone el diseño y desarrollo de una herramienta computacional, lo cual requiere el análisis de los cálculos térmicos respectivos, partiendo de un ciclo Rankine simple e incorporando las adaptaciones asociadas a la regeneración con un único calentador, tomando también en consideración, la determinación de los estados y propiedades termodinámicas correspondientes asociadas al uso de tablas y gráficos cuyo manejo puede ser engorroso [7]. Lo cual permite al usuario disponer de las curvas que muestran el comportamiento de la disminución de la demanda de calor y la mejora de la eficiencia térmica, la expresión analítica de la función que representa dicho comportamiento; así

como también, los valores tabulados que permiten obtener tales relaciones.

2. Desarrollo de la investigación

La investigación realizada consta de las siguientes fases:

2.1. Fase 1: Estudio del comportamiento térmico del ciclo

La evaluación del comportamiento térmico del ciclo Rankine, entendido como el ciclo termodinámico que describe las interacciones de los componentes básicos de una central térmica a vapor [8], tiene como punto de partida la aplicación del balance de masa y energía, la segunda ley de la termodinámica interpretada desde el concepto de eficiencia y la determinación de las propiedades termodinámicas respectivas.

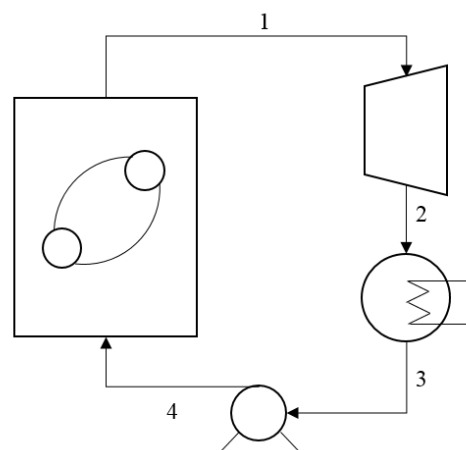


Figura 1: Ciclo Rankine Simple

En ese sentido, en un ciclo Rankine ideal simple, como el mostrado en la Figura 1, el fluido de trabajo experimenta, cuatro procesos considerados internamente reversibles, los cuales son:

1–2: Expansión adiabática y reversible del fluido de trabajo a través de la turbina, desde la presión de operación de la caldera hasta la de operación del condensador.

2–3: Transferencia de calor desde el fluido de trabajo hacia un fluido de enfriamiento a presión constante, en un condensador.

3–4: Compresión adiabática y reversible a partir de líquido saturado en la bomba.

4–1: Transferencia de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante, en una caldera.

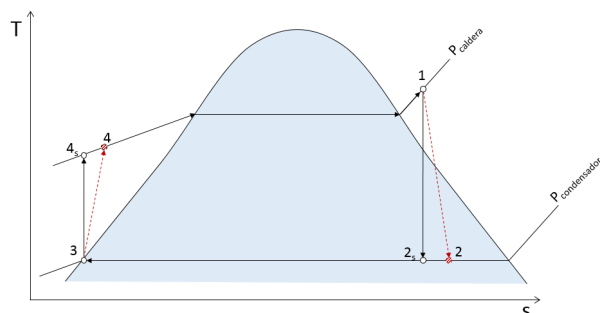


Figura 2: Diagrama T-s de un Ciclo Rankine Simple

Es de hacer notar que, son diversas las pérdidas e irreversibilidades presentes en cada uno de los procesos descritos. En tal sentido, se toman en consideración los efectos de éstas sobre el proceso de bombeo y expansión, a través de las eficiencias isoentrópicas. Parámetros que estiman la desviación existente entre el trabajo real y el isoentrópico, asociado al funcionamiento de dichos equipos, tal como queda evidenciado en las trayectorias de los procesos de la Figura 2.

Así, el parámetro que permite evaluar la utilización del calor y su transformación en energía útil, conocido como eficiencia térmica del ciclo Rankine, queda según la Ecuación (1)

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}, \quad (1)$$

donde:

W_{neto} : Trabajo neto del ciclo [kJ/kg],

$Q_{entrada}$: Calor Transferido al fluido de trabajo [kJ/kg].

La regeneración es implementada con la intención de aumentar el rendimiento térmico de las centrales térmicas a vapor, concepto que ha sido ampliamente aceptado en diversos sistemas térmicos aprovechando intercambiadores de calor de alto rendimiento, que operan con fuentes de energía a temperaturas relativamente bajas lo cual mejora la eficiencia notablemente [9]. Así, la regeneración, entendida como el precalentamiento

del agua de alimentación a la caldera [8], supone una minimización de la demanda de energía en este equipo, teniendo en cuenta una compensación por el pequeño descenso en el trabajo neto producido.

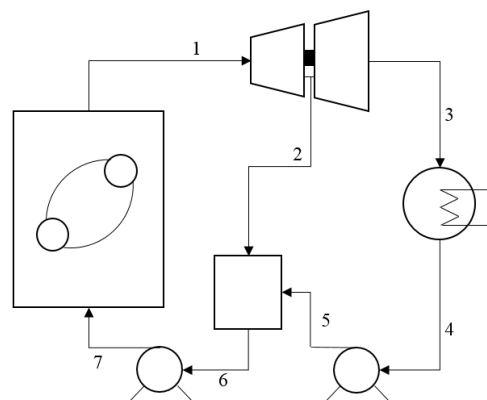


Figura 3: Ciclo Rankine regenerativo

El esquema de la Figura 3, muestra un ciclo Rankine regenerativo, que emplea un calentador de agua de alimentación abierto, donde el vapor que sale de la caldera, es sometido a una primera fase de expansión e inmediatamente después, una fracción del flujo másico total es extraída a ciertas condiciones para emplearlo como medio de calentamiento en el regenerador. El resto del fluido, una vez ha ocurrida la extracción, sufre una segunda expansión, hasta la presión de operación del condensador, de donde se obtiene líquido saturado, que es impulsado, por medio de una bomba hacia el calentador, en donde se mezcla con la extracción. La mezcla resultante, en condiciones de líquido saturado, se comprime hasta la presión de operación de la caldera. La Figura 4 muestra el comportamiento de las trayectorias de los procesos descritos.

En este sentido, las condiciones óptimas de operación de un ciclo Rankine regenerativo con una sola extracción están vinculadas con mayores valores de eficiencia térmica o interpretado de otro modo, con la mayor minimización de la demanda de energía por calor en la caldera. Para conseguir dichas condiciones, es fundamental el análisis del proceso a través del diagrama de Mollier (h-s), mostrado en la Figura 5, que permite visualizar

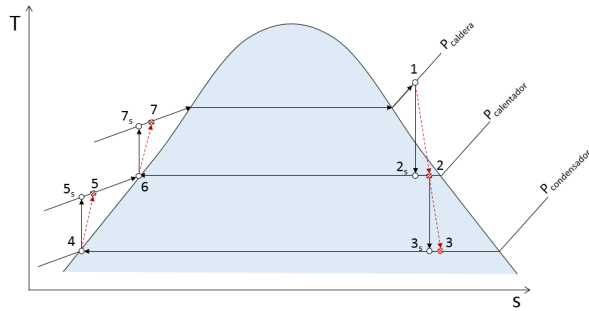


Figura 4: Diagrama T-s Ciclo Rankine regenerativo

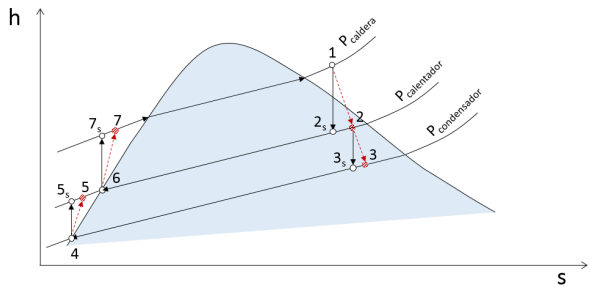


Figura 5: Diagrama h-s Ciclo Rankine regenerativo

paralelamente lo que ocurre desde la perspectiva de la primera y segunda ley de la termodinámica.

Así, el efecto que podría producir la regeneración sobre la demanda de calor, para una misma salida de trabajo neto, referida a la de un ciclo operando en forma simple entre las mismas presiones de operación de la caldera y el condensador, respectivamente; puede analizarse, por medio de la aplicación del balance de energía, según la Ecuación (2)

$$\dot{m}_{op\text{simple}} \cdot (h_1 - h_3) = \dot{m}_{op\text{reg}} \cdot (h_1 - h_2) + (\dot{m}_{op\text{reg}} - \dot{m}_{ext}) \cdot (h_2 - h_3), \quad (2)$$

donde:

$\dot{m}_{op\text{simple}}$: Flujo másico de operación del ciclo Rankine simple [kg/s];

$\dot{m}_{op\text{reg}}$: Flujo másico de operación del ciclo Rankine regenerativo [kg/s];

$\dot{m}_{mo\text{ext}}$: Flujo másico de la extracción en el ciclo regenerativo [kg/s].

Al reordenar la Ecuación (2), da como resultado

la Ecuación (3)

$$\dot{m}_{op\text{simple}} = \dot{m}_{op\text{reg}} \cdot \dot{m}_{ext} \left[1 - \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_3)} \right], \quad (3)$$

por medio del balance de energía en el calentador, resulta la Ecuación (4)

$$\dot{m}_{ext} \cdot h_2 + (\dot{m}_{op\text{reg}} - \dot{m}_{ext}) \cdot h_5 = \dot{m}_{op\text{reg}} \cdot h_6, \quad (4)$$

la Ecuación (4) puede reescribirse para obtener la Ecuación (5)

$$\dot{m}_{ext} = \dot{m}_{op\text{reg}} \frac{(h_6 - h_5)}{(h_2 - h_5)}. \quad (5)$$

Al sustituir la Ecuación (5) en la Ecuación (3), resulta la expresión para la relación de flujos de operación del ciclo regenerativo y el ciclo simple, según la Ecuación (6)

$$\frac{\dot{m}_{op\text{reg}}}{\dot{m}_{op\text{simple}}} = \frac{(h_2 - h_5)}{\left[(h_2 - h_6) + \left[(h_6 - h_5) \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_3)} \right] \right]}. \quad (6)$$

Paralelamente, la disminución de calor de entrada al ciclo, como producto de la incorporación de la regeneración está en la Ecuación (7)

$$\begin{aligned} DDC &= \frac{Q_{\text{simple}} - Q_{\text{reg}}}{Q_{\text{simple}}} \\ &= 1 - \frac{Q_{\text{reg}}}{Q_{\text{simple}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

DDC : Disminución de la demanda de calor [%].

Q_{simple} : Calor de entrada al Ciclo Rankine Simple [kJ].

Q_{reg} : Calor de entrada al Ciclo Rankine regenerativo [kJ].

(2) Al estimar los calores a través de balance de energía y sustituyendo en la Ecuación (7), resulta la Ecuación (8)

$$DDC = \left[1 - \frac{\dot{m}_{op\text{reg}}}{\dot{m}_{op\text{simple}}} \cdot \frac{h_1 - h_7}{h_1 - h_a} \right] \cdot 100, \quad (8)$$

donde h_a , representa la entalpía de la corriente de entrada a la caldera, suponiendo un ciclo Rankine simple operando entre las presiones máxima y mínima del ciclo regenerativo.

Por otro lado, el cálculo del porcentaje de incremento en la eficiencia térmica del ciclo, al incorporar la regeneración, está en la Ecuación (9)

$$I\eta = \left[\frac{\eta_{reg} - \eta_{simple}}{\eta_{simple}} \right] \cdot 100, \quad (9)$$

donde

$I\eta$: Incremento en la eficiencia [%].

η_{reg} : Eficiencia Térmica del ciclo regenerativo.

Para expresar la eficiencia del ciclo regenerativo por la Ecuación (10)

$$\eta_{reg} = \frac{(h_1 - h_2) + \left[\left(1 - \left(\frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} \right) \right) \cdot h_2 - h_3 \right]}{(h_1 - h_7)}. \quad (10)$$

2.2. Fase 2: Diseño de la herramienta computacional para la estimación de la determinación de la presión óptima de extracción

Una vez establecidos los modelos matemáticos correspondientes al análisis térmico del ciclo Rankine regenerativo con una sola extracción, fueron estructurados los módulos de cálculo respectivos y la organización operativa de la herramienta computacional.

Así, la Figura 6 muestra los elementos que constituyen la herramienta, especificando como requerimiento para efectuar la determinación de las condiciones óptimas de la extracción, los datos de entrada definidos por el usuario, que son: la presión de operación de la caldera, la temperatura de entrada a la turbina y la presión de operación del condensador, junto a las eficiencias isoentrópicas de la turbina. Es de hacer notar que, para los efectos del cálculo de la eficiencia térmica del ciclo, se consideró despreciable el trabajo consumido por las bombas.

Paralelamente, fueron definidos los módulos que constituyen el proceso a partir del cual son obtenidos los resultados. Siendo necesario disponer de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo, a los fines de incorporar la estimación de las mismas. Para luego, de forma secuencial y haciendo un barrido de la presión de operación del calentador asociado a la extracción, entre los valores de presión máxima y mínima del ciclo, efectuar la determinación de la disminución

de la demanda de calor y la eficiencia térmica del mismo.

Todo lo cual, queda plasmado en una representación gráfica que muestra el comportamiento de la disminución porcentual de calor demandado por el ciclo en relación al calentamiento sufrido por el agua de alimentación de la caldera, debido a la extracción tomada del proceso de expansión.

2.3. Fase 3: Desarrollo de la herramienta

La estructura de una herramienta computacional está caracterizada por la implementación del paradigma de programación orientada a objetos, en lenguaje Java, lo cual permite obtener un producto de software portable, desde el punto de vista de sistema operativo.

La herramienta cuenta con un apartado para la estimación de propiedades termodinámicas tanto en la región de líquido comprimido, como de saturación y de vapor sobrecalentado, según sea el caso, cada una de ellas con sus respectivas estructuras de datos para el manejo lógico de la información. En segundo lugar, están los métodos de soporte, que permiten disponer de mecanismos para realizar operaciones a través de procedimientos estándares, para predecir el comportamiento matemático de la función y la determinación de su respectiva expresión analítica, incluyendo el cálculo de los coeficientes de una regresión polinomial de orden n , la solución de un sistema de ecuaciones lineales a través del método iterativo Gauss-Seidel, y por último la determinación de las raíces de un polinomio a través del método de división sintética de Newton. Para finalizar, fueron conformadas las distintas ventanas que integran la herramienta, asumiendo mecanismos de validación de entrada de datos, y la presentación de resultados tanto de forma gráfica como tabulada y las respectivas expresiones analíticas obtenidas.

3. Presentación y discusión de resultados

Siguiendo las fases de investigación planteadas, la interfaz gráfica cuenta con una ventana inicial, de acuerdo a la Figura 7. Donde el usuario debe suministrar los datos de entrada con los cuales

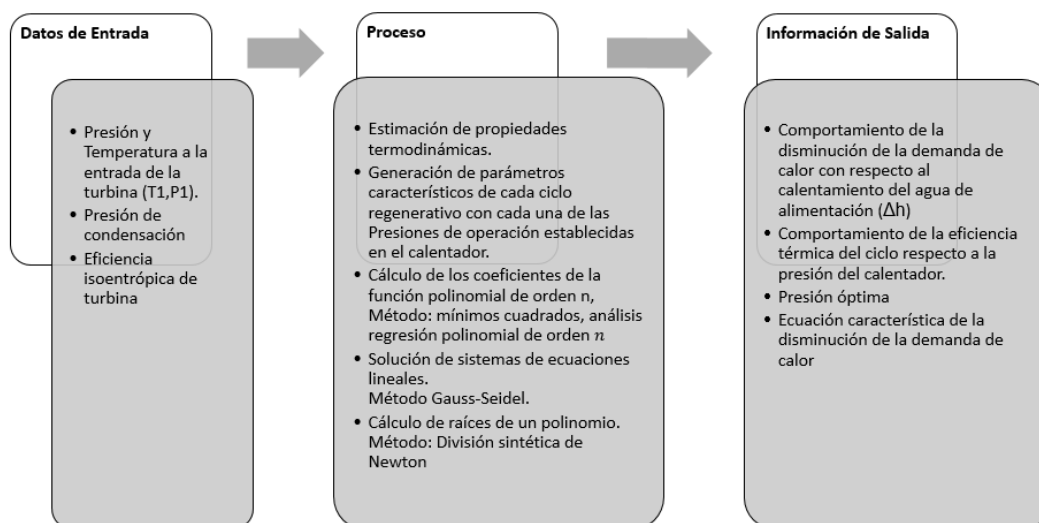


Figura 6: Elementos de diseño de la herramienta computacional

se realizan los cálculos térmicos respectivos, que dan lugar al análisis del proceso objeto de estudio y a la determinación de la presión óptima de la extracción.

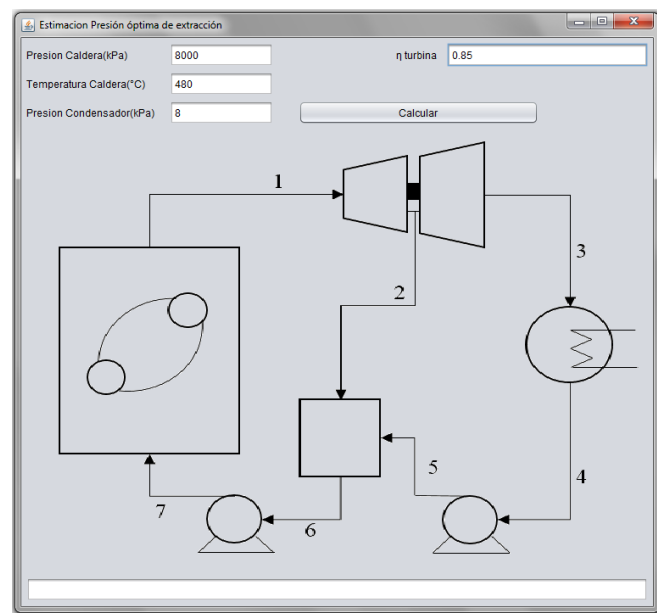


Figura 7: Ventana inicial de la herramienta

Una vez suministrada la información, y por medio del botón “Calcular”, la ventana principal del programa, referida a la Figura 8 muestra de forma gráfica el comportamiento de la

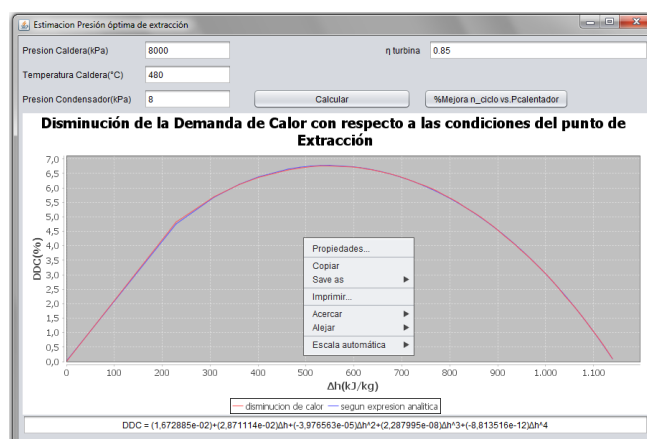


Figura 8: Ventana principal de la herramienta

disminución de la demanda de calor del ciclo con respecto al calentamiento que sufre el agua de alimentación, debido a la extracción. Dando como resultado, además, la expresión analítica de dicho comportamiento, que queda reflejada de forma gráfica en la misma figura. También, incorpora funciones para contemplar la posibilidad de guardar, imprimir, acercar o alejar y así, mejorar el análisis del gráfico resultante.

La Figura 9 muestra los resultados, en forma tabular, del cálculo de la disminución de la demanda de calor del ciclo en relación al

Presion del Calentador(kPa)	Δh(kJ/kg)	DDC(%)
8	0	0
87,92	228,796	4,82
167,84	308,085	5,695
247,76	360,384	6,115
327,68	400,814	6,363
487,52	462,576	6,62
567,44	487,521	6,687
647,36	509,946	6,734
727,28	530,369	6,761
807,2	549,211	6,759
1,046,96	598,067	6,721
1,126,88	612,684	6,697
1,206,8	626,186	6,653
1,286,72	639,267	6,623
1,366,64	651,729	6,574
1,446,56	663,611	6,53
1,526,48	675,122	6,488
1,606,4	686,08	6,436
1,686,32	696,75	6,385
1,766,24	707,01	6,324
1,846,16	716,921	6,265
1,926,08	726,665	6,207
2,006	735,901	6,142
2,085,92	745,138	6,094
2,165,84	753,874	6,038
2,245,76	762,463	5,976
2,325,68	771,001	5,912
2,405,6	779,048	5,839
2,485,52	787,096	5,763

Figura 9: Estimaciones realizadas para el cálculo de la presión óptima de extracción

Presion del Calentador(kPa)	Δh(kJ/kg)	DDC(%)
8	0	0
87,92	228,796	4,82
167,84	308,085	5,695
247,76	360,384	6,115
327,68	400,814	6,363
487,52	462,576	6,62
567,44	487,521	6,687
647,36	509,946	6,734
727,28	530,369	6,761
807,2	549,211	6,759
1,046,96	598,067	6,721
1,126,88	612,684	6,697
1,206,8	626,186	6,653
1,286,72	639,267	6,623
1,366,64	651,729	6,574
1,446,56	663,611	6,53
1,526,48	675,122	6,488
1,606,4	686,08	6,436
1,686,32	696,75	6,385
1,766,24	707,01	6,324
1,846,16	716,921	6,265
1,926,08	726,665	6,207
2,006	735,901	6,142
2,085,92	745,138	6,094
2,165,84	753,874	6,038
2,245,76	762,463	5,976
2,325,68	771,001	5,912
2,405,6	779,048	5,839
2,485,52	787,096	5,763

Presión óptima de extracción: 794.9154011508303kPa

Figura 10: Cálculo de la presión óptima de extracción

calentamiento que sufre el agua de alimentación en el regenerador (calentador), proceso que está relacionado con la presión de operación de este último.

Así, la herramienta permite el cálculo de la presión óptima de operación, evidenciada en la Figura 10.

Una vez generados los resultados tabulados, se procede a estimar la expresión de la función de la disminución de la demanda de calor, a través de un análisis de regresión polinomial por el método de los mínimos cuadrados, que involucra además, de forma directa, la solución de un sistema lineal de ecuaciones y así poder establecer los coeficientes del polinomio $p(x)$ que representa la aproximación de la función, sistema resuelto a través del método iterativo de Gauss-Seidel.

Así, tomando como punto de partida el

polinomio obtenido

$$\begin{aligned}
 DDC &\cong p(\Delta h_i) \\
 &= (1,672885 \times 10^{-02}) \\
 &\quad + (2,871114 \times 10^{-02})\Delta h \\
 &\quad + (-3,976563 \times 10^{-05})\Delta h^2 \\
 &\quad + (2,287995 \times 10^{-08})\Delta h^3 \\
 &\quad + (-8,813516e \times 10^{-12})\Delta h^4
 \end{aligned}$$

y el resultado de la variable dependiente en cada caso evaluado, se calcula el error de acuerdo a la expresión representado en la Ecuación (11)

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p(\Delta h_i) - DDC_i)^2}{n+1}} \quad (11)$$

Obteniéndose entonces para el caso analizado, un error de estimación de 0.00173, lo cual indica que existe un error de al menos una unidad en la tercera cifra decimal. El incremento de la eficiencia térmica del ciclo Rankine regenerativo alcanza un máximo en la presión óptima de operación, el cual queda determinado analíticamente evaluando la primera derivada de la ecuación característica y

posteriormente hallando las raíces del polinomio de tercer orden. Siendo la presión óptima de operación del regenerador 794.9154 kPa.

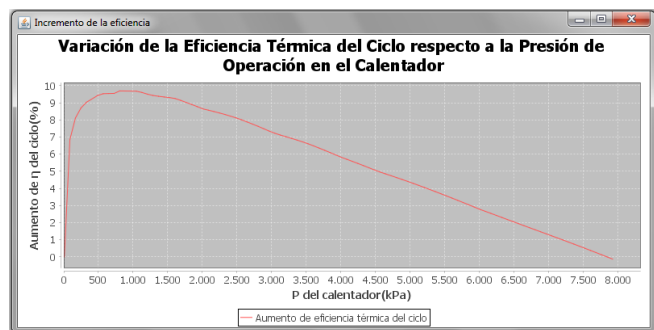


Figura 11: Variación de la eficiencia térmica del ciclo respecto a la presión de operación en el calentador

Por otro lado, la Figura 11 muestra el comportamiento del incremento de la eficiencia térmica respecto a la presión de operación del calentador, permitiendo comprobar el resultado alcanzado.

4. Conclusiones

La estimación de las condiciones óptimas de operación de la extracción en una planta de potencia a vapor regenerativa, implica el análisis y desarrollo de los cálculos térmicos de todos los procesos involucrados, estructurados a partir del primer y segundo principio de la termodinámica. Para lo cual se hace necesario, variar las condiciones de operación dentro del rango válido de presiones del proceso, definidas por las presiones máxima y mínima del ciclo que corresponde con la presión de operación de la caldera y del condensador respectivamente, resultando así un conjunto de variantes simultáneas de un ciclo Rankine regenerativo que deben ser resueltas matemáticamente, tomando en cuenta la estimación de las propiedades termodinámicas pertinentes.

La herramienta computacional desarrollada, se ha diseñado teniendo en consideración la portabilidad de la misma, y la presentación de resultados explícitos a través de los respectivos

gráficos y tablas, que permiten comprender la relación entre el calentamiento del agua de alimentación de la caldera producido en el regenerador y su vínculo con la disminución de la demanda de calor del ciclo que está asociada directamente a la presión de operación del regenerador (calentador). Así mismo, se evidencia el comportamiento de la eficiencia térmica del ciclo a través del rango de presiones del regenerador analizadas.

Paralelamente, la herramienta permite la estimación de la expresión analítica de la función que define la disminución de la demanda de calor con respecto al calentamiento ocurrido en el regenerador, siendo el error de la aproximación de la ecuación característica del orden de 0.00173, de donde se obtiene a partir de la determinación de las raíces de la primera derivada de la ecuación, el valor de la presión óptima de operación de dicho equipo.

Los elementos generados, representan el punto de partida para el análisis de situaciones que impliquen el cálculo de presiones óptimas con un número mayor de regeneradores, por medio de métodos tanto gráficos como analíticos e incluso incorporando procesos de recalentamiento.

5. Referencias

- [1] Unesco. Agua y energía, informe de las naciones unidas sobre del desarrollo de los recursos hídricos del mundo. Reporte Parte 1, División de Ciencias del Agua, Unesco, Perugia, Italia, 2014.
- [2] WEC. Consumo mundial de energía. Technical report, World Energy Council, Reino Unido, 2014.
- [3] Maojian Wang, Guilian Liu, and Chi Wai Hui. Novel shortcut optimization model for regenerative steam power plant. *Energy*, 138:529–541, 2017.
- [4] M.M. Rashidi, A. Aghagholi, and M. Ali. Thermodynamic analysis of a steam power plant with double reheat and feed water heaters. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014:1–11, 2014.
- [5] Dalessandro Soares Vianna, Jaime Batista de Sousa Junior, Edwin Benito Mitacc Meza y Marcilene de Fátima Dianin Vianna. Modelo de programação linear inteira mista para o dimensionamento ótimo de uma termelétrica – estudo de caso: Termelétrica do complexo logístico do açu. *Revista Eletrônica Gestão & Saúde*, 5(Extra 2):986–1001, 2015.
- [6] Álvaro A. Díaz Pérez, José C. Escobar Palacio, Osvaldo J. Venturini, Arnaldo M. Martínez Reyes,

Dimas J. Rúa Orozco, Electo E. Silva Lora, and Oscar A. Almazán del Olmo. Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the brazilian sugarcane and alcohol sector. *Energy*, 152:247–262, 2018.

- [7] Riley M. Gourde and Ben Akih-Kumgeh. A matlab program for the determination of thermodynamic properties of steam. *International Journal of mechanical engineering Education*, 45(3), 2017.
- [8] Michael J. Mora y Howard Shapiro. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Reverté, España, 2004.
- [9] Shouyuan Huang and Xianfan Xu. A regenerative concept for thermoelectric power generation. *Applied Energy*, 185:119–125, 2017.

Spectral analysis of electromagnetic torque in fault detection of eccentricity of three-phase induction motors by means of canonical discriminant

Ledy Guerra*, Francis Barboza, Rubén Terán, Irahis Rodríguez y Eva Monagas

Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

Abstract.- In this paper, it performs the detection of the eccentricity failure in induction motors, through the spectral analysis of electromagnetic torque; for this, it is necessary obtain the electromagnetic torque of the induction motor in different levels of the eccentricity failure. For this purpose, experimental tests were done in a three phase induction motor to get the stator currents and the supply voltages to process in LabView software and obtain the electromagnetic torque spectra. Once those spectral were got, a logarithm was realized in MatLab to generate the canonical discriminant functions, which ones determines if the motor presents eccentricity failure or not and, in case of it presents it, it is specified if it is static or dynamic.

Keywords: static and dynamic eccentricity; canonical discriminant; spectral analysis of electromagnetic torque.

Análisis espectral de torque electromagnético en la detección de fallas de excentricidad de motores de inducción trifásicos mediante el discriminante canónico

Resumen.- En este trabajo se realiza la detección de falla de excentricidad en motores de inducción, mediante el análisis espectral de torque electromagnético; para ello es necesario obtener el torque electromagnético del motor de inducción a distintos niveles de falla de excentricidad. En este sentido, se realizaron pruebas experimentales en un motor de inducción trifásico donde se obtuvo las corrientes del estator y las tensiones de alimentación a fin de procesarlas en un software en LabView y obtener así los espectros de torque electromagnético. Una vez obtenidos estos espectros se realizó un algoritmo en MatLab para generar las funciones discriminantes canónicas con las cuales se determina si el motor presenta falla de excentricidad o no y, en caso de presentar falla de excentricidad, se especifica si es excentricidad estática o dinámica.

Palabras claves: excentricidad estática y dinámica; discriminante canónico; análisis espectral de torque electromagnético.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

Considerando que actualmente las industrias centran su interés en tener altas tasas de producción minimizando los costos y pérdidas que puedan presentarse en el proceso productivo y garantizando la alta calidad en los productos finales, es necesario desarrollar planes de mantenimiento que permitan cumplir con estos objetivos. En este

sentido, el desarrollo de técnicas de mantenimiento predictivo es relevante, ya que consisten en realizar el monitoreo continuo de las variables de estado a fin de establecer el momento óptimo en el cual realizar la intervención de mantenimiento. Con ello se aprovecha al máximo la vida útil de los elementos que constituyen el sistema y se evita las interrupciones no planificadas, que en algunos casos pueden causar mayores daños en el proceso y llevar a pérdidas económicas considerables.

Por otro lado se tiene que uno de los elementos que constantemente está presente en los procesos productivos es el motor de inducción de jaula de ardilla, que en algunos casos representa un elemento de vital importancia en dichos procesos y

* Autor para correspondencia:

Correo-e:ledylauraguerra@gmail.com (Ledy Guerra)

se encuentran en puntos vitales de los mismos. Por consiguiente, aplicar técnicas de mantenimiento predictivo para dicho motor cobra gran importancia en la actualidad. La mayoría de las técnicas de mantenimiento predictivo que actualmente se aplican para el motor de inducción son de carácter mecánico, entre las que se pueden mencionar el análisis de vibraciones y el ultrasonido.

Para mejorar la detección de fallas de origen eléctrico, donde la validez del análisis de vibraciones es limitado o como complemento en la detección de fallas de origen mecánico, surgen técnicas como el análisis espectral de corriente, termografía, análisis de descargas parciales, análisis estroboscópico, corriente de absorción y fuga, el análisis espectral de torque electromagnético, entre otros.

En la presente investigación se utiliza el análisis espectral de torque electromagnético para detectar una falla de asimetría rotórica, caracterizada por la modificación en el tamaño del entrehierro conocida como Excentricidad Estática y/o Dinámica, utilizando como herramienta de análisis de datos el método multivariado discriminante canónico, ya que de esta forma se considera la variabilidad que introduce el cambio en las condiciones bajo las cuales se miden las variables respectivas y a su vez clasifica la unidad experimental disminuyendo la desviación en el análisis de resultado.

2. Excentricidad en Motores de Inducción

La excentricidad es un tipo de falla de asimetría rotórica, la cual se caracteriza por la desigualdad en el entrehierro de la máquina. La presencia de ésta, incrementa los niveles de vibración tanto en dirección axial como radial, debido a las desigualdades magnéticas creadas entre rotor y estator; que de no ser corregido oportunamente pueden resultar en el movimiento excesivo del devanado del estator, provocando el aumento en la fricción, posible falla entre espiras y/o tierra, desgaste de rodamientos, desviando o aumentando la desviación del eje y por lo tanto la fricción entre el rotor y el estator (pérdidas mecánicas).

Adicionalmente, la falta de uniformidad del entrehierro trae consigo valores de reluctancia

variables, lo cual genera armónicos en el campo magnético [1, 2].

Este tipo de falla se clasifica en:

Excentricidad estática: este tipo de excentricidad se presenta cuando el centro transversal del rotor no coincide con el centro transversal del estator, sin embargo el rotor gira alrededor de su propio centro. Una de las causas de la excentricidad estática es el inapropiado montaje del rotor con respecto al centro del estator. En la Figura 1 se muestra esta anomalía.

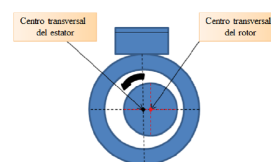


Figura 1: Excentricidad estática

Excentricidad dinámica: la excentricidad dinámica ocurre cuando el rotor gira alrededor del centro del estator mientras que el eje de rotación no coincide con el eje del rotor. Este tipo de excentricidad se presenta debido a curvatura del eje, malformación del rotor, rodamientos desgastados o desalineados, entre otros. En la figura 2 se muestra esta anomalía.

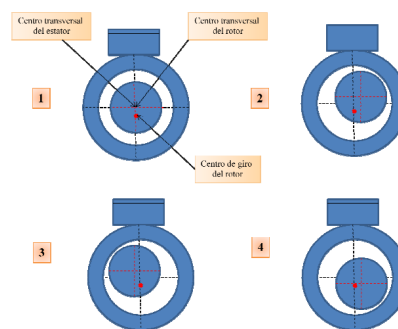


Figura 2: Excentricidad dinámica

Un motor nunca presenta un solo tipo de excentricidad: “la fabricación del motor no puede ser perfecta, por lo que siempre existen excentricidades estáticas y dinámicas residuales.

Además los procesos térmicos a los que se ve sometido el rotor pueden provocar su deformación causando, por tanto, una variación del entrehierro del motor en el tiempo y el espacio” [1]. Inclusive la existencia desde el ensamblaje de excentricidad estática, puede ocasionar la curvatura en el eje y/o desgaste en los rodamientos, dando origen a la excentricidad dinámica.

3. Torque Electromagnético en el Motor de Inducción

El torque de un motor de inducción se genera a partir de la interacción de series de armónicos estatóricos y rotóricos [3]. Algunos de estos armónicos interaccionan para la generación de un par neto, el cual produce el giro de la máquina, mientras que otros lo hacen para producir pares pulsantes que simplemente producen ligeras oscilaciones en la velocidad y potencia mecánica suministradas por el motor [1].

Del mismo modo que la corriente se modifica al aparecer asimetrías rotóricas, cabe esperar que lo haga el par de la máquina [1].

La principal limitación en la utilización del torque electromagnético en la detección de anomalías en el motor de inducción es la dificultad de su medición dado que los transductores de par son relativamente costosos. Una forma sencilla de solventar tal situación consiste en el cálculo del torque electromagnético a partir de los voltajes y corrientes de la máquina. De este modo, mediante un método no invasivo es posible obtener el torque electromagnético instantáneo para luego ser utilizado con fines de diagnóstico [4].

Para obtener el par electromagnético desarrollado por el motor a partir de las tensiones y corrientes instantáneas, se hace uso de la teoría de transformación de ejes de referencia. Esta transformación convierte las magnitudes *abc* del sistema trifásico de la máquina a otro sistema de referencia *dq0*, con la ventaja fundamental que las variables que dependen del tiempo en los modelos de máquinas eléctricas: coeficientes de autoinducción e inducción mutua entre devanados (dependientes de la posición del rotor) se transforman en parámetros constantes [5].

El cambio de variable que representa una transformación de las variables trifásicas de los elementos de un circuito estacionario a un sistema de referencia arbitrario se expresa según la relación (1) [6, 7]:

$$\begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \\ f_{0s} \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d(\xi) + \theta(0)$$

f_a , f_b y f_c : son las variables asociadas a las fases a, b y c respectivamente, del sistema de referencia estacionario.

f_d , f_q y f_0 : son las variables asociadas a las fases d, q y 0 respectivamente, del sistema de referencia arbitrario.

s: subíndice, asociado con el circuito estacionario (estator).

θ : es desplazamiento angular del sistema de referencia *dq0*.

ω : es velocidad angular del sistema de referencia *dq0* en rad/s.

ξ : es una variable de integración ficticia.

En la Figura 3 se muestra la relación trigonométrica entre los ejes del sistema trifásico y del sistema de referencia *dq0*.

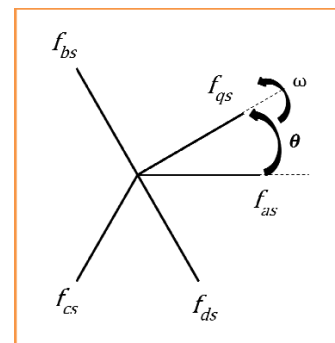


Figura 3: Relación trigonométrica entre los ejes del sistema trifásico y del sistema de referencia *dq0* [7]

No se debe confundir a f_{as} , f_{bs} y f_{cs} con fasores, ellos son cantidades instantáneas que pueden representar cualquier función del tiempo [6].

Por otra parte, es importante resaltar que al escoger adecuadamente la velocidad del sistema de referencia se puede obtener características específicas en el modelo del motor de inducción [4]. A continuación se muestran los casos más comunes:

Sistema de referencia estacionario: el sistema de referencia se encuentra fijo en el estator, por lo tanto $\omega = 0$. Planteado por primera vez por H.C. Stanley.

Transformación de Park: el sistema de referencia se encuentra fijo en el rotor ($\omega = \omega_r$). Planteada por D.S. Brereton para motores de inducción.

Sistema de referencia sincrónico: El sistema de referencia gira a la velocidad sincrónica ($\omega = \omega_e$). Planteado por primera vez por G. Kron.

Claramente, la condición del sistema eléctrico es independiente del de referencia desde donde sea observado. Sin embargo, las variables lucirán diferentes en cada sistema de referencia, excepto en el caso de la forma de onda de la potencia eléctrica instantánea que tendrá la misma forma en todos los casos [6].

Cabe destacar que las variables 0_s son independientes de ω y por lo tanto no están asociadas con un sistema de referencia en particular.

La Figura 4 muestra el modelo del motor de inducción trifásico y simétrico visto desde un sistema de referencia arbitrario (ejes $dq0$).

A partir de la Figura 4 se determinan las ecuaciones de voltaje y corriente necesarias para obtener la expresión del torque electromagnético [6].

4. Ecuación del Torque Electromagnético en el Motor de Inducción

La expresión general del torque electromagnético está dada por la ecuación (2).

$$T_e = \left(\frac{p}{2}\right) (i_{abc})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \left(\frac{N_s}{N_r} L_{sr}\right) i'_{abc} \quad (2)$$

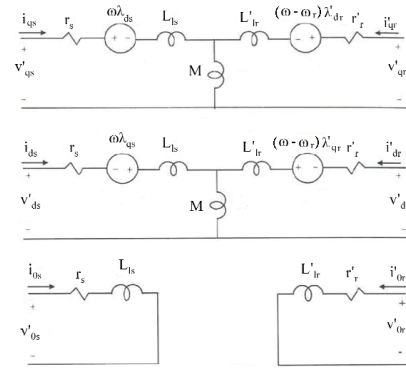


Figura 4: Modelo del motor de inducción trifásico y simétrico visto desde un sistema de referencia arbitrario [6]

Obtenida a partir de la energía del campo magnético de acoplamiento y donde:

T_e : es el torque electromagnético en Nm.

p : es el número de polos.

L_{sr} : Inductancia mutua entre el estator y el rotor en H.

N_s : es el número de espiras del estator.

N_r : es el número de espiras del rotor.

Ahora, para obtener la expresión de torque electromagnético referida al sistema de referencia $dq0$ se sustituyen las ecuaciones de transformación en la ecuación(2) para dar lugar a la ecuación (3) (en función de los flujos magnéticos y las corrientes) y la ecuación (4) (en función de los flujos magnéticos por segundo y las corrientes).

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \frac{1}{\omega_b} (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi_{dr} i_{qr}) \quad (4)$$

Donde:

T_e : es el torque electromagnético en Nm.

p : es el número de polos.

λ_{ds} : son los enlaces de flujo magnético en el estator, eje d en Wb.

λ_{qs} : son los enlaces de flujo magnético en el estator, eje q Wb.

ω_b : es la velocidad angular base seleccionada para el cálculo de reactancias en rad/s.

ψ'_{qr} : es el flujo magnético por segundo de rotor referido al estator, eje q en V.

ψ'_{dr} : es el flujo magnético por segundo de rotor

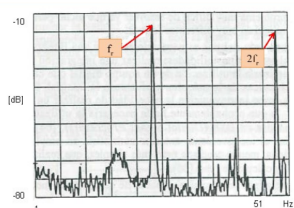
referido al estator, eje d en V.

i'_{dr} : es la corriente rotor referida al estator, eje d en A.

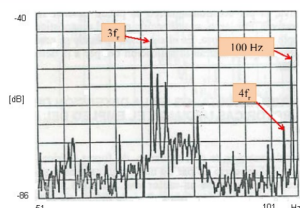
i'_{qr} : es la corriente rotor referida al estator, eje q en A.

5. Espectro de torque electromagnético en motores de inducción sin falla

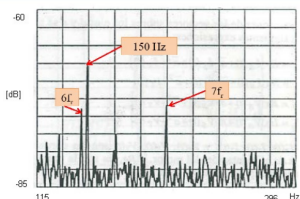
A partir de la expresión genérica del par electromagnético de un motor de inducción de p pares de polos se determinan las frecuencias de oscilación características de una máquina sin averías las cuales se resumen en: el doble de la frecuencia de alimentación, múltiplos de la velocidad de giro y combinación de los anteriores [1].



(a) Espectro de torque electromagnético entre 0 a 51Hz.



(b) Espectro de torque electromagnético entre 51 a 101Hz.



(c) Espectro de torque electromagnético entre 115 y 296Hz.

Figura 5: Espectro de torque electromagnético

Como ejemplo, en la Figura 5a, 5b y 5c, se presenta un espectro de torque electromagnético obtenido de un motor de inducción sin falla, cuya potencia es 11 kW (trabajaba a 80% de su potencia nominal) y 2 pares de polos (frecuencia de alimentación 50Hz) [1].

Las Figuras 5a, 5b y 5c corroboran que el espectro de torque electromagnético de un motor de inducción sin falla tiene como frecuencias predominantes las frecuencias antes mencionadas.

6. Criterios para la clasificación de la falla de excentricidad a través del espectro de torque electromagnético

Para discriminar fallas de excentricidad se realizaron pruebas de laboratorio en un motor de inducción trifásico cuyas características se indican en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos del motor de inducción

Motor de inducción trifásico. Marca SIEMENS	
Tipo	1LA7 090-4YA60
Potencia (Hp/kW)	2,0/1,5
Voltaje (V)	220Y- 440Y
Corriente (A)	7,0-3,5
Factor de potencia	0,8
Velocidad (rpm)	1700
Nivel de protección IP	IP55
Servicio	S1

Las pruebas realizadas se clasificaron en tres grupos, a saber: motor sin falla de excentricidad, motor con excentricidad estática y motor con excentricidad dinámica. En cada una de las condiciones establecidas anteriormente se realizó la adquisición de las tres corrientes estáticas, por medio del prototipo electrónico desarrollado en la Universidad de Carabobo [8, 9], de los tres voltajes de alimentación y de la velocidad del rotor.

La obtención de la señal de torque electromagnético consiste en la aplicación de la transformación de ejes al sistema de referencia $dq0$ a partir de las señales trifásicas en el tiempo de corrientes y tensiones adquiridas. Luego a partir de éstas se calculan los flujos correspondientes a dicho sistema de referencia, para así hacer uso de la expresión propia del torque electromagnético en función de los flujos y de las corrientes.

Una vez obtenido dicho torque se aplica la Transformada Rápida de Fourier y se obtiene el espectro en frecuencia de la señal, seguidamente dichos espectros son almacenados en archivos tipo *.txt, los cuales serán utilizados por un software desarrollado en MatLab para generar las funciones discriminantes canónicas.

El software desarrollado en Matlab basado en el método discriminante canónico como método de clasificación de la unidad experimental (motor de inducción de jaula de ardilla) a través de sus espectros de torque electromagnético contempla cuatro poblaciones de estudio, las cuales son manejadas por pareja dando como resultado análisis independientes de los casos: bajo falla sin falla de excentricidad y bajo falla excentricidad estática falla excentricidad dinámica. Por tanto, se trata de dos análisis de dos poblaciones posibles de clasificación cada uno.

Para este caso, el análisis discriminante canónico es equivalente a la evaluación de las poblaciones correspondientes junto con los espectros a ser clasificados en la función de densidad de probabilidad normal multivariada. Antes de realizar dicha evaluación, se lleva a cabo la manipulación de los datos, lo cual incluye apertura de archivos, creación de matrices de datos y reducción de variables a utilizar (método de regresión paso a paso [10, 11, 12]). Posterior a la evaluación, se realiza el proceso de clasificación de cada espectro.

El esquema básico utilizado para realizar la clasificación de cada espectro se muestra en la Figura 6.

Una vez realizada la evaluación de los datos de espectros de torque electromagnético, como se especificó anteriormente, se procede a analizar los resultados obtenidos y a cuantificar el número de clasificaciones correctas realizadas, información que fue almacenada en los archivos tipo texto dentro de las carpetas correspondientes al análisis.

7. Resultados

La adquisición de datos se realizó para los tres casos bajo estudio: sin falla, bajo falla de excentricidad estática y falla de excentricidad dinámica. En todos los casos bajo estudio, la

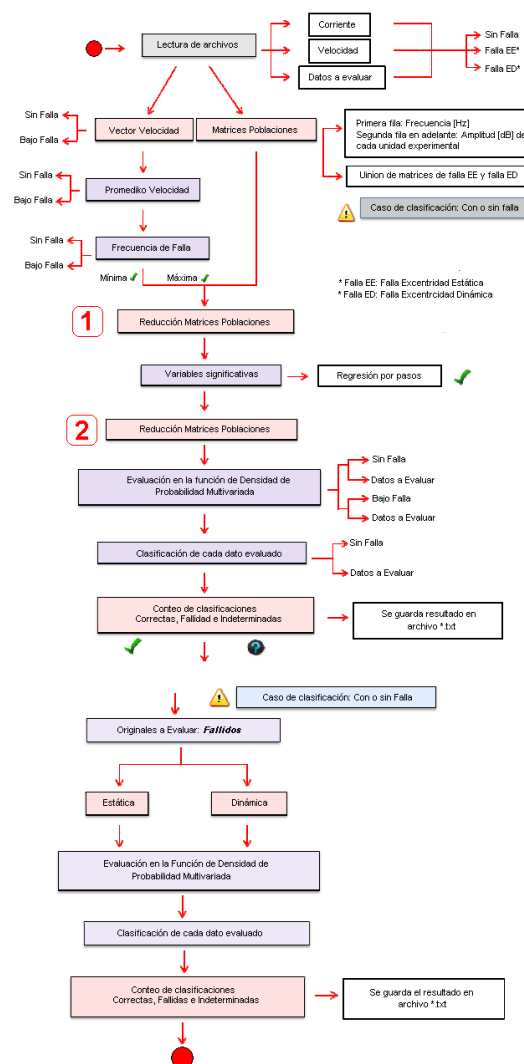


Figura 6: Esquema de clasificación

carga del motor se fijó en su valor nominal (7 A), ya que con esta condición los cambios en los espectros obtenidos presentan amplitudes mayores en comparación con otras condiciones de carga. Para cada caso, se adquirieron 2478 señales almacenadas en días diferentes (1239 señales cada día) con el fin de considerar las fluctuaciones que ocurren en el sistema. Posteriormente se seleccionaron 1200 señales en forma aleatoria para realizar el análisis estadístico. Adicionalmente se establecieron cuatro condiciones de matrices de datos distintas para generar las funciones discriminantes, tal como se muestra en la Tabla 2.

En la Figura 7 se muestra un espectro de torque electromagnético para el caso sin falla y en dicha figura se observa que los picos de mayor amplitud

Tabla 2: Condiciones establecidas para generar las funciones discriminantes

Caso	Condición
1	1000 espectros sin falla, 500 bajo falla de excentricidad estática y 500 bajo falla de excentricidad dinámica.
2	700 espectros sin falla, 350 bajo falla de excentricidad estática y 350 bajo falla de excentricidad dinámica.
3	500 espectros sin falla, 500 bajo falla de excentricidad estática y 500 bajo falla de excentricidad dinámica.
4	1200 espectros sin falla, 600 bajo falla de excentricidad estática y 600 bajo falla de excentricidad dinámica.

se presentan a la frecuencia fundamental (60Hz) y al doble de ella (120Hz).

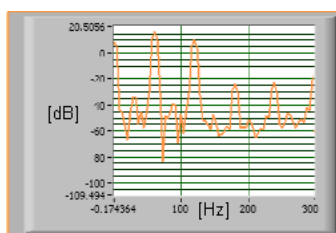


Figura 7: Espectro de torque electromagnético sin falla

Las magnitudes correspondientes a dichas frecuencias se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Magnitud del espectro de torque electromagnético del motor de inducción sin falla

Frecuencia (Hz)	Magnitud (dB)
60	16
120	10

En la Figura 8 se muestra la forma de onda del torque electromagnético para el espectro de la Figura 7.

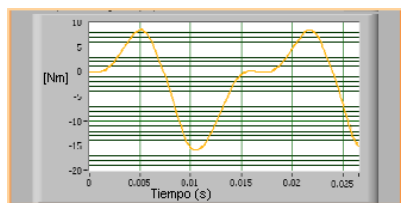


Figura 8: Forma de onda del torque electromagnético para el motor de inducción sin falla.

En la Tabla 4 se muestra el porcentaje de clasificaciones correctas obtenidas para cada condición. En este caso se realiza la clasificación sin falla–bajo falla de excentricidad.

Tabla 4: Porcentaje de clasificaciones correctas. Caso: sin falla–bajo falla de excentricidad.

Caso	Clasificaciones correctas
1	51,33 %
2	63,67 %
3	52,17 %
4	39,00 %

Como se evidencia los resultados de clasificación en la mayoría de las condiciones establecidas son superiores al 50 % obteniéndose como mayor resultado 63,67 %.

Tabla 5: Porcentaje de clasificaciones correctas. Caso: Bajo falla de excentricidad estática–Bajo falla de excentricidad dinámica.

Caso	Clasificaciones correctas
1	43,50 %
2	51,50 %
3	65,25 %
4	41,25 %

En la Tabla 5 se muestra el porcentaje de clasificaciones correctas obtenidas para cada condición. En este caso se realiza la clasificación bajo falla de excentricidad estática–bajo falla de excentricidad dinámica.

Como se evidencia el mayor resultado de clasificación que se obtuvo fue de 65,25 %.

8. Conclusiones

Mediante la realización de la presente investigación se concluye que la técnica de análisis espectral de torque electromagnético diagnostica correctamente un alto porcentaje de espectros tanto para el caso de clasificación sin falla-bajo falla (63.67 %) como para las poblaciones bajo falla de excentricidad estática–bajo falla de excentricidad dinámica (65.25 %). Dado el caso, se corrobora la utilidad de esta técnica en el diagnóstico de esta falla de excentricidad, incluso en el caso de no disponer de transductores de par, ya que

es posible calcularlo a partir de las corrientes y tensiones instantáneas de la máquina utilizando la teoría de vectores espaciales y posteriormente la Transformada Rápida de Fourier para obtener su espectro.

Adicionalmente, a partir del análisis estadístico se observó cómo el aumento en la cantidad de señales que conforman las poblaciones no garantiza que aumente el porcentaje de clasificaciones correctas así como también la incidencia de la variabilidad de las poblaciones en el proceso de clasificación.

Para contribuir con las posibilidades de discriminación de fallas de excentricidad en motores de inducción, se plantea la realización de este estudio aplicando máquinas de vector soporte como algoritmo de clasificación.

9. Referencias

- [1] Gonzalo Alonso Orcajo, Manés Fernández Cabanas, and Manuel García Melero. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo, 1998.
- [2] Abolfath Nikranjbar, M. Ebrahimi, and Alastair S. Wood. Model-based fault diagnosis of induction motor eccentricity using particle swarm optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(3):607–615, 2009.
- [3] Jesús Fraile. *Máquinas eléctricas*. Pearson Educación, 2003.
- [4] E. Suárez and E. Clavijo. Diagnóstico de fallas en rodamientos utilizando el análisis espectral de torque. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2006.
- [5] J. Matos and V. Peraza. Aplicación de mantenimiento predictivo a una data de señales eléctricas de motores de inducción (34 HP–69 HP) en el área de trefila gruesa de la empresa vicson S.A. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2008.
- [6] Paul Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, and Steven Pekarek. *Analysis of electric machinery and drive systems*, volume 75. John Wiley & Sons, 2013.
- [7] Jorge Landázuri Mera and Andrés Quintanilla Arboleda. Análisis y simulación matemática de motores usados en sistemas de bombeo electrosumergible. Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador, 2011.
- [8] M. Camacho and R. Ramírez. Construcción de un prototipo electrónico para la adquisición, acondicionamiento y digitalización de las señales de tensión, corriente, flujo axial de dispersión y velocidad asociadas a motores trifásicos de inducción de jaula de ardilla. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [9] A. Centeno and M. Martínez. Plan de mantenimiento predictivo para las máquinas del laboratorio de máquinas eléctricas de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo a partir del análisis espectral de señales eléctricas. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2010.
- [10] Dallas E. Johnson. *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. Number 519.5 J6. I.T.P. Latin America, 2000.
- [11] César Pérez López. Técnicas de análisis multivariante de datos. *Aplicaciones con SPSS, Madrid, Universidad Complutense de Madrid*, 2004.
- [12] L. Piña. Clasificación por variedad de pisum sativum usando métodos estadísticos y técnicas inteligentes. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela, 2005.

Proposal for a matrix of minimum distances between AM broadcast stations for Venezuela based on the propagation curves ITU-R P.368

Fabián Robledo*

Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Naganagua, Venezuela.

Abstract.- In this paper the technical rules of AM radio broadcasting in force in Venezuela are analyzed, and it is designed a proposed matrix with the minimum distances between AM transmitting stations in that nation, considering its various administrative classes, which serves as a reference to evaluate the compatibility between interfered/interfering stations. The matrix was developed considering the dominant mode of propagation of the surface-wave in hectometric frequencies, and the propagation curves from ITU-R Rec. P.368, relating the electrical conductivity of the terrain in the nation with the ones referred in the continental atlas of the Rec. ITU-R P.832. For the design, the current venezuelan protection ratios were considered (dB), and the matrix is proposed both for the bottom (500 kHz) as the top (1500 kHz) part of the AM band, with several conductivities. The range of values obtained for the minimum distances is between 44 km and 1850 km, depending on the classes of the stations, on the band sector in which they operate, on their frequency separation and on the conductivity. The study shows that the proposal is relevant for possible consideration in the planning of the AM broadcast network in Venezuela. It also warns about the need to review the protection ratios in the venezuelan regulations.

Keywords: AM; interference amplitude modulation; broadcasting; ground-wave; radio propagation.

Propuesta de una matriz de distancias mínimas entre estaciones AM para Venezuela basada en las curvas de propagación UIT-R P.368

Resumen.- En este artículo se analiza la normativa técnica de la radiodifusión sonora AM vigente en Venezuela, y se diseña una propuesta de matriz de distancias mínimas entre estaciones transmisoras AM para esa nación, considerando sus diversas clases administrativas, la cual sirve como referencia para evaluar la compatibilidad entre estaciones interferidas/interferentes. La matriz se elaboró considerando el modo dominante de propagación de la onda superficial en frecuencias hectométricas, y las curvas de propagación de la UIT-R de la Rec. P.368, relacionando además la conductividad eléctrica del terreno a nivel nacional con el atlas continental de la Rec. UIT-R P.832. Se consideraron para el diseño las relaciones de protección vigentes en Venezuela (dB), y la matriz se propone para la parte baja (500 kHz) y alta (1500 kHz) de la banda AM, con diversas conductividades. El rango de valores obtenido de las distancias mínimas se encuentra entre los 44 km y los 1850 km, dependiendo de las clases de las estaciones, del sector de la banda en que operen, de su separación de frecuencias y de la conductividad. El estudio demuestra que la propuesta realizada es pertinente para su posible consideración en la planificación de la red de radiodifusión AM en Venezuela. Se advierte también sobre la necesidad de revisar las relaciones de protección en la normativa venezolana.

Palabras claves: AM; interferencia; modulación de amplitud; onda de superficie; radiodifusión sonora; radiopropagación.

Recibido: enero 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

Dentro de los servicios de radiocomunicaciones que se explotan en Venezuela se encuentra el

correspondiente a la radiodifusión sonora, que emplea el método de modulación de amplitud (AM), el cual tienen por objetivo la difusión abierta y directa de mensajes de audiofrecuencia (voz y música) en la banda de frecuencias de onda media (MF o MW) por parte de las estaciones emisoras habilitadas para ello, suministrando información y entretenimiento al público en general situado en las localidades ubicadas en su área de cobertura.

* Autor para correspondencia:

Correo-e: frobledo@uc.edu.ve (Fabián Robledo)

El ente regulador que gestiona las habilitaciones de radiodifusión de los operadores en ese país es la Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), y el marco legal que abarca lo relativo a las emisoras AM se soporta actualmente en el Reglamento sobre la Operación de las Estaciones de Radiodifusión Sonora [1], instrumento publicado en 1993. En lo que sigue se señalará a este instrumento como “el Reglamento”. Normas adicionales aún vigentes que no coliden con el Reglamento y que corresponden a la radiodifusión sonora AM en Venezuela se encuentran en parte del anterior Reglamento de Radiocomunicaciones [2], publicado en 1984.

Una acción importante en la planificación y gestión de la red del servicio AM consiste en determinar las distancias mínimas de separación que deben existir entre las antenas transmisoras de las estaciones radioeléctricas de los operadores, cuyas potencias de operación pueden ser de hasta 100 kW en el país, a los fines de evitar la interferencia perjudicial y proteger a los operadores habilitados dentro de determinadas áreas y localidades en donde su servicio posee prioridad o protección, definida por el ente regulador, soportada usualmente por la precedencia del otorgamiento de su habilitación administrativa o antigüedad.

Sin embargo, el Reglamento y la normativa adicional vigente disponible, incluyendo los manuales, instructivos y/o guías en relación a la radiodifusión sonora publicadas por CONATEL, no establecen normas o lineamientos directos sobre las distancias mínimas (km) que deberían satisfacerse entre las antenas de las estaciones de radio AM de los diversos operadores, a los fines de obtener una interferencia admisible o para que el fenómeno no esté presente en forma apreciable.

La omisión de una matriz reglamentaria de distancias mínimas entre estaciones AM también se observa al revisar la normativa actualizada de los EE.UU., cuando se estudia la documentación pertinente de la Federal Communications Commission (FCC), que incluye a la 47 CFR Part 73 Radio and Television Broadcast Rules, Subpart A: AM Broadcast Stations [3], así como también al analizar lo establecido con alcance mundial

por la Unión Internacional de Comunicaciones (UIT), organismo que no ha publicado en sus recomendaciones o reportes (incluyendo a las recomendaciones de la serie P y de la serie BS.) una matriz al respecto que sirva como guía de planificación para el servicio AM.

Sin embargo, se determinó que en el vecino país de Colombia su ente regulador, quien es el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC), elaboró en 2017 el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada, el cual incluye una “Matriz de distancias de protección (Km)” para el servicio de AM [4], observándose allí que se definen normativamente las distancias mínimas de operación entre estaciones AM, y que se encuentran en el rango comprendido entre 54 km y 670 km para estaciones que operan en la banda entre 500 kHz y 1500 kHz, y en donde se considera la interferencia cocanal y en canales adyacentes, advirtiéndose que las distancias mínimas se corresponden con los particulares niveles de intensidad campo eléctrico (mV/m) y las clases administrativas de las estaciones (que implican ciertas potencias máximas permitidas) definidas reglamentariamente en esa nación, los cuales son diferentes a las clases establecidas en Venezuela por el Reglamento, por lo que la reutilización de esa matriz no sería viable para el caso de Venezuela.

En Venezuela, el Reglamento establece en su Artículo 4 que una estaciones AM transmiten en un canal de la banda de frecuencias de 535 kHz a 1705 kHz (ondas hectométricas), y el Artículo 72 indica que se opera con un ancho de banda necesario (de media potencia) por canal de 10 kHz (nominal) y hasta de 20 kHz siempre que no se produzca interferencia. Además en los artículos numerados del 59 al 63 del Reglamento se categorizan las estaciones AM en cuatro clases administrativas, siendo éstas: a) Estaciones de canal despejado (EDCD). b) Estaciones regionales (ER). c) Estaciones locales (EL) y d) Estaciones locales restringidas (ELR), definiéndose en cada clase la potencia de operación máxima de operación (kW) (o potencia en la antena) y la intensidad de campo eléctrico (dB μ)

Tabla 1: Categorización oficial de las estaciones de radio AM en Venezuela, potencias de operación y contornos de nivel de intensidad de campo eléctrico que limitan las zonas de servicio primaria.

Clase de la estación AM	Potencia de operación, kW			Contorno límite de la zona de servicio primaria, dBμ		Artículo del Reglamento
	Diurna		Nocturna	Diurno	Nocturno	
	Mínima	Máxima				
Canal despejado (EDCD)	50	100	50	57,5	57,5	60
Regional (ER)	10	50	10	61,9	76,3	61
Local (EL)	1	10	5	61,9	80,0	62
Local restringida (ELR)	-	10	5	> 61,9	> 80,0	63

mínima de los modos diurno y nocturno que las estaciones deben colocar en la zona de servicio primaria, la cual está limitada por el contorno protegido de la onda de superficie, que es el modo de propagación dominante para el servicio en esa banda de frecuencias. Esta categorización en clases se resume en la Tabla 1 [1].

Considerando las clases de la Tabla 1, se estima oportuno disponer en el país de una matriz de distancias mínimas entre estaciones AM que permita planificar la red de radiodifusión y estimar si existe o no factibilidad técnica para la incorporación de una estación nueva coexistiendo con las preestablecidas bajo la figura de interferencia inexistente, admisible o perjudicial, matriz que deberá estar soportada por un modelo de interferencia que considere la radiopropagación dominante del modo de onda superficial (groundwave).

En este sentido, en un trayecto de radiocomunicación terrenal con visibilidad directa, se modela en general la propagación entre el transmisor y el receptor por medio de la superposición de una onda directa y una onda reflejada en el terreno, y dependiendo de la naturaleza del suelo, de la frecuencia de operación y de la polarización de la onda, se presenta también una componente adicional a superponer debida a la onda superficial, representadas conceptualmente en un trayecto de radiopropagación entre antenas en presencia de terreno como se indica en la Figura 1. La ecuación de propagación en el caso armónico para el campo eléctrico recibido es la suma fasorial/vectorial de estas tres componentes [5]:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \left[1 + \hat{R}e^{-j\delta} + (1 - \hat{R}) \hat{A}e^{-j\delta} \right] \quad (1)$$

donde \vec{E}_0 es el vector intensidad de campo eléctrico recibida en condiciones de espacio libre y \vec{E} es el vector intensidad de campo eléctrico recibida en condiciones aproximadas a la realidad (con reflexión y difracción). El ángulo δ (rad) de la ecuación (1) corresponde a la diferencia de fase entre las ondas directa y reflejada, definido como:

$$\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) l \quad (2)$$

siendo l la diferencia de recorrido (m) entre la onda reflejada y la onda directa, y λ es la longitud de onda (m). \hat{R} en la ecuación (1) es el coeficiente de reflexión complejo en el punto de reflexión, que expresado en función de su magnitud $|\hat{R}| = R$ y fase en retraso $\arg(\hat{R}) = -\beta$ es:

$$\hat{R} = Re^{-j\beta} \quad (3)$$

y el parámetro adimensional \hat{A} de la ecuación (1) es el factor de atenuación de Sommerfeld de la onda superficial, el cual depende del ángulo rasante, de la polarización, de la conductividad, de la permitividad del suelo, de la longitud de onda y de la distancia involucrada, según el modelo clásico de difracción de Bullington (validado por la UIT-R). Expresiones matemáticas para el cálculo del factor \hat{A} son analizadas por Rábanos, Riera y Tomás [5], y por Barboza [6].

Fenomenológicamente, la onda superficial es el modo de propagación dominante en el rango de

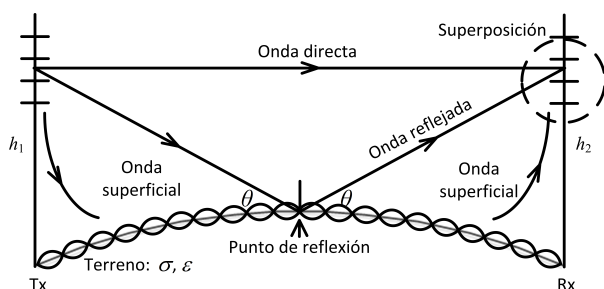


Figura 1: Modelo de superposición en el receptor de la onda directa, la onda reflejada y la onda superficial.

frecuencias que incluye la banda del servicio de AM. En ese rango de ondas hectométricas y para las alturas de antena típicas de las estaciones de radio, se tiene de la ecuación (3) que $\hat{R} \approx 1$ (válido para pequeños ángulos de incidencia en el punto de reflexión, situación típica) y de la ecuación (2) que $\delta \approx 0$ rad [6], por lo que en la ecuación (1) la onda directa y la onda reflejada prácticamente se anulan entre sí al estar en contrafase, y sólo queda como mecanismo de propagación significativo el remanente de la componente de la onda superficial, de modo que bajo este hecho la ecuación (1) se simplifica para la banda del servicio AM, resultando:

$$\vec{E} = 2\hat{A}\vec{E}_0 \quad (4)$$

En la práctica, la UIT propone estimar la intensidad de campo eléctrico \vec{E} (en magnitud) debida a la onda de superficie en forma alternativa a la ecuación (4), mediante el empleo de un juego de cartas con curvas de propagación normalizadas para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz, presentes en la vigente Recomendación UIT-R P.368-9 de 2007 titulada: Curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz [7].

Las curvas se suministran para diversos tipos de terreno (conductividad σ) y frecuencias de operación, determinándose en ellas el denominado campo eléctrico unitario E_G (dB μ) correspondiente a una potencia de operación de 1 kW y empleando una antena transmisora con polarización vertical que produce un campo característico E_C de 300 mV/m a 1 km de distancia, campo definido en la

señalada P.368-9. Ésta es una forma equivalente de especificar la ganancia de la antena, definiendo el campo característico, pues no es usual trabajar con la ganancia de antena o la potencia efectiva radiada en el argot de la radiodifusión AM en Venezuela. Las curvas de P.368-9 se pueden emplear para otra potencia de operación P_T (dBk) y un diferente campo característico E_C (mV/m), determinándose la magnitud del campo recibido E (dB μ) de la onda de superficie en esas condiciones de explotación, como señala Barboza [6]:

$$E = E_G + 20 \log_{10} \left[\frac{E_C}{300} \right] + 10 \log_{10} P_T \quad (5)$$

Por ejemplo, la FCC emplea en sus curvas de propagación AM (similares en concepto a las de la UIT) un campo característico de 346,4 mV/m en lugar de 300 mV/m [6]. Es oportuno indicar que el campo característico es función de la altura del mástil y del número y longitud de los radiales que forman el plano de tierra de la antena AM. La forma típica del campo eléctrico unitario E_G según la distancia se muestra en el ejemplo de la familia de curvas de la Figura 2, para una conductividad y permitividad dieléctrica del terreno determinadas (correspondientes al tipo de suelo, dependiendo de su grado de humedad) y diversas frecuencias de la banda de AM, considerando una potencia de 1 kW y un campo característico de 300 mV/m para una antena de referencia tipo monopolo vertical corto, como se refiere en la señalada ITU P.368-9. La línea recta en la Figura 2 corresponde a la inversa de la distancia asociada a suelo perfectamente conductor y nótese la atenuación adicional a grandes distancias debida al terreno.

La Rec. UIT-R P.368-9 suministra las curvas calibradas de onda superficial para diversos tipos de terrenos, y un rango extendido de frecuencias.

Sobre la base de los argumentos legales administrativos y teóricos expuestos, se tiene como objetivo del presente estudio el diseñar una matriz de distancias mínimas entre estaciones AM para las clases de las estaciones establecidas normativamente en Venezuela, que sirva como referencia para la planificación de la red y los estudios de factibilidad técnica de coexistencia,

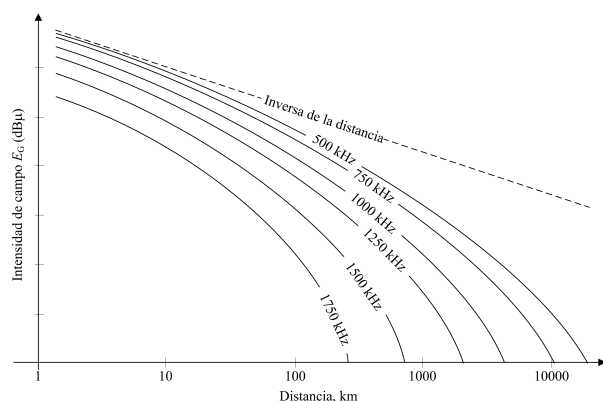


Figura 2: Ejemplo esquemático de las curvas de propagación de la onda superficial de la UIT, representando a la intensidad de campo eléctrico unitario contra la distancia, elaboradas para un determinado campo característico y una potencia de 1 kW.

elaborada empleando un método de propagación válido para el servicio primario, considerando el modelo de propagación de onda superficial señalado por la Rec. UIT-R P.368-9 con varios tipos de terreno presentes en Venezuela.

Diversos antecedentes de investigación oportunos se presentan en la sección 2, y la metodología a utilizar se describe en la sección 3. Los resultados obtenidos y su discusión se exponen en la sección 4, elaborándose las conclusiones pertinentes del estudio en la sección 5. Finalmente se señalan las referencias bibliográficas.

2. Antecedentes

En el ámbito del estudio del problema consistente en determinar adecuadamente a las distancias mínimas que deben existir entre estaciones de radiodifusión para la coexistencia sin interferencia perjudicial ni sobrealcance de la señal de radio, conviene señalar la investigación de Robledo y Castañeda [8], quienes propusieron en 2015 una matriz actualizada con las distancias mínimas requeridas entre emisoras que operan en la banda de frecuencia modulada (FM en VHF 88-108 MHz) ubicadas en Venezuela, basándose en un modelo que fue diseñado por los autores a tal efecto, soportado por las curvas de propagación de la FCC y también como alternativa por las

curvas de la UIT-R propuestas en la Rec. P. 1546, comparándose los resultados obtenidos. El análisis de esa investigación propició la transferencia conceptual del problema para adaptarlo a la banda AM (MF) en el presente estudio, considerándose las diferencias físicas de los modos dominantes de radiopropagación, consecuencia del empleo de distintas bandas de frecuencia para los servicios AM y FM, y empleando también las recomendaciones de la UIT-R adecuadas, en este caso para el servicio de modulación de amplitud.

En relación a otras investigaciones recientes de radiopropagación e interferencia en la banda AM, Torres y Oleas [9] publicaron en 2014 un estudio técnico con el diseño e implementación de una radio digital AM con cobertura en la zona centro del Ecuador, analizando el problema desde el eje de los estándares pertinentes en esa nación. En esa misma nación, en 2013 López y Villarruel [10] efectuaron el diagnóstico de la situación actual de los servicios de radio AM, FM y TV en el sur del país mediante el análisis de información del Sistema Automático de Control del Espectro Radioeléctrico (SACER) de la Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL), planteando soluciones técnicas para las irregularidades de mayor incidencia, incluyendo interferencias entre estaciones, calidad del servicio y monitorización.

En cuanto al modelado de propagación asociado al modo dominante en AM aplicable para cobertura e interferencia, Nishioka, Inasawa, y Konishi [11] efectuaron en 2013 la comparación de las predicciones teóricas de las características de propagación por onda superficial en la banda de onda media y en terrenos mixtos tierra-mar (Métodos de Rotheram y de Millington), contra resultados medidos en Japón. Se trata de modelos computacionales emergentes más allá de lo establecido por la UIT-R y la FCC.

En un sentido similar, Apaydin y Sevgi [12] analizaron en 2013 la propagación por onda superficial en distancias cortas, como alternativa de modelado de precisión de fuente en comparación con los modelos de largo alcance. Adicionalmente, el modelado de propagación de la onda superficial fue revisado en 2011 por Apaydin, Ozgun, Kuzuoglu y Sevgi [13], quienes publicaron un

modelo computacional de propagación de dos rayos basado en la ecuación parabólica de elementos finitos, para tomar en cuenta los efectos de dispersión hacia atrás de la onda de superficie en terreno irregular y en atmósfera no homogénea, refiriendo que el modelo fue verificado y calibrado, lo que enriquece las opciones de cómputo a evaluar más allá de lo que establecen canónicamente las entidades como la FCC y la UIT-R, siendo importante señalar que la UIT-R presenta una mayor recurrencia en la actualización de sus recomendaciones en el tiempo, en comparación con la reglamentación de la FCC.

En relación a la normativa y los parámetros de las estaciones de radiodifusión sonora, Erazo [14] efectuó en 2009 el análisis de la tecnología de redes de isofrecuencia y su aplicación a la radiodifusión en las bandas de AM/FM para la optimización del espectro en la ciudad de Quito, interpretando la situación de interferencia y la normativa, comparada con la establecida por la UIT-R. Finalmente Cely, Bravo y Medina [15] realizaron en 2015, en Ecuador un estudio del comportamiento de las portadoras AM en radiodifusión, con el fin de poder obtener datos estadísticos de la utilización de los canales de transmisión licenciados por el ente regulatorio nacional de ese país, ARCOTEL.

Estos antecedentes de modelado, análisis técnico y normativo del problema de propagación e interferencia en la banda de radiodifusión AM facilitaron el diseño de la metodología para abordar el problema planteado en esta investigación.

3. Metodología

La investigación contempló inicialmente el análisis de la Recomendación UIT-R SM.337-8 de 2008, titulada: Separaciones en frecuencia y en distancia [16], donde se describen los procedimientos para calcular la separación de frecuencia y distancia entre estaciones con el objeto de obtener un nivel de interferencia de RF admisible. Allí se plantea un método de estimación de distancias mínimas que incluye consideraciones de variabilidad estadística, pero que se decidió no aplicarlo en el presente estudio debido a que

no toma en cuenta la interferencia en el aire de los campos de las estaciones en una determinada localidad (de sus enlaces tipo punto-zona), sino que asume la coexistencia de sus respectivas señales justo en el puerto de entrada de RF (o “front end”) del receptor que recibe las señales interferida e interferente (enfoque de enlace punto-punto), lo que requiere el conocimiento de las características de la antena receptora (sintonía y ganancia) y de las pérdidas de su alimentador de línea de transmisión (junto con su estado de adaptación), elementos de difícil estimación en la planificación, pues presentan amplia variabilidad según el fabricante y la tecnología de antena/receptor empleada, dificultando el análisis para una propuesta que sea válida para la red nacional a los fines de planificación general. En consecuencia, se abordó la construcción de un modelo dedicado a tal efecto, que evalúe la interferencia de en el aire (campo eléctrico) de las señales de radiodifusión a los fines de independizarse de las particularidades de la antena receptora.

Para el diseño de una matriz de distancias mínimas en AM aplicable en la nación, se consideró la interferencia en Venezuela entre dos estaciones, una preexistente o “interferida” y otra más reciente o “interferente”, coexistiendo en un determinado territorio y separadas por una distancia d (km). Cada estación pertenece a una determinada clase, lo que según la Tabla 1 define su potencia máxima de operación. Se supondrán estaciones AM operando en condiciones diurnas que impliquen potencias que proporcionen el mayor tamaño permitido del área de cobertura, lo que conlleva operar a la potencia máxima diurna.

En el modelado se estimó como marginal el efecto de las reflexiones ionosféricas, considerando sólo la propagación diurna por onda superficial, basada esta decisión en la atenuación de potencia (dB) que exige la reglamentación en la transición día/noche de los operadores (Tabla 1), para evitar el sobrealcance nocturno, y como método de normalización de las condiciones de propagación. También se asumirán patrones de radiación de antena omnidireccionales (sin arreglos multi-mástil), criterio típico en las herramientas de planificación de la red. También se despreció la

componente transhorizonte sobre tierra esférica.

El campo característico E_c requerido en la ecuación (5) depende de la altura del mástil del monopolo y puede determinarse según la curva de la Figura 3, establecida por los entes nacionales reguladores de la radio AM en EE. UU. [3], México [17] y Perú [18], empleando 120 radiales de longitud $\lambda/4$ para el plano de tierra. En Venezuela, el Reglamento en su Artículo 80, establece el rendimiento mínimo del campo característico (denominado allí como “eficiencia de radiación”) asumiendo una conductividad del suelo = 4 mS/m, y que define los valores correspondientes a E_c para diversas alturas de los mástiles, como se indica en la Tabla 2.

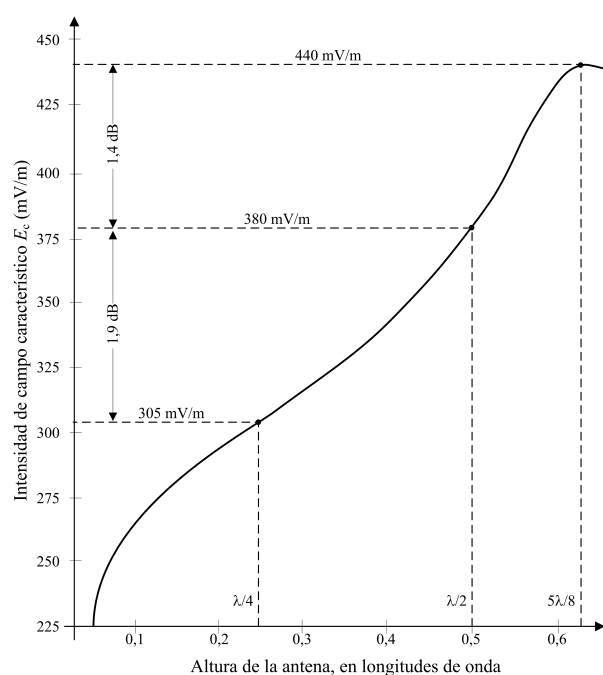


Figura 3: Intensidad de campo característico de una antena monopolo vertical para el servicio AM empleada por las administraciones en EE.UU., México y Perú.

Nótese que los valores representativos de la altura de mástil de antena referidos en la Tabla 2 son $\lambda/4$, $\lambda/2$ y $5\lambda/8$, y en la Figura 3 se indican sus correspondientes campos característicos E_c , observándose que los valores se encuentran entre los 305 mV/m y 440 mV/m, respectivamente (para un rango de 3,2 dB).

Tabla 2: Eficiencia de radiación mínima de las antenas el servicio de radiodifusión AM en Venezuela, según el Artículo 80 del Reglamento.

f_{op} (kHz)	Longitud del mástil, unidades λ	$E_{mín}$ mV/m
< 950	1/4	270
	1/2	330
	5/8	380
960 – 1300	1/4	260
	1/2	320
> 1300	1/8	210
	1/4	250

f_{op} : Frecuencia de operación

$E_{mín}$: Intensidad de campo mínima a 1 km

Dado que este último campo eléctrico de 440 mV/m representa el valor máximo absoluto del campo característico según las referencias de la Figura 3 y de la Tabla 2, se consideró el mismo en este estudio para su aplicación en la ecuación (5) correspondiente a los cálculos de radiopropagación de las estaciones interferida e interferente, siendo esta decisión consistente con la consideración de evitar el sobrealcance a efectos de estimar las distancias en procesos de planificación de la red y de validación de factibilidad de coexistencia (un mayor campo eléctrico ocurre más cerca de la estación que lo produce).

En relación a la conductividad del terreno σ , es necesario definir ésta para el suelo entre las estaciones que interfieren. La conductividad puede experimentar cambios asociados al tipo de suelo y su grado de humedad, y es un parámetro que afecta significativamente el factor de Sommerfeld \hat{A} de la ecuación (4), y en consecuencia al campo unitario E_G debido a la onda superficial.

En Venezuela, se dificulta ubicar estudios publicados que suministren información de éste parámetro a escala nacional y regional para las estaciones seca y lluviosa, por lo que a efectos de estimación se consideró emplear los valores establecidos por la UIT-R en la Rec. P.832-3 [19] que consiste en un atlas mundial de conductividad del suelo, con curvas iso- σ , señalándose allí textualmente que los valores suministrados son adecuados para obtener las mejores estimaciones posibles a efectos de

planificación en radiocomunicaciones en ondas hectométricas, justamente la aplicación que se trata en la investigación.

Analizando el mapa de América del Sur del señalado ese atlas se determinó por inspección la conductividad en múltiples estados de Venezuela en ondas hectométricas, según se observa en la Tabla 3, advirtiendo que el rango de valores de σ para ese país se encuentra entre 1 mS/m y 25 mS/m, intervalo que respalda la selección de los 4 mS/m para la definición de los contornos presentados la Tabla 2 obtenidos del Reglamento (Artículo 80).

Al analizar el contenido de la mencionada Rec. UIT-R P.368-9 que contiene las curvas de propagación por onda de superficie, se observa que abarca varios tipos suelos, siendo las conductividades las siguientes: Tierra húmeda (10 mS/m), tierra (3 y 30 mS/m), tierra moderadamente seca (1 mS/m), tierra seca (0,3 mS/m), tierra muy seca (1 mS/m); entre otras, con valores de permitividad relativa (constante dieléctrica ε) comprendidas entre 3 y 80. Se descarta la consideración de agua de mar debido a que el Reglamento no califica como zonas de servicio a las áreas marítimas, como se refiere en su Artículo 66 [1].

Tabla 3: Conductividad eléctrica del suelo de algunos de los estados y regiones de Venezuela, para ondas hectométricas. Datos obtenidos en la carta de América del Sur del atlas mundial de UIT-R P.832-3.

Estado o región	Conductividad eléctrica, mS/m
Amazonas y parte de Bolívar.	1
Parte de Aragua, parte de Bolívar, Carabobo, Distrito Capital, parte de Lara, parte de Miranda, Nueva Esparta, parte de Mérida, Sucre, parte de Táchira, Trujillo, Yaracuy y parte de Zulia.	4
Parte de Apure, parte de Bolívar, parte de Barinas, Falcón, parte de Lara, parte de Portuguesa, y parte de Zulia.	10
Anzoátegui, Parte de Apure, parte de Barinas, Cojedes, Delta Amacuro, Guárico, parte de Miranda, Monagas y parte de Portuguesa.	25

Considerando que es necesario cruzar el rango de valores de conductividad plausibles para Venezuela referido en la Tabla 3 con el rango que ofrecen las cartas de la Rec. P.368-9, se decidió realizar los cálculos de propagación por onda superficial con dos tipos de terreno ofrecidos en la recomendación: Uno correspondiente al tipo de terreno “Tierra”, con $\sigma = 3$ mS/m y $\varepsilon = 40$, y otro con el tipo de terreno “Tierra”, con $\sigma = 30$ mS/m y $\varepsilon = 40$. Este espectro de valores de σ cubre la mayor parte del territorio y población nacional, y suministra resultados por exceso en los campos eléctricos, adecuados para disponer de un factor de seguridad de alcance en los resultados, necesario para la planificación de la red para el servicio de AM.

Adicionalmente, los cálculos de propagación de la propuesta se realizaron para frecuencias ubicadas en la parte inferior y superior de la banda AM, compatibles con cartas de propagación disponibles, las cuales fueron 500 kHz y 1500 kHz, situadas relativamente cerca de los límites de la banda comercial de AM en Venezuela.

Al analizar la interferencia entre un par de estaciones AM debe considerarse la relación de protección RP (indicada en dB) que compara el nivel de campo eléctrico producido en un sitio por la estación interferida E_D (dB μ) con el nivel de campo eléctrico en el mismo sitio debido a la estación interferente E_U (dB μ), especificando el criterio para una operación en condiciones de interferencia admisible, según la relación de interferencia (dB):

$$E_D - E_U \geq RP \quad (6)$$

siendo el caso crítico de interferencia admisible el que corresponde a la igualdad en la relación (6), luego del cual habría interferencia perjudicial en el sitio de evaluación. Para el servicio de AM, el Reglamento en su Artículo 71 especifica las relaciones de protección que deben satisfacer las estaciones, dependiendo de la separación de frecuencia entre las portadoras (estaciones cocanales o en canales adyacentes). Los valores administrativos de RP de ese artículo se suministran en la Tabla 2. CONATEL ratifica esos valores en su documentación publicada

vigente en relación a la radiodifusión AM. Sin embargo, en el Reglamento no se especifica el ancho de banda de audiofrecuencia el cual se asume en el orden de los 4,5 kHz debido al sistema de modulación en doble banda lateral con gran portadora y al ancho de banda de RF entre canales reglamentario de 10 kHz. Tampoco se establece allí si las relaciones de protección implican o no empleo de un sistema de compresión de audiofrecuencia, y si esta compresión de audio sería ligera o grande, cuestiones que son importantes para establecer adecuadas relaciones de protección en canales adyacentes según la Recomendación UIT-R BS.560-4 de 1997, titulada Relaciones de protección en radiofrecuencia para la radiodifusión en ondas kilométricas, hectométricas y decamétricas [20].

Tabla 4: Relaciones de protección entre estaciones AM establecidas por el Reglamento (Artículo 71) y CONATEL, según la separación de frecuencias.

Canal	Δf kHz	Relación de protección, RP	
		E_{rel}	dB
Cocanal	0	20:1	26
1 ^{er} Canal adyacente	10	1:1	0
2 ^{do} Canal adyacente	20	1:32	-30
3 ^{er} Canal adyacente	30	1:90	-39

Δf : Separación de frecuencia.
 E_{rel} : Campo eléctrico relativo.

Es oportuno comparar las relaciones de protección reglamentarias en Venezuela de la Tabla 2 con las indicadas en la mencionada Rec. UIT-R BS.560-5, la cual recomienda el aplicar determinados valores de las relaciones de protección en radiofrecuencia para la radiodifusión sonora en ondas hectométricas (Banda 6: 300 kHz – 3 MHz). Según ese documento, para emisiones cocanal la relación de protección en radiofrecuencia es de 40 dB en el caso de señales estables (onda de superficie). Sin embargo en la Nota 2 de la misma referencia se señala que en 1981 la Conferencia Administrativa Regional de Radiodifusión por ondas hectométricas (Región 2, donde se ubica Venezuela) utiliza una relación de protección

cocanal significativamente inferior, de 26 dB, para los servicios establecidos por onda de superficie, siendo este valor idéntico al indicado en la Tabla 2 para condición cocanal en Venezuela.

La recomendación BS.560-5 establece también que las relaciones de protección para los canales adyacentes para un ancho de banda de audio de 4,5 kHz y una compresión ligera de la señal de audio, serían de -6 dB para 10 kHz de separación de portadoras, y de -29 dB para 20 kHz de separación, y que en el caso de que se empleara una gran compresión de audio (típico en el servicio AM comercial) las relaciones de protección requeridas serían de -10 dB y -29 dB, respectivamente. Estos valores difieren de los que se indican en la Tabla 2. La recomendación no señala el valor de la relación de protección para 30 kHz entre portadoras. De lo anterior se estima recomendable la revisión y posible actualización de los valores reglamentarios de las relaciones de protección en Venezuela para el servicio AM. No obstante, para el estudio se consideraron las relaciones reglamentarias vigentes de la Tabla 2.

El análisis de interferencia implica validar el cumplimiento de la relación (6) para el caso crítico, y dado que la Tabla 1 establece el contorno límite de la zona de servicio primaria ($\text{dB}\mu$), se consideró el valor diurno allí indicado como el nivel de campo de la estación interferida E_D , ($\text{dB}\mu$), con lo que inmediatamente queda establecido el nivel de campo límite que puede producir la estación interferente E_U para satisfacer la RP (dB) obteniéndose:

$$E_U = E_D - RP \quad (7)$$

La selección del valor del campo diurno en lugar del nocturno de la Tabla 1 se efectuó debido a que se trata del valor mínimo de campo eléctrico, el cual maximizará la cobertura, una premisa del diseño para las distancias mínimas entre estaciones a satisfacer a los fines de planificación de la red. Se supone también que la mitigación exigida del campo nocturno en el Reglamento, con respecto al campo diurno en la Tabla 1 (lo cual implica la reducción de la potencia de emisión nocturna al anochecer) se debe a la contribución nocturna adicional del modo de propagación de

la onda ionosférica, y que la relación en dB entre esos dos niveles de campo eléctrico debiera haber sido calculada por el diseñador (el ente regulador) tomando en cuenta un alcance similar para la superposición (coherente) de la onda ionosférica más la onda superficial, de manera que la cobertura efectiva no varíe significativamente con la transición día-noche. Esto facilita que la estimación de la matriz de distancias mínimas de la presente investigación se efectúe considerando únicamente el modo diurno, sin componente de reflexión ionosférica, al ser equivalente a la suma del modo nocturno que incluye a la onda ionosférica mitigada por reducción de potencia, más la onda superficial.

Sobre la base de los argumentos expuestos y resumiendo la metodología, el modelo propuesto para la determinación de la distancia mínima entre dos estaciones AM de clases dadas se basa en el empleo de las curvas de propagación UIT-R P.368-9 señaladas en la sección 2, e implica que se calcule para la estación interferida la distancia d_1 (km) desde su sitio de transmisión hasta su contorno de servicio primario diurno E_D (dBμ), para la potencia de operación máxima de su clase, P_{TD} (dBk) y un campo característico máximo de 440 mV/m, o bien $E_C \approx 113$ dBμ. Sustituyendo estos datos en la ecuación (5) se calcula el campo eléctrico unitario de la estación interferida, E_{GD} (dBμ):

$$E_{GD} = E_D - 20 \log_{10} \left(\frac{440}{300} \right) - P_{TD} \quad (8)$$

y con el valor unitario obtenido de E_{GD} (dBμ), se entra en la curva de propagación seleccionada de la Rec. UIT-R P.368-9 correspondiente a la conductividad del terreno y a la frecuencia de operación, pudiéndose entonces determinar la distancia d_1 (km).

A continuación, y de acuerdo a la relación de protección RP (dB) exigida por la separación de frecuencia entre estaciones (Tabla 4), empleando la ecuación (7) se obtiene el nivel de campo eléctrico de la estación interferente, E_U (dBμ), correspondiente a la estación interferente justo el sitio que subtiende la distancia d_1 previamente calculada desde la estación interferida, de manera

que se cumpla exactamente la relación de protección exigida. Esto permite determinar el nivel campo unitario de la estación interferente, E_{GU} (dBμ) en ese punto, luego de lo cual, utilizando nuevamente a la ecuación (5), esta vez para la estación interferente la cual opera con su potencia P_{TU} (dBk) implicará, para su nivel de campo unitario, la relación:

$$E_{GU} = E_U - 20 \log_{10} \left(\frac{440}{300} \right) - P_{TU} \quad (9)$$

Seguidamente, con el valor unitario del campo E_{GU} de la ecuación (9), se entra en la curva de propagación seleccionada de la Rec. UIT-R P.368-9 para la conductividad del terreno y la frecuencia de operación, resultando entonces la distancia d_2 (km) medida desde el sitio de ubicación de la estación interferente hasta el punto de evaluación de la interferencia, que coincide con la ubicación del contorno subtendido por d_1 (km) desde la estación interferida, donde los campos están en una relación de interferencia dada exactamente por la RP (dB).

La estimación de d_1 y d_2 puede realizarse ya sea manualmente en las curvas o bien por medio del software GRWAVE de la ITU [7], teniendo en cuenta el requerimiento de emulador x86.

La condición crítica para establecer el límite de distancia entre estaciones AM para una interferencia admisible será la que exige que las circunferencias de los contornos de servicio centrados en las estaciones (de radio d_1 para la interferida, y de radio d_2 para la interferente) sean tangentes justo en la frontera donde se satisfacen las ecuaciones (7), (8) y (9). De esta manera la distancia mínima requerida entre las dos estaciones en estudio, denotada como d (km) será:

$$d = d_1 + d_2 \quad (10)$$

En la Figura 4 se suministra un gráfico ilustrativo que complementa la metodología diseñada en esta sección para obtener la distancia mínima d de la ecuación (10) entre un par de estaciones AM en condiciones de interferencia. Se reutiliza la metodología conceptual señalada por Robledo y Castañeda [8], pero adaptada en este caso para estaciones en la banda AM en lugar de FM. En

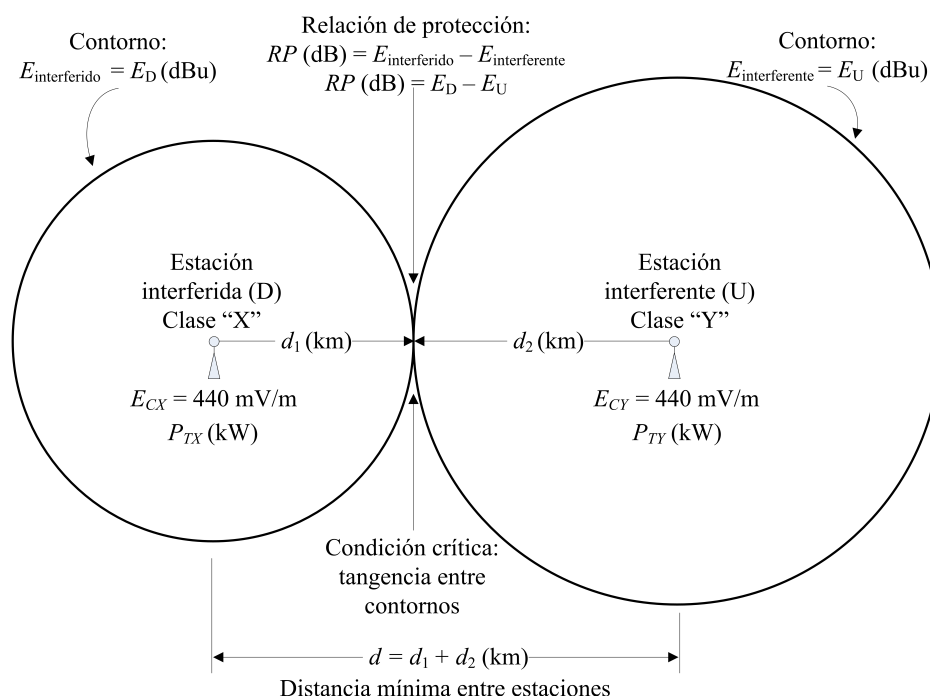


Figura 4: Gráfico ilustrativo de la metodología diseñada para estimación de la distancia mínima entre estaciones AM.

la Figura 4, a la izquierda está el contorno de servicio circular de la estación interferida "X", el cual se tiene para la distancia d_1 con respecto a esa estación, y a la derecha el contorno de servicio del campo de la estación interferente "Y", que se presenta a la distancia d_2 de esa estación.

La ubicación de los dos contornos se calcula para la potencia máxima de operación de las estaciones según su clase, y con el campo característico máximo de 440 mV/m que corresponde a un mástil de $\lambda/8$ con 120 radiales de $\lambda/4$ para el plano de tierra, considerando las frecuencias y la conductividad del terreno, supuesto homogéneo. La condición límite de interferencia admisible se impone mediante la tangencia de los dos contornos, resultando en la suma $d = d_1 + d_2$ para la separación mínima entre estaciones. Esta es la distancia mínima requerida de separación.

El procedimiento y sus cálculos descritos se repiten posteriormente para todas y cada una de las combinaciones administrativas posibles de estaciones AM según sus diversos tipos de clases, hasta obtener los valores para todas las celdas de la nueva matriz de distancias mínimas

requeridas objeto de la investigación, válida para los tipos de terreno seleccionados y las subbandas de frecuencia en consideración, situados convenientemente en los límites de la banda AM. (partes baja y alta de la banda).

4. Análisis y discusión de resultados

Una vez diseñada la metodología descrita en la sección 3, empleando una hoja de cálculo Excel se realizaron los cálculos que permitieron determinar todas las distancias mínimas d entre dos estaciones AM de clases arbitrarias, definidas según la ecuación (10), cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. Allí se emplean los acrónimos de las clases de las estaciones señalados en la Tabla 1. La Tabla 3 suministra las distancias mínimas requeridas para las frecuencias seleccionadas en los extremos aproximados de la banda AM de 500 y 1500 kHz, con conductividades estimadas de 3 y 30 mS/m, correspondientes ambas a tierra con dos grados diferentes de humedad, selección adecuada para caracterizar a las temporadas nacionales seca y lluviosa, y separación de frecuencias Δf (kHz) dada entre las

Tabla 5: Matriz de distancias mínimas de separación entre estaciones AM propuesta para Venezuela (km), calculadas para la onda superficial en modo diurno, obtenidas a partir de la Rec.UIT-R P.368-9, determinadas a frecuencias de 500 kHz y 1500 kHz, en cocanal y canales adyacentes, sobre tierra con conductividades de 3 y 30 mS/m.

Clase		EDCD _D (Interferida)															
f_{req} (kHz)		500								1500							
σ (mS/m)		3				30				3				30			
$ \Delta f $ (kHz)		0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
RP (dB)		26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39
EDCD _U		730	420	265	238	1850	1300	790	705	323	166	100	93	690	460	285	262
ER _U		690	415	255	233	1790	1225	743	690	298	156	98	92	670	435	276	256
EL _U		610	355	237	224	1610	1070	698	671	253	131	93	89	590	380	260	245
ELR _U		610	355	237	224	1610	1070	698	671	253	131	93	89	590	380	260	245

Clase		ER _D (Interferida)															
f_{req} (kHz)		500								1500							
σ (mS/m)		3				30				3				30			
$ \Delta f $ (kHz)		0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
RP (dB)		26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39
EDCD _U		635	345	209	186	1580	1020	563	512	266	121	70	64	590	360	212	192
ER _U		595	330	199	182	1520	960	555	506	246	112	68	63	555	340	208	189
EL _U		505	290	184	173	1360	830	508	492	196	96	63	60	490	295	190	180
ELR _U		505	290	184	173	1360	830	508	492	196	96	63	60	490	295	190	180

Clase		EL _D (Interferida)															
f_{req} (kHz)		500								1500							
σ (mS/m)		3				30				3				30			
$ \Delta f $ (kHz)		0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
RP (dB)		26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39
EDCD _U		595	305	169	146	1450	890	433	382	250	105	54	48	545	315	167	147
ER _U		555	290	159	142	1390	830	425	379	230	96	52	47	510	295	163	144
EL _U		465	250	144	133	1230	700	378	362	180	80	47	44	445	250	145	135
ELR _U		465	250	144	133	1230	700	378	362	180	80	47	44	445	250	145	135

Clase		ELR _D (Interferida)															
f_{req} (kHz)		500								1500							
σ (mS/m)		3				30				3				30			
$ \Delta f $ (kHz)		0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
RP (dB)		26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39	26	0	-30	-39
EDCD _U		595	305	169	146	1450	890	433	382	250	105	54	48	545	315	167	147
ER _U		555	290	159	142	1390	830	425	376	230	96	52	47	510	295	163	144
EL _U		465	250	144	133	1230	700	378	362	180	80	47	44	445	250	145	135
ELR _U		465	250	144	133	1230	700	378	362	180	80	47	44	445	250	145	135

EDCD: Estación de canal despejado.

EL: Estación local.

U: Subíndice (Interferente).

D: Subíndice (Interferida).

ER: Estación regional.

ELR: Estación local restringida.

f_{req} : frecuencia.

estaciones interferida e interferente, transmitiendo éstas ya sea en condición cocanal ($\Delta f = 0$ kHz) o en canales adyacentes (primero, segundo o tercero, con valores de Δf de ± 10 kHz, ± 20 kHz y ± 30 kHz, respectivamente), y sus correspondientes relaciones de protección RP (dB) reglamentarias, definidas de acuerdo a la Tabla 2.

Al analizar la matriz de la Tabla 3 se observa que la distancia entre estaciones aumenta a medida

que se incrementa la conductividad del suelo, y también que disminuye en el caso en que se incremente la frecuencia de las estaciones (porción de la banda donde operan), resultados de acuerdo con el modelo de la onda superficial. Además, la distancia mínima d aumenta conforme disminuye la separación de frecuencia Δf de las portadoras, siendo máxima en la operación cocanal (la condición más perjudicial).

El rango de valores calculados de las distancias mínimas de la matriz de la Tabla 3 se encuentra entre un mínimo los 44 km para un escenario de baja conductividad, alta frecuencia en la banda AM, considerando ambas estaciones de la clase Local Restringsida ELR, operando con una separación de tercer canal adyacente; y un máximo de 1850 km para un escenario de alta conductividad, baja frecuencia en la banda AM, considerando ambas estaciones en la clase de Canal Despejado EDCD, operando en frecuencia cocanal (en el caso hipotético en que tal explotación fuera permitida administrativamente).

Este intervalo de distancias mínimas comprendido entre 44 y 1850 km posee casi dos órdenes de magnitud de separación. Se puede comparar este rango de distancias con el establecido en la normativa del MINTIC de Colombia [4] (señalada en la sección 1) situado entre un mínimo de 54 km y un máximo de 670 km para estaciones AM en la banda entre 500 kHz y 1500 kHz, si bien se desconoce cuál fue la conductividad asumida del terreno en ese estudio, y las relaciones de protección empleadas por esa nación, de ahí la diferencia de resultados con la propuesta, justificada además por los diferentes valores de potencias de operación con respecto a las de Venezuela, dado que las clases administrativas son diferentes entre ambos países.

Se advirtió que algunos de los valores de distancia mínima de la Tabla 3 son lo suficientemente altos para impedir la asignación de ciertas combinaciones de estaciones AM dentro del territorio de Venezuela, debido a las dimensiones físicas del país, con 916445 km² de superficie, lo que corresponde a un diámetro equivalente de 1080 km, aproximadamente. Esto se encuentra de acuerdo con la denominación de ciertas estaciones como de “Canal Despejado” en la normativa, situación interpretada como libre de interferencias en cocanal al ser reservada la frecuencia para su uso exclusivo por parte de una estación de esta clase, a nivel nacional, cuando el ente regulador lo considera pertinente.

Se observó que la matriz de la Tabla 3 no es simétrica, por ejemplo si se tiene una estación de clase ER (regional) y otra de clase EL (local),

operando con $\Delta f = 20$ kHz en frecuencias cercanas a la parte baja de la banda baja (500 kHz) y terreno de alta conductividad (30 mS/m), y si se considera a la ER como interferida y a la EL como interferente, la distancia mínima requerida entre las dos estaciones será de 508 km, pero si se invierten las condiciones, tratándose a la estación EL como la interferida y a la estación ER como interferente, la distancia mínima se reduce a 425 km (un 16 % de disminución, aproximadamente). Esta asimetría se debe principalmente a la no linealidad de las curvas de propagación de la onda superficial.

Dadas las coordenadas geográficas de ubicación de las dos estaciones AM, la distancia entre ellas, estimada por ejemplo sobre tierra esférica, puede calcularse mediante el algoritmo de círculo máximo o bien, para distancias cortas, por el método de tierra plana establecido por la FCC. Ambos métodos están referidos en el manual de la National Association of Broadcasters (NAB) [21], siendo válido según esa referencia el método de tierra plana siempre que la distancia entre estaciones no exceda los 475 km, cuestión ratificada además por la sección 73.208 de las Rules and Regulations de la FCC [3]. La distancia obtenida entre las dos estaciones se compara entonces con la que ofrece la matriz propuesta de la Tabla 3 a fines de planificación o de validación técnica, resultando la información sobre si la coexistencia sería bajo interferencia admisible o perjudicial. En caso de que el sector de la frecuencia de operación de las estaciones y la conductividad no sean exactamente las de la Tabla 3, se puede aplicar un mecanismo de interpolación, ya sea lineal o con “splines” del grado polinómico adecuado, dependiendo de la precisión requerida.

Como ejemplo ilustrativo para Venezuela, considérese una hipotética estación “X” interferida, clase ER (Estación regional, potencia de operación máxima diurna de 50 kW), transmitiendo a 820 kHz, con antena omnidireccional ubicada en el estado Aragua, en las coordenadas geográficas N 10° 13’ 14”, O 67° 17’ 22” cerca de la ciudad de La Victoria, y una estación “Y” interferente, clase EL (Estación Local, potencia de operación máxima diurna de 10 kW), transmitiendo a 850 kHz, con antena omnidireccional ubicada en el

estado Carabobo, en las coordenadas geográficas N 10° 01' 47", O 68° 08' 07", cercana a la localidad conocida como Campo de Carabobo. La distancia entre estas dos estaciones es de 95 km según el algoritmo de círculo máximo. Para los estados Aragua y Carabobo, de la Tabla 3 resulta una conductividad $\sigma = 4$ mS/m (muy cercana al valor de 3 mS/m incluido en la Tabla 3), y la separación de frecuencias entre estaciones es $\Delta f = 30$ kHz.

Con estos datos, al entrar en la Tabla 3 resultaría una distancia mínima requerida d de 173 km si se selecciona la parte baja de la banda (500 kHz) y de 60 km si se selecciona la parte alta de la banda (1500 KHz). Dado que la frecuencia promedio de las estaciones en estudio es de 835 kHz, la interpolación lineal en la Tabla 3 implicaría una distancia mínima requerida de aproximadamente 135 km, la cual excede en 40 km a la distancia entre estaciones de 95 km, lo cual empeoraría durante la estación lluviosa al aumentar la conductividad, por lo que se concluye que en esas condiciones la coexistencia de esas dos estaciones no sería factible y habría interferencia perjudicial. Esta herramienta de detección temprana del problema de interferencias antes de la permisología e implementación de una nueva emisora se estima de utilidad para el ente regulador que gestiona las habilitaciones administrativas de radiodifusión.

Una solución al problema del ejemplo podría ser el aumentar la separación de frecuencia entre estaciones, emplear un arreglo direccional de antena, o disminuir la potencia de operación de la estación interferente, de manera que la interferencia pase de ser perjudicial a admisible según la relación de protección que se requiere.

5. Conclusiones

El análisis de los resultados de la sección 4 permite concluir que la matriz propuesta de distancias mínimas de la Tabla 3 proporciona una guía de referencia para la planificación y actualización de la red (grilla) de las estaciones de radiodifusión AM, adaptada específicamente a las clases de estaciones y a las relaciones de protección establecidas por la normativa vigente en Venezuela.

Se trata de una matriz diseñada en base a la radiopropagación de la onda superficial en modo diurno de las emisiones de los mástiles de las antenas (supuestas omnidireccionales) de las estaciones interferida e interferente y está disponible para dos conductividades del terreno dentro de las cuales se incluyen grandes y pobladas áreas de territorio nacional (por ejemplo en la región capital y central), resultando la matriz calculada en los sectores inferior y superior de la banda AM reglamentaria en ondas hectométricas, siendo viable la interpolación para otras conductividades o rango de frecuencias.

Ante la ausencia actual en la normativa venezolana de un instrumento similar matricial (u otro equivalente) que especifique distancias mínimas que deben cumplir las estaciones en AM, adecuado a las clases de las estaciones del país y acorde con las particulares relaciones de protección establecidas, la matriz de la Tabla 3 podría ser empleada como elemento de planificación de red por el ente regulador (previa auditoría técnica y pruebas contra la base de datos de estaciones AM) y por los operadores de las estaciones e ingenieros de proyecto que acometen el diseño de nuevas estaciones AM, que deben ser compatibles con la presencia del conjunto de estaciones previamente habilitadas y en operación, y en donde se debe demostrar la factibilidad de coexistencia con interferencia admisible de las nuevas plantas transmisoras con las estaciones previamente habilitadas.

El escenario adquiere importancia considerando que las habilitaciones de radiodifusión sonora otorgadas tienen un tiempo de vencimiento medido en pocos años (por ejemplo de 2, 5 o 10 años), lo que propicia la renovación gradual del uso del espectro radioeléctrico a medida que vencen y se reasignan las concesiones del espectro y las habilitaciones administrativas con sus atributos en AM, implicando la necesidad del mantenimiento continuo de la grilla de asignaciones de la red, validando que se garanticen las distancias admisibles para propiciar el crecimiento racional del servicio.

Dada la iniciativa observada en otras naciones de proponer matrices comparables de distancias

mínimas entre estaciones AM (como la referida en la sección 1 del MINTIC en Colombia), es pertinente este tipo de análisis a nivel nacional bajo un esquema de modelado físico con base empírica soportada en recomendaciones y datos reconocidos internacionales (ante la ausencia actual de modelos locales o regionales), tales como los establecidos por la ITU, tanto para las curvas de propagación como para la conductividad eléctrica del terreno, y donde realizar mediciones a nivel nacional por medios geofísicos de este parámetro de los suelos sería útil a los fines de lograr una mayor precisión. Estas mediciones permitirían su reutilización para el diseño de sistemas de puesta a tierra de los mástiles AM (radiales).

La matriz de la Tabla 3 podría mejorarse añadiendo otros valores de conductividad (o tipos de terreno), implementarse computacionalmente con una mayor cantidad de datos, o bien por el contrario podría simplificarse tomando en cuenta el caso de las mayores distancias posibles, que corresponderían a las más altas conductividades (en período de lluvias, con significancia estadística) y las frecuencias más bajas de la banda AM, de manera que el exceso de distancia actuaría como factor de seguridad o banda de guarda espacial adicional para especificar las distancias mínimas, en cuyo caso podría establecerse la versión simétrica de la matriz con el objeto de reducir el tamaño de la Tabla 3, con miras a su incorporación en una futura normativa. En este sentido tómesese en consideración también que los cálculos realizados para obtener la matriz se efectuaron para la longitud de mástil que produce la mayor eficiencia de radiación ($\lambda/8$), también con la intención de disponer de un factor de seguridad adicional en las distancias mínimas.

Considerando que Venezuela posee una superficie de 916445 km^2 (sin incluir los 159542 km^2 en disputa territorial con Guyana) se tendría un radio equivalente bajo una aproximación circular de aproximadamente 540 km, y dado que el rango de distancias obtenido en la Tabla 3 se encuentra entre 44 km y 1850 km, este resultado justifica que para determinadas clases y frecuencias en efecto no se deban reasignar dentro del territorio a estaciones en cocanal y aun en cercanos canales adyacentes, a los

fines de evitar la interferencia perjudicial, siendo además necesario analizar lo relativo a la posible mitigación de emisiones cuando las estaciones sean fronterizas, en procesos coordinados de gestión de interferencia con los países vecinos.

El hecho de que la Tabla 3 no incluya la componente de campo debido a la onda ionosférica no tiene efecto perjudicial, debido a que la normativa actual mitiga el efecto nocturno de esta onda al ajustar en el Reglamento los valores de los contornos de servicio de las estaciones. Se presume que ese ajuste se efectúa sobre la base de la equivalencia en AM entre el campo de la onda superficial (diurna) y la suma del campo de la onda ionosférica más la onda superficial (nocturna), cuestión que podría analizarse detalladamente en una futura investigación para calibrar adecuadamente la atenuación nocturna de potencia requerida, dado que la fenomenología de la onda celeste o ionosférica es muy diferente a la de la onda de superficie al tratarse de un medio ionizado con grandes fluctuaciones.

Finalmente, se estima conveniente revisar los valores reglamentarios de las relaciones de protección en Venezuela (dB), comparándolos con los estándares actuales señalados, recomendados por la UIT, dadas las mejoras recientes en la selectividad de los receptores y en lo relativo a la compresión de audio.

6. Referencias

- [1] República de Venezuela. Decreto N° 2.771. Reglamento sobre la operación de las estaciones de radiodifusión sonora. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, 1(4.530 Extraordinario):1–35, 1993.
- [2] República de Venezuela. Reglamento de radiocomunicaciones. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, (3.336 Extraordinario), 1984.
- [3] PART 73-Radio broadcast services, subpart A-AM broadcast stations, 2012. Federal Communications Commission, U.S. Government Publishing Office.
- [4] MTIC. Plan técnico nacional de radiodifusión sonora en amplitud modulada, Julio 2013. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, República de Colombia.
- [5] José María Hernando Rabanos, J. M. Riera, and L. M. Tomás. *Transmisión por radio*. Editorial Universitaria Ramón Areces, Madrid, 7^{ma} edition, 2013.

- [6] Z. Barboza de Vielma. *Antenas y propagación*. Universidad de Los Andes, Merida, Venezuela, 1991.
- [7] UIT-R. Recomendación UIT-R P.368-9. curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz, 2010.
- [8] Fabián Robledo Upegui and Idelmaro Castaneda Brito. Tech note; Proposal for a matrix of minimum distances between FM broadcasting stations based on the FCC and ITU-RF (50, 50)-F (50, 10) charts. *Revista Ingenieria UC*, 22(1):110–119, 2015.
- [9] Anabel Carolina Torres Andrade and Jhoana Paola Oleas García. Estudio técnico y diseño para la implementación de una estación radial AM para brindar el servicio radial con cobertura para la zona centro del Ecuador con las estaciones base en el cantón Guano. Trabajo Especial de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2014.
- [10] Marcelo Javier López Sanmartín, Villarruel Amendaño, and Carlos Eduardo. Diagnóstico de la situación actual de los servicios de radio y televisión en el sur del país mediante el análisis de información del sistema automático de control del espectro radioeléctrico (SACER) de la superintendencia de telecomunicaciones (SUPATEL) y planteamiento de soluciones técnicas para las irregularidades de mayor incidencia. Trabajo Especial de Grado, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador, 2013.
- [11] Yasuhiro Nishioka, Yoshio Inasawa, and Yoshihiko Konishi. Comparison of measured and theoretically predicted results of ground-wave propagation characteristic at mf-band. In *Electromagnetic Theory (EMTS), Proceedings of 2013 URSI International Symposium on*, pages 302–305. IEEE, 2013.
- [12] Gokhan Apaydin and Levent Sevgi. Groundwave propagation at short ranges and accurate source modeling [testing ourselves]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 55(3):244–262, 2013.
- [13] Gökhan Apaydin, Ozlem Ozgun, Mustafa Kuzuoglu, and Levent Sevgi. A novel two-way finite-element parabolic equation groundwave propagation tool: Tests with canonical structures and calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(8):2887–2899, 2011.
- [14] Javier Héctor Erazo Chulde. Estudio y análisis de la tecnología de redes de frecuencia única (isofrecuencia), y su aplicación a la radiodifusión en las bandas de am y fm para la optimización del espectro electromagnético en la ciudad de quito. Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- [15] Jefferson Angelo Bravo Gómez and Carlos Alfredo Cely León. Medición, caracterización y modelamiento del rango de frecuencias asignado a radiodifusión AM (525-1705 kHz) de la banda MF del espectro electromagnético en la FIEC, Campus Prosperina. Trabajo Especial de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [16] UIT-R. Recomendación UIT-R SM.337-8 . separaciones en frecuencia y en distancia, 2008.
- [17] Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Modificación a la norma oficial mexicana NOM-03-SCT1-93, especificaciones y requerimientos para la instalación y operación de estaciones de radiodifusión de televisión monocroma y a color (bandas VHF y UHF). *Diario Oficial*, Primera Sección, Mayo 2004.
- [18] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Resolución Ministerial N° 358-2003-MTC-03. Normas técnicas del servicio de radiodifusión. *El Peruano*, page 244172, 2003.
- [19] UIT-R. Recomendación UIT-R P.832-3. Atlas mundial de la conductividad del suelo, 2012.
- [20] UIT-R. Recomendación UIT-R BS.560-5. Relaciones de protección en radiofrecuencia para la radiodifusión en ondas kilométricas, hectométricas y decamétricas, 1997.
- [21] Graham A. Jones, David H. Layer, and Thomas G. Osenkowsky. *National Association of Broadcasters Engineering Handbook: NAB Engineering Handbook*. Taylor & Francis, 2013.

Physical Cell ID for LTE Network: recommendations for planification

Romer Valor ^a, Yofrank Torres ^a y Ahmad Osman ^{*,b}

^a*Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Centro de Análisis y Tratamiento de Señales (CATS), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- Planning the Physical Cell ID (PCI) parameter is one of the most important steps in the deployment of the entire LTE network. However, for national companies providing service related to mobile communications, it is difficult to access said detailed information due to certain incompleteness in the technology transfer at the time of the network deployment. In this article, we describe a PCI allocation methodology based on assisted computing and the construction of a new concept materialized through a risk factor matrix, which seeks to avoid the erroneous detection of said parameter by the user's terminal device, which causes problems in the identification of the cell; and thus be able to provide a better quality of service. This concept of risk factor determines the relationship between each pair of PCI for different propagation conditions, encompassing the information obtained about them, and representing it in three states of possible erroneous detection, low, medium and high risk; thus simplifying decision making.

Keywords: long term evolution (LTE); physical cell ID (PCI); user equipment (UE), risk factor.

Identificador físico de celda para redes LTE: recomendaciones para la planificación y asignación

Resumen.- La planificación del parámetro Physical Cell ID (PCI) es uno de los pasos más importantes en el despliegue de toda la red LTE. Sin embargo, para las empresas nacionales proveedoras de servicio relacionado a las comunicaciones móviles es difícil acceder a dicha información detallada a raíz de ciertas incompletitudes en la transferencia tecnológica al momento del despliegue de la red. En este artículo, se describe una metodología de asignación de PCI basada en cómputo asistido y en la construcción de un nuevo concepto materializado a través de una matriz factor de riesgo, que busca evitar la detección errónea de dicho parámetro por parte del dispositivo terminal del usuario, lo cual ocasiona problemas en la identificación de la celda; y así poder brindar una mejor calidad de servicio. Este concepto de factor de riesgo determina la relación entre cada par de PCI para distintas condiciones de propagación, englobando la información obtenida acerca de ellos, y representándola en tres estados de posible detección errónea, bajo, medio y alto riesgo; simplificando así la toma de decisiones.

Palabras claves: evolución a largo plazo; identificador físico de celda; terminal de usuario; factor de riesgo.

Recibido: septiembre 2017

Aceptado: junio 2018

1. Introducción.

Las demandas generadas en el mercado de telefonías móviles y redes de comunicación, han impulsado el desarrollo masivo de una tecnología móvil de alta capacidad conocida como LTE, exigiendo la actualización y desarrollo constante en la red telefónica para mejorar la calidad de servicio prestada. Entre las principales causas que impactan

este factor, está el aspecto de la movilidad, proceso presente cuando el usuario inicia cambios en su localización física y lógica, implicando no perder la conexión constante con la red. Cuando dicho proceso no es soportado adecuadamente, genera insatisfacción en los usuarios, trayendo como consecuencias quejas por la calidad de servicio en las llamadas realizadas debido a que se manifiestan fenómenos como ecos, interferencias, o simplemente porque en algunos lugares se interrumpe la cobertura en su móvil [1].

Es por ello que la planificación de celdas es de vital importancia para el óptimo comportamiento de la red LTE, tomando en cuenta, entre otras cosas, las señales que serán usadas en la capa

* Autor para correspondencia:

Correo-e: ahmadoscman@gmail.com (Ahmad Osman)

física del sistema asociadas al proceso de movilidad e identificación de las celdas que se encuentran dentro del área de localización del usuario, así como también, las necesarias para obtener la estimación del canal de comunicaciones [2].

1.1. Sincronización en LTE

A la hora de tratar de sincronizarse a una celda LTE, el dispositivo móvil busca las bandas de frecuencia soportadas para tratar de recoger una señal de sincronización primaria (P-SCH) que se emite cada 5 ms, y con la cual se determina el parámetro $N_{ID}^{(2)}$. Una vez determinado este parámetro, el dispositivo se encuentra sincronizado a nivel de símbolo y permanece en el canal hasta localizar la señal de sincronización secundaria (S-SCH), que también se emite una vez cada 5 ms, con la que se hallará el parámetro $N_{ID}^{(1)}$. Es decir, con la P-SCH, se sincroniza a nivel de símbolo y después, una vez conocida la P-SCH, puede detectar la S-SCH y así determinar el PCI de la celda descrito por la expresión 1

$$N_{CELL}^{ID} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (1)$$

Donde $N_{ID}^{(2)}$ será un entero entre 0-2 representando alguna de las 3 P-SCH y $N_{ID}^{(1)}$ será un entero entre 0-167 representando alguna de las 168 S-SCH. Esto crea un conjunto de 504 PCIs únicos. Luego de esto, el UE tendrá la información suficiente sobre la localización de las señales de referencia (RS) y el resto de los parámetros de la red [2, 3].

Cada celda del sistema de comunicaciones está identificada por un valor de PCI (Physical Cell ID), el cual, es generado por las señales de sincronización. El valor de PCI que va de 0 a 503 es utilizado por el móvil para identificar la celda y discriminar, a la larga, unas celdas de otras.

Con una cantidad limitada de valores de PCI distintos, se deben evitar fenómenos de colisión y confusión; esto es, cuando dos celdas vecinas tienen el mismo PCI, y cuando una celda tiene dos celdas vecinas con el PCI igual, respectivamente. Véase Figura 1 [4, 5].

Siendo la sincronización y cálculo del PCI los procesos primordiales que el UE realiza para conectarse a la red, es de vital importancia la

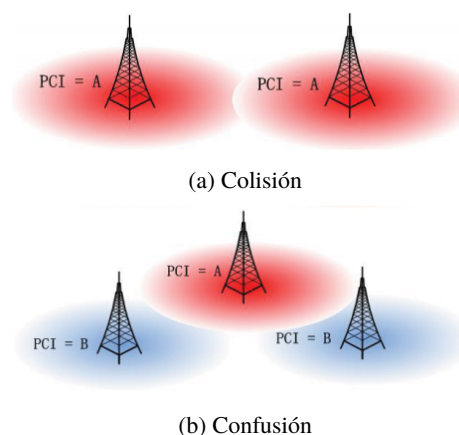


Figura 1: Problemas generadores de interferencia.

planificación de la asignación del parámetro PCI. Diversos estudios, con diversos enfoques han encarado el desafío de seleccionar de manera optima el parámetro PCI de un conjunto de celdas, enfatizando que la asignación razonable de PCI es capaz de reducir de forma considerable la interferencia en el sistema LTE, para mejorar la cobertura de cada celda y los valores de calidad de servicio de la red [5, 6, 7, 8].

En este contexto se plantea el objetivo de analizar el comportamiento de dichas señales y en ultima instancia del mismo PCI en la interfaz aire, y así obtener resultados que puedan ser usados para generar recomendaciones concretas en función de minimizar problemas en esta etapa de identificación de celda.

2. Metodología.

Para cumplir con el objetivo propuesto, se planteó un procedimiento que fue dividido en tres niveles jerárquicos o fases. Dicho procedimiento se muestra en la Figura 2 y se detalla a continuación.

2.1. Fase 1: Generación de secuencias

Primeramente, se recopiló todo el material referente a las especificaciones de la red LTE y a las secuencias de interés para tener una idea exacta de sus formas, dependencias, recorridos y funciones dentro del sistema y de esta manera poder caracterizarlas.

Fueron simuladas, según el estándar [2], las P-SCH, S-SCH y RS para todos los posibles valores

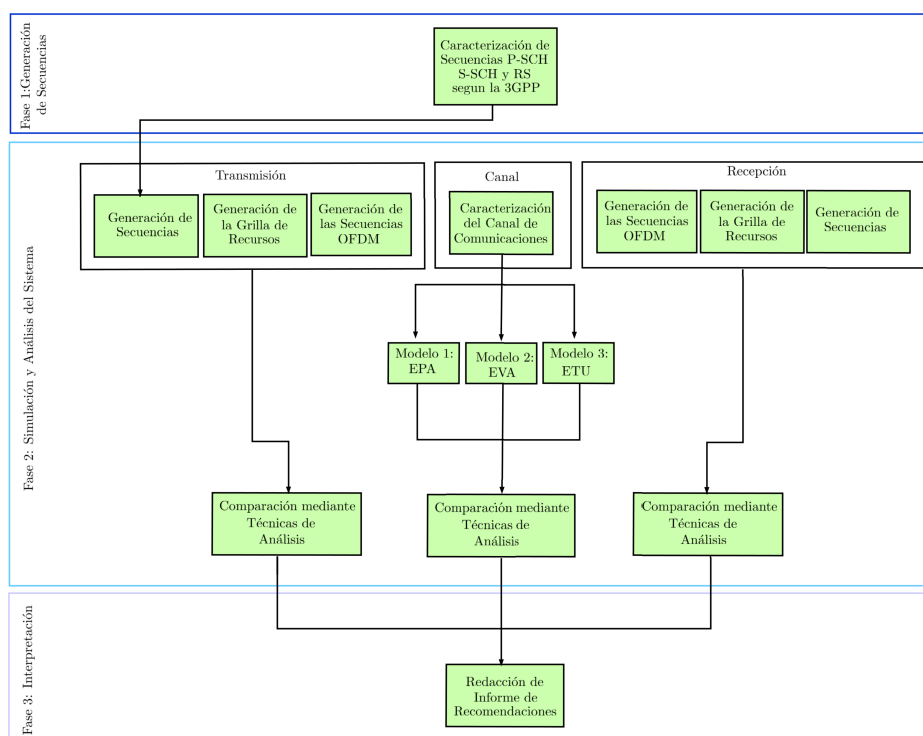


Figura 2: Metodología técnica de análisis de PCI.

de PCI asignables. Estos valores son conocidos como *identificador físico de celda* de un eNB o estación base.

2.2. Fase 2: Simulación y análisis del sistema

Una vez generadas las las secuencias P-SCH, S-SCH y RS, fueron mapeadas, según el estandar LTE, sobre los elementos de recursos (ER) dispuestos en forma de grillas. Las casillas vacías se rellenaron con símbolos que simulan la data con modulación QPSK.

La configuración básica para el sistema LTE estudiado fue: canal en descenso, sistema FDD, ancho de banda igual a 1,4 MHz, cantidad de antenas transmisoras igual a 1, prefijo cíclico normal y 14 símbolos por subtrama.

Posteriormente, se obtuvieron grillas de ER para todos los PCIs evaluados, las cuales fueron convertidas en señales OFDM mediante la IFFT para ser transmitidas por el canal de comunicaciones.

En la etapa de canal, se realizó la simulación de los efectos del canal radio cuando la señal OFDM se propaga a través de él. Los modelos de canal utilizados para LTE están definidos en el 3GPP TS

36.104, donde se describen las distintas variaciones del canal de comunicaciones LTE típico, que incluyen, multipath, fading, rango de frecuencias doppler y velocidad de movimiento del terminal. Además se añadió el ruido gaussiano modelado como un canal AWGN [9].

Una vez que la señal fue pasada por los canales de comunicaciones establecidos, véase Tabla 1, la información llega al receptor donde la señal fue finalmente demodulada.

Canal	Freq Doppler (Hz)	SNR (dB)
EPA	5	1, 5, 10 y 15
EVA	5 y 70	1, 5, 10 y 15
ETU	70 y 300	1, 5, 10 y 15

Tabla 1: Condiciones de propagación simuladas.

Los elementos fueron colocados y ordenados dentro de la grilla de recursos. Luego, a partir de la P-SCH, se pudo detectar la posición temporal de la señal, y por consiguiente, el valor $N_{ID}^{(2)}$ e inmediatamente después $N_{ID}^{(1)}$ mediante la S-SCH; luego, fue calculado el PCI. Este proceso se ilustra la Figura 3.

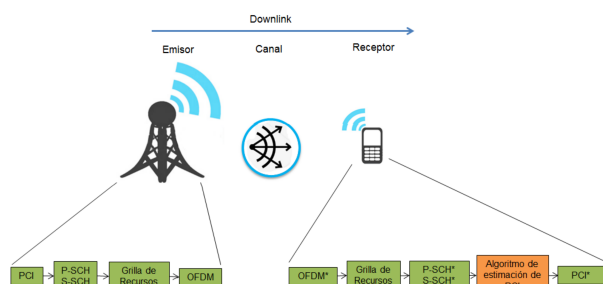


Figura 3: Recorrido del parámetro PCI dentro de la capa física de la red LTE.

Con la variación de los modelos del canal, se estudiaron distintos escenarios entre la etapa transmisora y receptora. Aquí, las gráficas y secuencias generadas en la fase anterior, fueron comparadas en las distintas etapas, visualizándose y examinando los cambios debido a las distintas condiciones de propagación mencionadas anteriormente. De esta forma se fueron evaluando cada par de PCI contra ellos mismos por medio de la correlación cruzada en la etapa receptora, así como un valor determinado de PCI contra todos los posibles valores restantes para especificar las mejores y peores asignaciones para los eNB dentro de la red LTE.

A fin de realizar un análisis exhaustivo sobre los problemas debido al PCI, se simulaban diversos métodos típicos de detección del mismo usados por el UE, para de esa manera apreciar cuales valores de PCI entraban en conflicto visto del lado del receptor o usuario. Los métodos implementados consisten en la detección de secuencias por máxima verosimilitud (Maximun Likelihood [10, 11]), el cual en esencia compara una señal o secuencia de llegada con un grupo de otras secuencias patrones, para elegir de dicho grupo la que más se aproxima a la señal de llegada y de esto inferir que la segunda es la versión distorsionada de la primera. Estas comparaciones luego son pasadas por algoritmos decisorios y de verificación para finalmente permitir al UE estimar un PCI a partir de la señal de transmitida por la celda. Los métodos de detección aplicados sobre las señales de sincronización de la celda, fueron de dos tipos [10, 12]:

1. Detección Coherente: Mejoran la calidad de

la señal proveniente de la celda mediante la estimación de canal.

2. Detección no Coherente: No necesita conocer a priori la respuesta impulsional del canal, y trabaja directamente con la señal de llegada.

Algunos de estos métodos se basan en el análisis indirecto de la S-SCH, mediante las secuencias-m constituidas por: Z_0 , Z_1 , S_0 , S_1 , C_0 y C_1 .

Es importante resaltar que en la realidad los fabricantes de equipos instalan métodos más sofisticados de detección que los simulados, sin embargo se basan en los mismos principios matemáticos. Además los métodos de detección de los UE varían entre fabricantes, por lo que un promedio de las detecciones hechas por los métodos B, C, D1, D2, E1 y E2 representaría un promedio de UEs en un área determinada; a ese promedio se le llamo global. Además, los métodos se pusieron a prueba en diversas condiciones de propagación y nivel SNR realizando varias iteraciones por cada método de detección y así observar cual era el PCI que tendía a detectar. De esta manera se pudo calcular las probabilidades de detección de un cierto PCI para diversas condiciones de propagación.

2.3. Fase 3: Interpretación de resultados y generación de recomendaciones para la asignación del parámetro PCI

Una vez realizado el análisis de las causas generadoras de interferencias dentro de la red LTE que afectaban las señales de interés, se estructuró y redactó un informe técnico, exponiendo de forma práctica y útil, una estrategia o metodología de asignación y planificación del parámetro PCI.

3. Resultados

Acá se tratan los resultados más importantes de la investigación.

3.1. Comportamiento de las señales de sincronización y referencia en función del parámetro PCI

Se evaluó el comportamiento de las señales de las cuales depende el parámetro PCI en el entorno de simulación. Se Constató la robustez

de las P-SCH, véase Figura 4, donde se puede apreciar que la correlación cruzada tiene valores máximos cercanos a 0,2; esto es, que solo bajo condiciones muy críticas o desfavorables podrían llegar a confundirse.

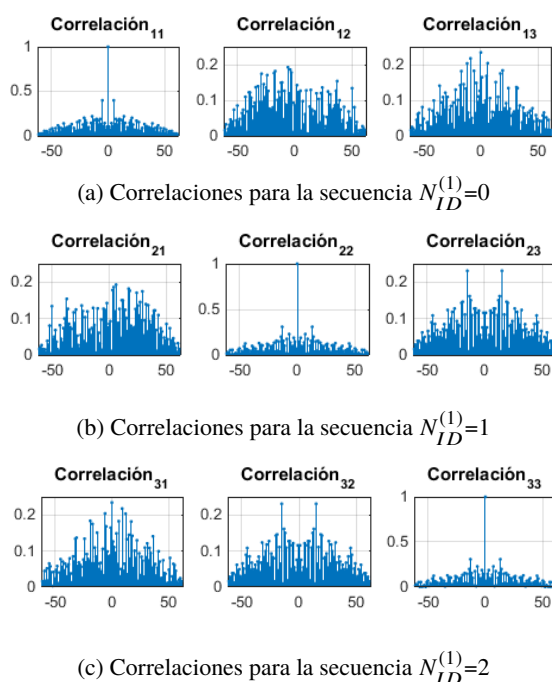


Figura 4: Problemas generadores de interferencia

Por otro lado fueron estudiados los valores correlativos que existían entre unos PCI y otros, realizando un barrido de 504 por 504 PCI, en función de las S-SCH. Esto se observa mediante gráficas como la descrita en la Figura 5. Aquí se observa como el PCI=6 presenta altos valores correlativos (mayores a 0.5) con el PCI=10 y PCI=15 tanto en la subtrama 0 como en la subtrama 5 de las señales de sincronización secundarias.

En cuanto a las señales de referencia RS, véase Figura 6, se pudo observar el impacto que el PCI tiene en la ubicación frecuencial de las mismas en diferentes elementos de recurso, las cuales se repiten cada 6 PCI. De esto se infiere que para evitar interferencia de las señales RS entre dos celdas, estas no deben estar ubicadas en los mismos elementos de recurso, luego, se debe evitar que celdas vecinas tengan valores de PCI cuyo calculo de $PCI \bmod 6$ sea igual, como por ejemplo: 0,6,12,...,498.

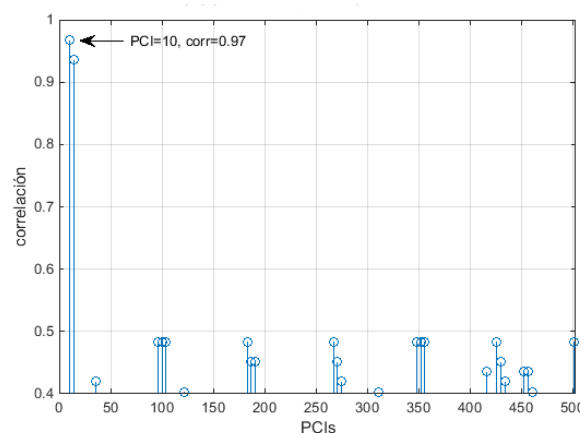
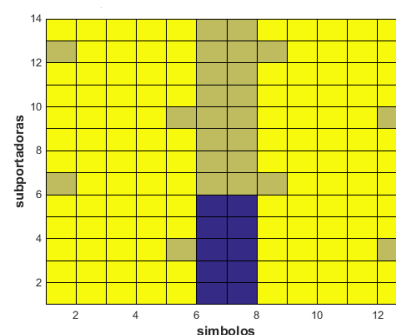
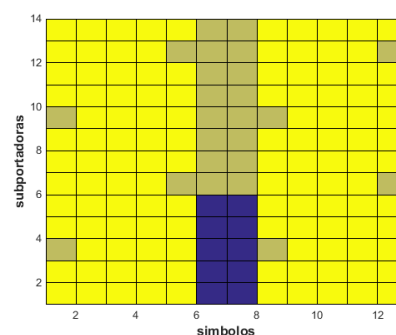


Figura 5: Correlación cruzada de la secuencia S-SCH del PCI=6 en la subtrama 0 Vs. el resto de los PCI.



(a) extracto de grilla de elementos de recursos para PCI=0



(b) extracto de grilla de elementos de recursos para PCI=3

Figura 6: Corrimientos en la grilla de recursos debido al cambio de PCI

3.2. Análisis del comportamiento de las señales de sincronización y referencias a través de modelos de canales típicos en LTE

Se comparó la efectividad de diversos métodos de detección de PCI para varios tipos de canales de

comunicaciones LTE típicos, donde:

- B = Detección coherente de S-SCH en frecuencia.
- C = Detección no coherente de S-SCH en frecuencia.
- Detección coherente de S-SCH utilizando Secuencias M.
- D1 = Estimado por medio de las secuencias Zo y Z1.
- D2 = Estimado por medio de las secuencias So y S1.
- Detección no coherente de S-SCH Utilizando Secuencias M
- E1 = Estimado por medio de las secuencias Zo y Z1.
- E2 = Estimado por medio de las secuencias So y S1.
- Global = promedio de todos los métodos.

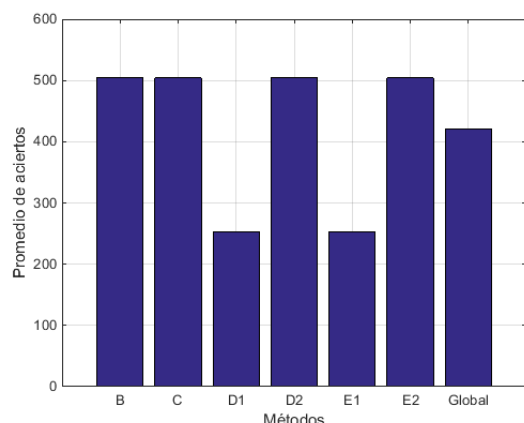


Figura 7: Promedio de eficiencia de aciertos para el caso sin perturbaciones.

Se pudo notar buen desempeño, en cuanto a la detección por parte del receptor, para todos los casos exceptuando D1 y E1, véase Figura 7. Sin embargo, esto cambia cuando el canal estudiado es uno con perturbaciones, como los de la Tabla 1. Observando la Figura 8 se nota el descenso en

el caso de los métodos C y E2 los cuales son detecciones no coherentes, la eficiencia de los métodos D1 y E1 se mantienen mientras que los métodos B y D2, los cuales son casos coherentes, serían las mejores opciones de detección.

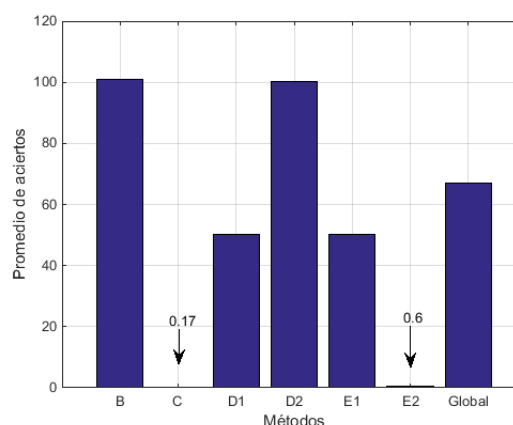


Figura 8: Promedio de eficiencia de aciertos para el caso con perturbaciones.

3.3. Generación del concepto de Factor de Riesgo (FR)

Se propone un nuevo termino global, denotado como Factor de Riesgo (FR), este factor dependerá tanto de la probabilidad de detección del PCI correcto o erróneo en función del método de detección de PCI, como también de las de correlaciones cruzadas de las señales llegadas a la etapa receptora.

El FR propone tres niveles de riesgo en la asignación del parámetro PCI, siendo esto una ventaja debido a la simplificación o compactación de toda la información analizada previamente acerca del vinculo entre los PCI (véase Figura 9). Esto ofrece una representación efectiva y clara del riesgo de detección de PCI erróneo entre celdas aledañas.

Se define, el *factor de riesgo* (FR), a través de la expresión 2:

$$FR(PCI_a, PCI_b) \quad (2)$$

El primer término, representa una celda ya establecida anteriormente con un PCI asignado, y el segundo, una celda nueva esperando a la asignación

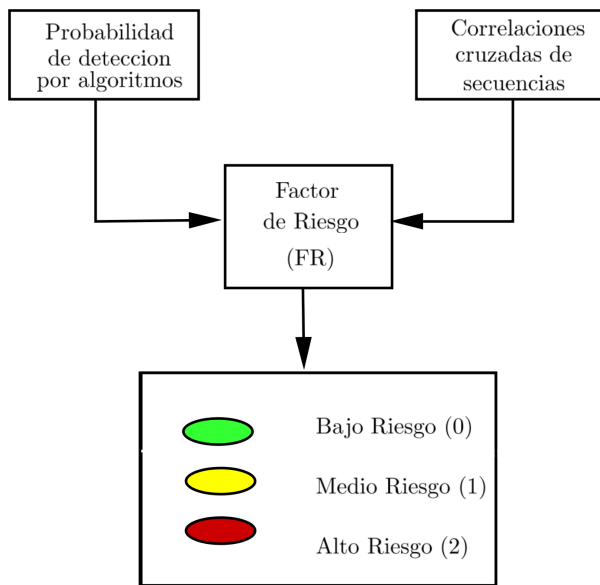


Figura 9: Relaciones del Factor de Riesgo (FR).

de PCI. Los valores posibles de la expresión 2 son: bajo riesgo (representado por 0 o verde), riesgo medio (representado por 1 o amarillo) o alto riesgo (representado por 2 o rojo). Es decir, si se tiene que $FR(PCI_a, PCI_b) = 0$, por ejemplo, implica que existe un bajo riesgo para el UE de detectar un PCI_b erróneamente cuando se recibe un PCI_a .

Para lograr definir el *factor de riesgo*, fue necesario hacer referencia a dos conceptos:

1. Luego de haber estudiado de métodos de detección de PCI, fue estimada la probabilidad de que cuando la celda irradie su señal conteniendo un PCI_a , el UE efectivamente detecte el PCI_a , a esto le llamaremos de ahora en adelante autoprobabilidad, denotado como $prob(PCI_a, PCI_a)$ o $autoprob(PCI_a)$ o simplemente $ap(PCI_a)$, como se observa en la expresión 3. También se calculó la probabilidad para cuando un PCI_a transmitido por una celda, el UE ubicado en el área de cobertura de dicha celda no detecte el PCI_a , sino que detecte un PCI_b transmitido por otra celda cercana, siendo PCI_b cualquier PCI distinto de PCI_a ; a esto se le denotará como $prob(PCI_a, PCI_b)$ o simplemente $p(PCI_a, PCI_b)$. Se obtuvo una función p para cada variación de las condiciones de propagación consideradas.

2. Fueron generadas también funciones *corr* o simplemente *c* y *autocorr* o simplemente *ac*, donde estas son producto del análisis puramente correlativo sobre las señales de sincronización secundaria para las correlaciones de PCI en función de los modelos de canal y del SNR estudiados; esto es, a la medición de la correlación percibida entre un PCI_a distorsionado recibido y un PCI_b sin perturbaciones, siendo PCI_b cualquier PCI distinto de PCI_a , se denotará como $corr(PCI_a, PCI_b)$ o simplemente $c(PCI_a, PCI_b)$.

Se disponen de las funciones p y c para ser transformadas en P y C , respectivamente, mediante los criterios mostrados en las ecuaciones 3 y 4.

$$P(PCI_a, PCI_b) = \begin{cases} 0 & \text{Caso A} \\ 1 & \text{Caso B} \\ 2 & \text{Caso C} \end{cases} \quad (3)$$

$$C(PCI_a, PCI_b) = \begin{cases} 0 & \text{Caso D} \\ 1 & \text{Caso E} \\ 2 & \text{Caso F} \end{cases} \quad (4)$$

$$FR(PCI_a, PCI_b) = \begin{cases} 0 & \text{Caso G} \\ 1 & \text{Caso H} \\ 1 & \text{Caso I} \\ 2 & \text{Caso J} \\ 2 & \text{Caso K} \end{cases} \quad (5)$$

Los casos del A al K se describen a mediante las expresiones:

Caso A :

$$p(PCI_a, PCI_b) < 0,9ap(PCI_a)$$

Caso B :

$$ap(PCI_a) > p(PCI_a, PCI_b) \geq 0,9ap(PCI_a)$$

Caso C :

$$p(PCI_a, PCI_b) \geq 0,9ap(PCI_a)$$

Caso D :

$$c(PCI_a, PCI_b) < 0,9ac(PCI_a)$$

Caso E :

$$ac(PCI_a) > c(PCI_a, PCI_b) \geq 0,9ac(PCI_a)$$

Caso F :

$$p(PCI_a, PCI_b) \geq 0,9ac(PCI_a)$$

Caso G :

$$P(PCI_a, PCI_b) = 0 \wedge C(PCI_a, PCI_b) = 0 \text{ o } 1$$

Caso H :

$$P(PCI_a, PCI_b) = 1 \wedge C(PCI_a, PCI_b) = 1 \text{ o } 2$$

Caso I :

$$P(PCI_a, PCI_b) = 1 \wedge C(PCI_a, PCI_b) = 1 \text{ o } 2$$

Caso J :

$$P(PCI_a, PCI_b) = 0 \wedge C(PCI_a, PCI_b) = 2$$

Caso K :

$$P(PCI_a, PCI_b) = 2$$

Caso L :

$$P(PCI_a, PCI_b) = 1 \wedge C(PCI_a, PCI_b) = 2$$

Finalmente con las dos funciones parametrizadas de probabilidades y correlaciones se elaboró la función de FR, como muestra la ecuación 5, en la cual, se asignó un mayor peso o influencia a la función *prob* debido a que ésta representa un indicador más riguroso acerca de la dinámica existente entre dos PCI.

3.4. Generación de base de datos del Factor de Riesgo

La base de datos generada, consiste en 20 matrices de FR de 504x504 que contienen todas relaciones posibles entre los PCI (véase Figura 10), clasificados en tres niveles, esto es, una matriz de FR por cada una de las condiciones de propagación simuladas, ver Tabla 1. Además se generaron 10 matrices de FR promedio entre las 20 anteriores.

Estas matrices de FR están diseñadas para ser usadas conjuntamente con su propia metodología, que a grandes rasgos se muestra en la véase Figura 11. Consiste básicamente en:

1. Se elige una de la matriz de FR según la información sobre las condiciones de propagación de la celda a la que se desea asignar el PCI, para esta versión se tienen 20 matrices de FR, esto es lo que llamamos el *enfoque detallado*. Si no se tiene información suficiente sobre las características del canal, se optara por el *enfoque general* y se puede escoger algunas de las 10 matrices de FR promedio.
2. Se busca un PCI que tenga bajo o a lo sumo medio riesgo con los PCI ya asignados previamente, es decir un factor de riesgo igual a 1 o 2 con los PCI que han sido establecidos anteriormente, véase Figura 12.

Para un conjunto de celdas, esta comprobación debe realizarse de manera que, para la primera celda, no necesita comprobaciones de FR. Para dos celdas se hacen 2 comprobaciones, $FR(PCI_a, PCI_b) < 2$ y $FR(PCI_b, PCI_a) < 2$, de cumplir con la condición, el PCI = B se considera válido para la asignación a la celda 2. Lo Expuesto se muestra en la Figura 13. Si se agrega una nueva celda al conjunto, se debe realizar 2 comprobaciones nuevas, que sumadas a las 2 anteriores resultan 4 comprobaciones para un conjunto de 3 celdas. Ver Figura 14. Por lo tanto, para la asignación de N se requieren tantas comprobaciones como indica la ecuación 6.

$$CFR = \sum_{i=1}^n 2(i-1) \quad (6)$$

3. El nuevo PCI escogido se guarda en un lista de PCIs asignados.
4. Por último, se repite, para todas las celdas, el proceso de comprobación de FR.

4. Conclusiones.

La alta demanda de los usuarios y sus expectativas de no tener interferencia en las comunicaciones, hacen que la etapa inicial de sincronización y cálculo de la identidad de celda mediante el parámetro PCI, sea el procedimiento

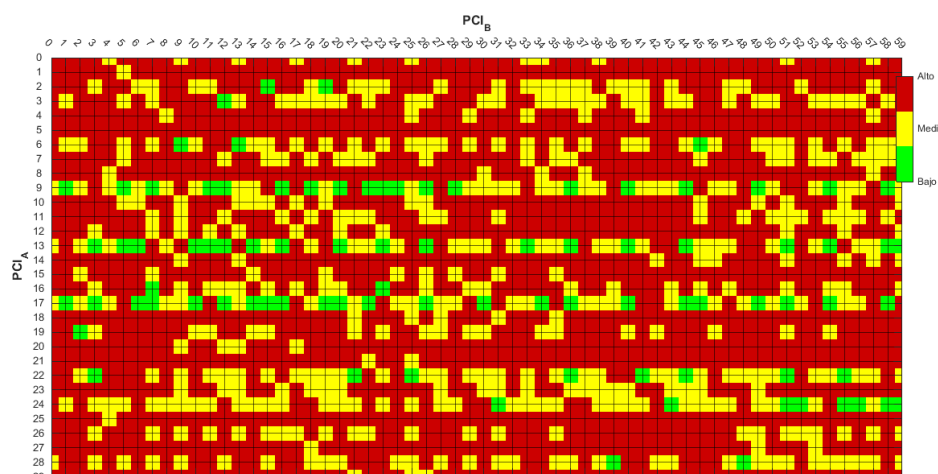


Figura 10: Extracto de 30x60 de la matriz de FR para un modelo de canal EPA de 5Hz y un SNR=1.

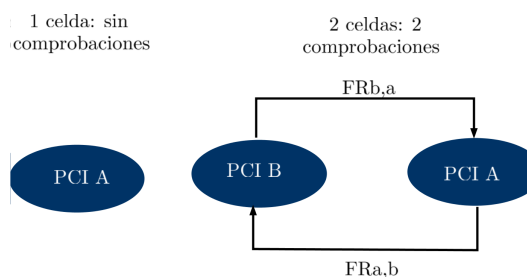
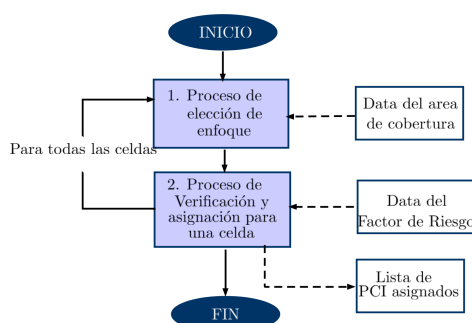


Figura 13: Comprobaciones FR para 1 y 2 celdas.

Figura 11: Diagrama de flujo para escoger un PCI con el FR.

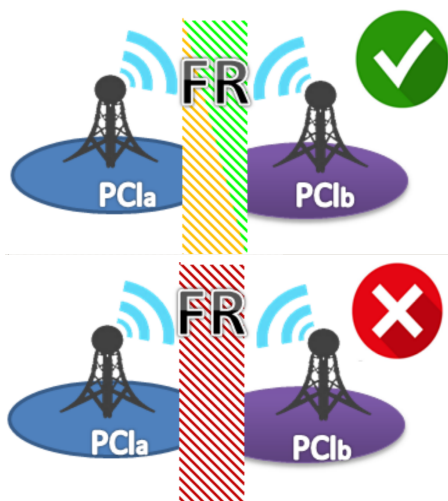


Figura 12: Criterio de asignación de nuevo PCI.

pilar para el acceso a la red LTE, por ende, es necesario la implementación de recomendaciones,

basadas en los posibles escenarios de conflicto de asignación, que complementen la planificación de las redes LTE y eleven la calidad de estas.

Con esta investigación se generó un documento de recomendaciones técnicas que consiste en una metodología de selección del parámetro PCI de múltiples celdas basada en un nuevo término *factor de riesgo*, el cual es producto de los análisis probabilísticos y correlativos sobre las señales generadoras del PCI. La asignación de PCIs, por este método, se realizara una celda a la vez, verificando en todo momento que el PCI de esta nueva celda cumpla con un FR bajo o medio con las celdas aledañas previamente asignadas.

El Factor de Riesgo (FR) que da noción de la relación entre cada par de PCI para distintas condiciones de propagación, englobando la información obtenida acerca de los dos y representándola en tres estados de posible detección errónea entre pares de PCI, bajo, medio y alto riesgo, simplificando así la toma de decisiones.

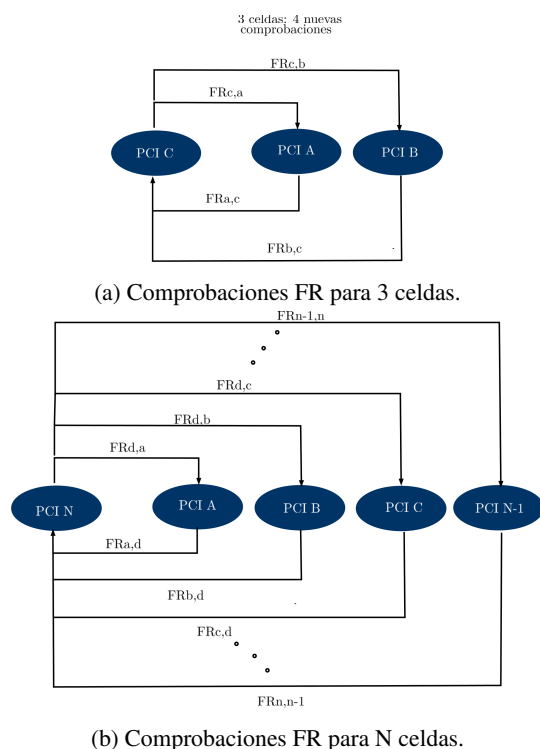


Figura 14: Asignaciones de PCI según número de celdas

El FR también es acompañado por una metodología de uso, lo cual, en conjunto abordan casos de posible conflicto entre PCIs que la estandarización no abarca.

El concepto de Factor de Riesgo no estará supeditado a las simulaciones realizadas en este trabajo, el mismo puede ser nutrido por data proveniente de análisis más sofisticados, complejos o reales de empresas de telecomunicaciones, con el objetivo de mejorar su precisión y refinarlo. Se estima, que implementando simulaciones con métodos de detección de PCI más detallados, semejantes a los que establecen los fabricantes de celulares, la calidad, en las lecturas del parámetro FR se elevaría en mayor medida.

Las estrategias provistas para la asignación del parámetro PCI, además de servir para la planificación inicial de un conjunto de radio bases, también pueden ser útiles en la solución de problemas con el parámetro PCI en tiempo real de una red ya preestablecida, esto se lograría codificando las recomendaciones presentes para luego agregarlas como parte del sistema SON (Self

Organising Network), incluido en todas las redes LTE.

5. Recomendaciones de la investigación.

Debido a que el FR depende de los métodos de detección de PCI simulados, se propone realizar un estudio con métodos de detección más robustos o avanzados que sirvan de comparación para mejoras de lo establecido. Por otro lado, una de las virtudes de este proyecto es la data final generada, puede ser usada como base de datos para el desarrollo de algún software de planificación en diversas plataformas privadas o de código libre.

6. Referencias

- [1] Mehdi Alasti, Behnam Neekzad, Jie Hui, and Rath Vannithamby. Quality of service in wimax and lte networks [topics in wireless communications]. *IEEE Communications Magazine*, 48(5), 2010.
- [2] ETSI. LTE; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 10.0.0 release 10), 2011. European Telecommunications Standards Institute.
- [3] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrus, J.Perez-Romero, and O. Sallent. *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone Espana, 2nd edition, 2010.
- [4] R Acedo-Hernández, Matias Toril, Salvador Luna-Ramírez, and Carlos Ubeda. A pci planning algorithm for jointly reducing reference signal collisions in lte uplink and downlink. *Computer Networks*, 119:112–123, 06 2017.
- [5] Ali MurtadhaPahwa KuldipSinha H. P. Mobile cell selection in 4g long term evolution-advanced (lte-a) networks. *American Journal of Engineering Research (AJER) e-ISSN*, 3:139–150, 2014.
- [6] R Acedo-Hernández, Matias Toril, Salvador Luna-Ramírez, Isabel de la Bandera Cascales, and Faour. Analysis of the impact of pci planning on downlink throughput performance in lte. *Computer Networks*, 76, 01 2015.
- [7] K Manolakis, D.M.G. Estevez, and Volker Jungnickel. A closed concept for synchronization and cell search in 3gpp lte systems. *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–6, April 2009.
- [8] Muhammad Basi Shahab. Neural networks based physical cell identity assignment for self organized 3gpp long term evolution. *2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2012 - Proceedings*, pages 173–177, 07 2012.
- [9] ETSI. LTE; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); base station (BS) radio transmission and

reception (3GPP TS 36.104 version 9.4.0 release 9), 2010. European Telecommunications Standards Institute.

- [10] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. *LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice*. John Wiley and Sons, Ltd. UK, 2nd edition, 2011.
- [11] G.David Forney Jr. Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference. *Information Theory, IEEE Transactions on Information Theory*, 18:363 – 378, 06 1972.
- [12] Shun-Fang LiuPei-Yun Tsai. A non-coherent neighbor cell search scheme for lte/lte-a systems. *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 3300–3305, April 2013.

Hydrolytic degradation and biodegradation of binary mixes of polylactic acid (PLA) with plastic residues

Jhonny Medina^{*,a}, Yenifer Roche^a, Omar Maldonado^a, Juan Carlos Hernández^a y Carlos Zapata^b

^aLaboratorio de Polímeros, Centro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bLaboratorio de Polímeros, Departamento de Polímeros, Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, Valencia, Venezuela.

Abstract.- The objective of this investigation was to evaluate the process of hydrolytic degradation and biodegradation, of binary mixtures of Polylactic Acid (PLA) with plastic waste. For this, different mixtures of PLA were prepared with Polyethylene Terephthalate (PET) and PLA with Polypropylene (PP), with PLA proportions of 5, 10, 15 and 20 % by mass, to select by means of the flow index the mixtures to be used in the degradation processes indicated. The monitoring of the processes was carried out by means of macroscopic observation, percentage of mass loss, variation of the pH of the buffer solution and infrared spectroscopy by Fourier transform (FTIR). The increase in the percentage of PLA makes the degradation of the material susceptible. The loss of mass caused in the hydrolytic degradation of the PLA was 21.20 % and of 3.68 % in the biodegradation. Whereas, the PP and PET degrade in a lower proportion than the PLA. In the hydrolytic degradation the mixture of PP / 20 % PLA lost 11,07 % of mass and the mixture of PET / 20 % PLA 6,05 %. Infrared spectroscopy allows to corroborate the structural changes suffered by the materials during the process of degradation.

Keywords: polylactic acid; plastic residues; hydrolytic degradation; biodegradation.

Degradación hidrolítica y biodegradación de mezclas binarias de ácido poliláctico (PLA) con residuos plásticos

Resumen.- El objetivo de esta investigación fue evaluar el proceso de degradación hidrolítica y de biodegradación, de mezclas binarias de Ácido Poliláctico (PLA) con residuos plásticos. Para esto, se preparó diferentes mezclas de PLA con Tereftalato de Polietileno (PET), y de PLA con Polipropileno (PP), con proporciones de PLA de 5, 10, 15 y 20 % en masa, para seleccionar mediante el índice de fluidez las mezclas a emplear en los procesos de degradación señalados. El seguimiento de los procesos, se realizó mediante la observación macroscópica, porcentaje de pérdida de masa, variación del pH de la solución amortiguadora y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). El aumento del porcentaje de PLA hace susceptibles la degradación del material. La pérdida de masa ocasionada en la degradación hidrolítica del PLA fue de 21,20 % y de 3,68 % en la biodegradación. En tanto, que el PP y PET se degradan en una menor proporción que el PLA. En la degradación hidrolítica la mezcla de PP/20 %PLA perdió el 11,07 % de masa y la mezcla de PET/20 %PLA 6,05 %.La espectroscopia infrarrojo permite corroborar los cambios estructurales que sufren los materiales durante el proceso de degradación.

Palabras claves: ácido poliláctico; residuos plásticos; degradación hidrolítica; biodegradación

Recibido: enero 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

El incremento de los residuos sólidos, específicamente los plásticos, han contribuido con la contaminación ambiental debido a que estos

materiales son elaborados a partir de matrices poliméricas no degradables. Es de resaltar, que un polímero está constituido por macromoléculas formadas por la unión de moléculas pequeñas llamadas monómeros, mientras que el vocablo "plástico", deriva del griego plastikos, que se traduce como moldeable. El plástico es una mezcla o aleación de un polímero con aditivos que es usado en el sector de la construcción, en la fabricación de envases, en la medicina, en la industria automotriz,

* Autor para correspondencia:

Correo-e: jhonnymedina@yahoo.com (Jhonny Medina)

en la de electrodomésticos, entre otros [1].

Los plásticos se clasifican en tres grupos; y según la disposición de las macromoléculas que los constituyen, éstos son: los termoplásticos, cuyas macromoléculas están dispuestas libremente sin entrelazarse; y gracias a ésta disposición, se reblandecen con el calor, adquiriendo la forma deseada, que se conserva al enfriarse. Luego se encuentran los termoestables, aquellos cuyas moléculas se entrecruzan formando una red de malla cerrada, que debido a su disposición, no permiten nuevos cambios de forma mediante calor o presión, es decir, solo se pueden deformar una vez; y por último, están los elastómeros, que contienen moléculas ordenadas en forma de red de malla con pocos enlaces, esto permite obtener plásticos de gran elasticidad que recuperan su forma y dimensiones, cuando se deja actuar una fuerza sobre ellos [2].

Ahora bien, entre los tipos de plásticos que se encuentran en la basura, los más comunes son los termoplásticos, debido a que son materiales de uso común en la cotidianidad. Entre ellos, se mencionan: el Tereftalato de Polietileno (PET), el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) ó (HDPE), Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de Baja Densidad (PEBD) ó (LDPE), Polipropileno (PP) y el Poliestireno (PS). Una vez, que termina el tiempo de vida útil de estos materiales, pasan entonces a ser residuos; los cuales se diferencian de los desechos, ya que pueden ser aprovechables a través de tecnologías o procesos [3].

De acuerdo, a las estimaciones anuales realizadas por PlasticsEurope en el año 2016, la producción de plástico a nivel mundial alcanzó los 322 millones de toneladas en el año 2015 [4]. Por su parte, el Instituto Nacional de Estadística (INE), señaló que en el año 2012 en Venezuela se recolectaron 26.792.036 kg/día de residuos y desechos sólidos (RDS), siendo el plástico uno de los principales componentes de éstos residuos sólidos, lo que representa 0.902 kg/habxdía. El estado Carabobo, es uno de los estados altamente contribuyente a esta cifra, cuyo manejo y disposición final de los RDS, constituyen un problema ambiental, debido a que se genera 2.203.203 kg/día, lo que representa una tasa de

generación de 0,918 kg/habxdía [3].

Es de resaltar, que los residuos plásticos están elaborados por polímeros sintéticos, basados en fuentes de petróleo no renovable; y que además, son poco degradables. Tal como, lo señalan las investigaciones realizadas por el grupo de polímero de la Universidad Simón Bolívar (USB), el lapso de degradación, una vez desechados, oscila entre los cien y mil años. Muestra de estos, son las botellas de plásticos confeccionadas con PET y los vasos desechables fabricados con PP, lo cuales son difíciles de degradar por microorganismo. Por lo que, estarán en el planeta por muchos años [5].

En este sentido, en los últimos años se ha planteado el desarrollo de materiales degradables, como alternativa para contribuir a solventar la problemática ambiental señalada anteriormente. Es por esto, que se ha incrementado el uso de los polímeros biodegradables. Entre ellos, el Ácido Poliláctico (PLA), el cual es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, y biocompatibilidad con otros polímeros, ha encontrado numerosas aplicaciones; como la producción de hilo para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, prótesis, producción de envases y empaques para alimentos, entre otros [6].

Debido a las propiedades del PLA, éste se ha utilizado para disminuir el tiempo de degradabilidad de los plásticos. Para comprobar lo antes mencionado, existen diversas rutas para la degradación de estos biopolímeros, entre ellas se encuentran; la degradación hidrolítica, que se produce como consecuencia del contacto del material con un medio acuoso; y la biodegradación, siendo ésta la transformación y deterioro que se produce en el polímero debido a la acción de enzimas y/o microorganismos como bacterias, hongos y algas [6].

En virtud a lo anterior, y en correspondencia a las áreas de interés del Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, relacionados con la preparación de mezclas poliméricas biodegradables, utilizando como materia prima el PLA, se planteó como

objetivo de esta investigación preparar mezclas de PLA/PET y de PLA/PP, para evaluar su comportamiento durante el proceso de degradación hidrolítica y de biodegradación, a fin de contribuir con el saneamiento del ambiente mediante la disminución de los residuos plásticos [7].

2. Metodología

Para la preparación de las mezclas binarias en diferentes rangos de proporción con PLA y residuos plásticos. Se recolectó, aplicando un muestreo de tipo aleatorio simple al azar [8], residuos de PET y de PP en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Las Muestras fueron trasladadas en bolsas plásticas al Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, en donde fueron acondicionadas para su caracterización. Por su parte, el PLA 4043 en forma de pellets esféricos de aproximadamente 1 cm de diámetro fue adquirido en la empresa NatureWords y trasladado al país por un proveedor desde Louisiana en los Estados Unidos de Norteamérica.

Los residuos de PP, se lavaron con detergente líquido, se enjuagaron con agua y se secaron a temperatura ambiente. Luego, se cortaron en cuadros y se molieron en un molino Marca Condux-Werk modelo LV 15/M. El producto obtenido, se tamizó en un tamiz ASTM-N° 10 con una abertura de 0,0787 pulgadas. Posteriormente, se lavó con agua destilada y se secó en una estufa a 110°C durante 1 hora [9].

En cuanto, a las botellas de PET recolectadas se les quitó la etiqueta, se lavaron con detergente líquido en abundante agua y se secaron a temperatura ambiente. Luego, se cortaron con una tijera descartando la boquilla y la parte inferior de la botella. La parte central se cortó en cuadros, y se molió, tal como se realizó la molienda del PP. El PLA, se molió empleando el mismo procedimiento [7].

Para la selección de las mezclas que se emplearon en el proceso de degradación hidrolítica y biodegradación, se preparó mezclas de PET/PLA y de PP/PLA con proporciones de PLA de 5, 10, 15

y 20 % en masa. Empleando para esto, el método de mezclado directo en físico, en un vaso precipitado, y con agitación manual durante 5 minutos. Luego, fueron caracterizadas mediante el índice de fluidez (MFI).

El índice de Fluidez se midió en un equipo Melt Flow Junior P/N 6943, empleando el procedimiento A establecido en la Norma ASTM D1238-13 [10], el cual consiste en un método manual de medición de masa, en el que el material es cortado en un lapso de tiempo establecido y es pesado en una balanza analítica. Las condiciones de carga, temperatura y tiempo utilizadas para cada material, se muestran en las Tablas 1, 2 y 3 (ver [7]). Esta prueba, se realizó por triplicado para cada mezcla y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D, y por el método del análisis de la varianza (ANOVA) de un factor.

Tabla 1: Condiciones de trabajo de los materiales puros.

Material	Masa (g \pm 0,0001)	T_p (°C \pm 5)	T_{pre} (°C \pm 5)	t_c (s \pm 1)
PP	5,0000	170	100	60
PET	6,0000	250	50	20
PLA	6,0000	200	100	10

T_p : Temperatura de prueba.

T_{pre} : Temperatura de pre-calentamiento.

t_c : Tiempo de corte.

Para llevar a cabo, los procesos de degradación en estudios, se preparó láminas de los materiales puros (PP, PET Y PLA) y de las mezclas seleccionadas. Para esto, se utilizó un equipo Carver constituido de una prensa de calentamiento modelo 6051000 serial 17807, en donde se colocó la muestra solida entre placa metálica de 4 mm de espesor que actúan como molde. Luego, se aplicó presión y se aumentó la temperatura hasta fundir el material. Las condiciones establecidas para la preparación de las láminas de las diferentes mezclas se muestran en la Tabla 2.

Las láminas obtenidas fueron cortadas en rectángulos de 2 cm, para ser utilizadas en las pruebas de degradación que se describen a continuación.

Tabla 2: Condiciones de trabajo de las mezclas.

%PLA	Material PP			
	Masa (g \pm 0,0001)	T_p (°C \pm 5)	T_{pre} (°C \pm 5)	t_c (s \pm 1)
5 %	5,0000	180	100	60
10 %	5,0000	180	100	60
15 %	5,0000	190	100	60
20 %	5,0000	190	100	60

%PLA	Material PET			
	Masa (g \pm 0,0001)	T_p (°C \pm 5)	T_{pre} (°C \pm 5)	t_c (s \pm 1)
5 %	6,0000	250	50	20
10 %	6,0000	250	50	20
15 %	6,0000	250	50	20
20 %	6,0000	250	50	15

 T_p : Temperatura de prueba. T_{pre} : Temperatura de pre-calentamiento. t_c : Tiempo de corte.

Tabla 3: Condiciones sugeridas del equipo según el MFI teórico.

MFI (g/(10 min))	$M \pm 0,1$ g	$t_c \pm 1$ s
0,4 a 0,1	2,0 a 3,0	600
>0,1 a 1,0	2,5 a 3,5	360
>1,0 a 3,5	3,0 a 6,0	180
>3,5 a 10	4,0 a 8,0	60
>10 a 25	4,0 a 8,0	30
>25 a 50	4,0 a 8,0	15

 M : Masa de la muestra. t_c : Tiempo de corte.

La degradación hidrolítica, se llevó a cabo empleando el siguiente procedimiento: Se colocó en el fondo de un frasco de vidrio, que contenía 10 mL de solución amortiguadora de pH 10,50, tres muestras del material a degradar. Luego, se tapó el frascos y se almacenó a temperatura ambiente para su análisis a los días 7, 14, 20, 28, 35 y 68 días [9].

Por su parte, la biodegradación de piezas rectangulares de 2 cm de los materiales en estudios se llevó a cabo en tierra abonada, la cual fue colocada en botella de plástico para formar una columna de 22 cm de altura. El cuerpo de la botella fue agujereado uniformemente para asegurar una adecuada oxigenación del sistema y se determinó el pH y la humedad inicial

de la tierra, ya que estos parámetros son de importancia para los microorganismos presentes. Para determinar la humedad de la tierra, se pesó en una capsulas de porcelana 20 g de la tierra abonada. Luego, se colocó la capsula en una estufa, a 110 °C, durante 1 hora. Posteriormente, se pesó la cápsula nuevamente en una balanza analítica, hasta alcanzar peso constante. En tanto, que para medir el pH se utilizó un pHmetro marca Orion modelo 410A. Para esto, se pesó 10 g de suelo, se le añadió 100 mL de agua destilada y se agito vigorosamente durante 5 min. Las columnas se colocaron a temperatura ambiente para su análisis a los días 7, 14, 20, 28, 35 y 68 días [9, 11, 12, 13].

Para el seguimiento de los procesos de degradación señalados, las muestras fueron analizadas mediante los siguientes ensayos: observación macroscópica, porcentaje de pérdida de masa, variación del pH de la solución amortiguadora y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Para la determinación del porcentaje de masa retenida, se extrajo las muestras colocadas en los frascos de vidrio y en la columna de tierra. Luego, se colocó sobre papel absorbente y se lavó con agua destilada. Posteriormente, se colocó en una estufa a 80°C durante 30 min y se pesó. Este procedimiento se repitió hasta obtener peso constante. Para el cálculo del porcentaje de pérdida de masa, se consideró el peso inicial de la muestra antes y después del proceso de degradación. En tanto, que el pH de la solución amortiguadora se midió en un pHmetro marca Orion modelo 410A; mientras que, para los espectros infrarrojo, se utilizó un Espectrofotómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier FTIR marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 400 [1].

3. Resultados y discusión

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos en el ensayo de MFI realizado al PET, PP y PLA puro y a las mezclas preparadas, con distintas proporciones de PLA. En ella se observa que, el PLA presenta un MFI de 13, que representa una diferencia que supera los nueve puntos en comparación al MFI del PET (de 4) y del PP

Tabla 4: Condiciones empleadas en el proceso de elaboración de láminas de los distintos materiales.

Material	Masa \pm 0,0001 g	$T \pm$ 5 °C	$t_i \pm$ 0,01 s	$\bar{t} \pm$ 0,01 s	$t_f \pm$ 0,01 s	$P_i \pm$ 250 psi	$\bar{P} \pm$ 250 psi	$P_f \pm$ 250 psi
PP	47	210	425,00	14,00	40,00	0	2500	3000
PLA	45	170	180,00	300,00	180,00	0	3000	4000
PET	65	250	300,00	-	900,00	0	-	1500
PP/PLA	47	210	425,00	300,00	180,00	0	3000	4000
PET/PLA	65	250	300,00	-	600,00	0	-	1000

 T : Temperatura. t_i : Tiempo Inicial. \bar{t} : Tiempo Promedio. t_f : Tiempo final. P_i : Presión inicial. \bar{P} : Presión promedio. P_f : Presión final.

Tabla 5: Valores de Índice de Fluidez obtenido para los materiales puros utilizados y de las mezclas preparadas a diferentes proporciones de PLA.

Material	Material puro g/(10 min)	Porcentaje de PLA añadido, %.			
		5,00	10,00	15,00	20,00
PP	0,85 \pm	1,21	1,4 \pm	1,9 \pm	2,8
	0,03	\pm 0,01	0,2	0,2	\pm 0,2
PET	4 \pm 1	18 \pm	12 \pm	13 \pm	21 \pm
		10	3	6	10

El PLA al 100 % obtuvo: (13 \pm 2) g/(10 min).

(de 0,85). Es de resaltar, que algunos autores señalan que el MFI está relacionado de manera inversa con el peso molecular del polímero, por lo que estos resultados indican que el PLA posee un peso molecular bajo en comparación con el PET y PP. Esto puede estar relacionado a la naturaleza del PLA, el cual es un polímero biodegradable de fuentes naturales, mientras que el PET y PP, son polímeros derivados del petróleo y sus cadenas moleculares son de gran tamaño [14]. En tanto, que otros autores indican, que es una ventaja que un polímero posea un peso molecular bajo, ya que esto favorece el proceso de degradación que puede transformar a estos materiales en otros componentes de bajo peso molecular, tales como: dióxido de carbono, humus, derivados de los ácidos carboxílicos, entre otros [6].

Ahora bien, se puede observar que la incorporación del PLA al PP genera valores de MFI superiores que al del polímero sintético. Esta circunstancia se encuentra asociada a que

las propiedades resultantes en las muestras son productos de ambos componentes en las mezclas, por lo tanto al aumentar el porcentaje de PLA, el índice de fluidez se incrementa. Esta misma analogía puede aplicarse para el peso molecular en las mezclas, en donde la presencia del PLA reduce aparentemente esta propiedad, ocasionando que sea susceptibles a procesos de degradación que provocan el acortamiento en las cadenas poliméricas resultantes [15].

En tanto, que al incorporar PLA al PET se observa similar comportamiento que en las mezclas PP/PLA, con excepción a las muestras con un 5 % de PLA, donde existe una discrepancia con lo antes mencionado, ya que se observa que el MFI es mayor en esta proporción en comparación a los otros porcentajes de PLA agregados, salvo al correspondiente con el 20 % de PLA. La causa de esto, pudo ser ocasionada a la distribución de las partículas del PLA; y al someterla a altas temperaturas, se alcanzó la fundición de las zonas en la que se agrupó el PLA, con baja cantidad de PET, por lo que se obtuvo un mayor índice de fluidez [16]. Los resultados obtenidos indican que existen diferencias significativas en los valores del índice de fluidez en las mezclas de PP/PLA y PET/PLA preparadas. Por lo, que se consideró las mezclas con 20 % de PLA para llevar a cabo los procesos de degradación [7].

Durante el desarrollo de los procesos de degradación aplicados se observó que el PLA se fue opacando al paso de los días. Perdiendo su apariencia transparente inicial hasta alcanzar un

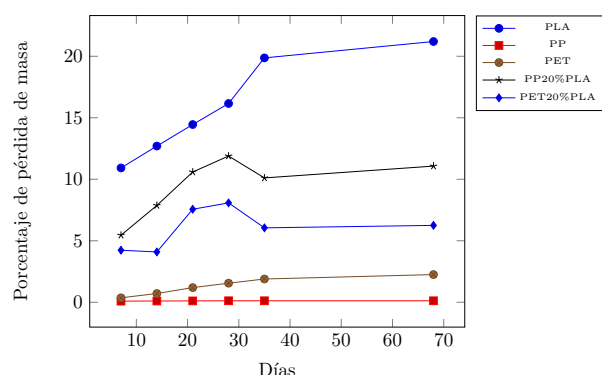


Figura 1: Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de degradación hidrolítica.

aspecto blanquecino al final de ambos procesos. La opacidad del PLA puede ser por la formación de agujeros en la muestra durante la degradación o por la evolución en la cristalinidad de la matriz polimérica [9]. Sin embargo, la apariencia física es similar en ambos procesos. Por lo que, a simple vista no se puede inferir que medio está degradando con mayor intensidad al PLA. En cuanto al PP y PET se observó que el aspecto físico de las muestras no varió durante ambos procesos. Por lo que, es anticipado señalar que las muestras no fueron degradadas. En relación a las mezclas de PP/20 %PLA se observó en ambos procesos una menor opacidad que la observado en el PLA puro. En tanto que, para la mezcla PET/20 %PLA no se observó ningún cambio en su aspecto físico. En virtud de lo anterior, se establece que mediante observaciones macroscópicas no se puede evidenciar si los muestras son degradadas por los procesos en estudios.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en el porcentaje de pérdida de masa ($\%P_m$) durante los procesos de degradación. En ella, se evidencia una disminución de masa de las muestras analizadas a lo largo del periodo de estudio. En la Figura 1 y en la Figura 2 se muestran las tendencias obtenidas en el proceso de degradación hidrolítica y de biodegradación respectivamente.

En la Figura 1 se observa que la pérdida de masa en el PP fue constante y poco significativa, con apenas 0,12 % de pérdida durante el tiempo de

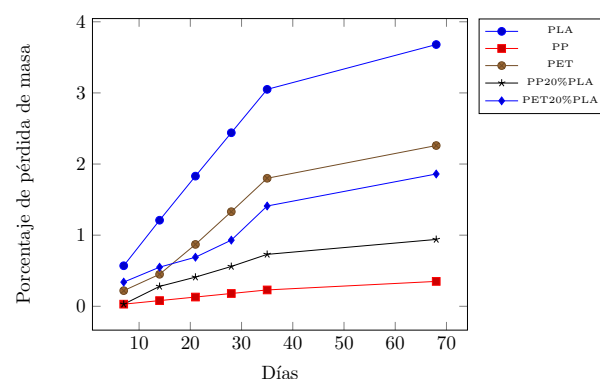


Figura 2: Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los materiales durante el proceso de biodegradación.

degradación. En tanto que, en el PET se obtuvo que la pérdida de masa se incrementó levemente de 0,36 % desde el día 7, hasta 2,25 % al final del proceso. El PLA puro fue el material que presentó una mayor pérdida de masa con 21,20 %. Estos resultados, indican que el PP y PET tienen buena resistencia química y son capaces de soportar las condiciones de hidrólisis por ser materiales termoplásticos, mientras que el PLA por tener enlaces del tipo éster, hidrolíticamente inestables, reúne las características adecuadas degradarse mediante el proceso de hidrólisis [6, 9]. Es de resaltar, que el PET posee grupo éster tal como el PLA. Sin embargo, su bajo índice de fluidez (asociado a un alto peso molecular) evita que se degrade como lo hace el PLA, el cual posee un alto índice de fluidez que facilita su degradación. Ahora bien, en la mezcla de PP/20 %PLA se obtuvo una pérdida de masa de 11,07 % al final del proceso, mientras que en la muestra de PET/20 %PLA de 6,06 %. Estos valores pueden estar asociado a las interacciones que ocurren entre los polímeros. Es de suponer, que la poca afinidad que debe existir entre el PP y el PLA ocasione una mayor pérdida de masa que en la mezcla de PET y PLA donde las interacciones entre los polímeros es mayor debido a la presencia del grupo éster en ambos compuestos.

En la Figura 2 se observa que el porcentaje de pérdida de masa de las muestras sometidas al proceso de biodegradación no supera el 4 %. El PLA con 3,68 % fue el material con la mayor pérdida de masa durante el periodo

Tabla 6: Porcentaje de pérdida de masa ($\%P_m$) durante los procesos de degradación.

Material	Día del proceso de Degradación Hidrolítica						Día del proceso de Biodegradación					
	7	14	21	28	35	68	7	14	21	28	35	68
PLA	10,92	12,70	14,45	16,16	19,87	21,20	0,57	1,21	1,83	2,44	3,05	3,68
PP	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,03	0,08	0,13	0,18	0,23	0,35
PET	0,36	0,71	1,19	1,55	1,89	2,25	0,22	0,45	0,87	1,33	1,80	2,26
PP/20 %PLA	5,45	7,87	10,59	11,89	10,11	11,07	0,03	0,28	0,41	0,56	0,73	0,94
PET/20 %PLA	4,23	4,09	7,56	8,08	6,05	6,25	0,34	0,55	0,69	0,93	1,41	1,86

 $\%P_m \pm 0,01$

de biodegradación, mientras que en el PET se obtuvo 2,26 % y en el PP 0,38 %. Esto puede atribuirse a que los microorganismos colonizan la superficie del PLA y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero. En tanto que, en el PET y PP, por ser polímeros sintéticos son resistentes a la degradación biológica, puesto que los microorganismos no son capaces de romper los enlaces C–C; y el carácter hidrofóbico, inhibe la actividad enzimática [7, 8, 20]. Ahora bien, en la mezcla de PP/20 %PLA se obtuvo una pérdida de masa de 0,94 % al final del proceso, lo que indica que la inclusión de PLA al PP, no acelera significativamente el proceso de biodegradación. En tanto que, en la muestra de PET/20 %PLA la pérdida de masa fue 1,86 %, lo que representa que la incorporación de PLA al PET, disminuye la pérdida de masa durante el proceso de biodegradación, debido a las interacciones existentes entre los polímeros que inhiben la actividad enzimática.

En la Figura 3 se presenta la variación del pH de la solución amortiguadora en el proceso de degradación hidrolítica. En ella, se observa que el pH de las soluciones al final del proceso es menor que el pH inicial, el cual fue de 10,54. Esto se debe, a que en la degradación hidrolítica se liberan especies de bajo peso molecular de naturaleza ácida [9, 17]. Ahora bien, el pH de la solución con las muestras de PET disminuyó a 10,25 esto pone en evidencia la resistencia química del polímero debido a los grupos funcionales que se encuentra en su cadena carbonada [6]. Por su parte, en la solución con PP se obtuvo un pH de 10,20. Esta disminución es consecuencia del carácter no higroscópico del PP, que hace que la

solución alcalina solo esté en contacto superficial con el PP. Además, de la estructura química del PP con enlaces de carbono (–C–C–) que evitan que la degradación hidrolítica se lleve a cabo. En tanto, que en la solución con PLA se obtuvo la mayor disminución de pH con 8,89 lo que indica que las cadenas de PLA fueron atacadas hidrolíticamente facilitando la ruptura de las cadenas y aumentando la posibilidad de liberar mayor cantidad de grupos ácidos al medio [17]. En cuanto, a las soluciones con las muestras PP/20 %PLA y PET/20 %PLA el pH fue de 9,48 y 9,55 respectivamente. Esto se encuentra en correspondencia a lo señalado anteriormente referente a las interacciones que se generan entre el PLA con el PP y el PET en cada mezcla, que hacen que el ataque hidrolítico sea mayor en el PP que en el PET.

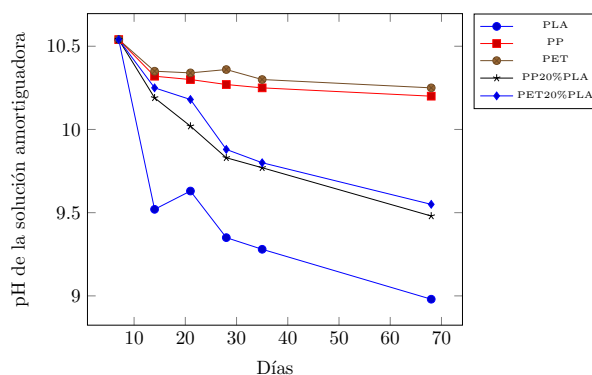


Figura 3: Variación del pH de la solución amortiguadora durante el proceso de degradación hidrolítica.

En la Figura 4, se muestra los espectros infrarrojos de la solución amortiguadora utilizada en la degradación hidrolítica del PET, PP, PLA, PP/20 %PLA y PET/20 %PLA, tanto al inicio del

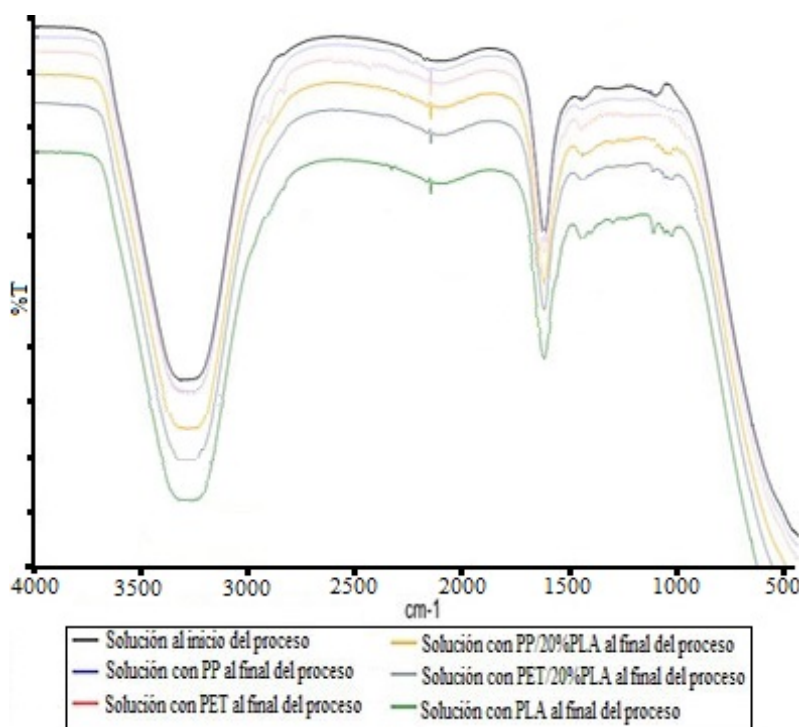


Figura 4: Espectro Infrarrojo de la solución amortiguadora utilizada en el proceso de degradación hidrolítica.

proceso como al final del mismo. En ella, se puede observar la banda característica del grupo oxidrilo ($-\text{OH}$) en 3294 cm^{-1} , cuyo pico es mayor al resto, debido a los puentes de hidrógenos que están presentes. Seguidamente en la banda 2930 cm^{-1} , correspondiente a las soluciones amortiguadoras del PET y PLA, se mostró la presencia de los enlaces C-H de hibridación sp^3 , ya que absorben frecuencia justo por debajo de 3000 cm^{-1} .

En este sentido, se observa en 1637 cm^{-1} un pico en común para todas las soluciones. Esto es característico de la solución de amoníaco que posee adicionalmente un pico en las bandas 3444 cm^{-1} y 3337 cm^{-1} , los cuales se aprecian en el espectro debido al solapamiento de bandas que puede ocurrir entre 3600 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} , por motivo de las interacciones de puentes de hidrógenos que se encuentra en la solución. Además, se obtuvo un pico entre 1453 cm^{-1} - 1461 cm^{-1} producto de los iones amonio (NH_4^+) del cloruro de amonio presente en la solución; Para valores altos de pH, este grupo funcional se aprecia en este rango. Posteriormente en 1129 cm^{-1} se aprecia la formación de un pico a medida que la sustancia

es más susceptible a degradarse hidrológicamente, atenuándose en la solución amortiguadora que estuvo en contacto con el PLA. Esta banda es debido a la tensión en el enlace C-O. Por último, se evidencia que en 1038 cm^{-1} aparece la banda característica de las trazas del grupo carboxilo ($-\text{COOH}$) [18].

En la Figura 5 se presenta el espectro infrarrojo realizado al PP, PET y PLA al inicio del proceso (día 0) y al final de los procesos de degradación utilizados (día 68). En ella, se observa que los tres espectros del PP (a, b y c) poseen las bandas características del PP; 4 picos entre 2950 cm^{-1} y 2838 cm^{-1} debido a vibraciones de tensión (estiramiento) y las bandas por flexión (doblamiento) a 1455 cm^{-1} , generadas por la cadena carbonada. Esto demuestra que el PP no sufrió ningún cambio significativo en su estructura durante el desarrollo de los procesos de degradación [19].

Por su parte, en el espectro b del PET correspondiente al proceso de biodegradación, se observa la pérdida de los grupos oxidrilos ($-\text{OH}$) aportados por el etilenglicol presente en los

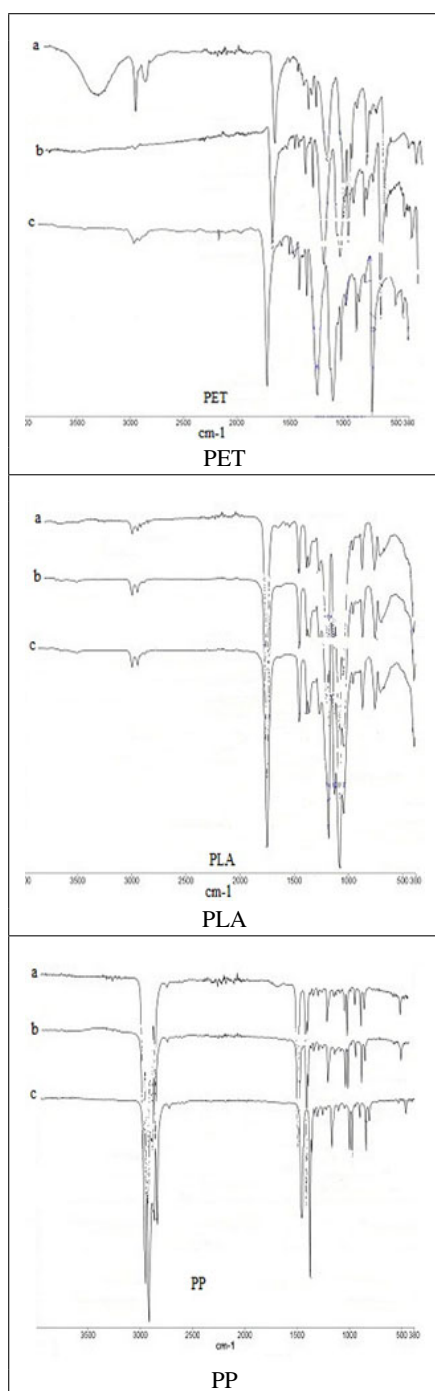


Figura 5: Espectro infrarrojo del PP, PET y PLA. (a) Al inicio del proceso, día 0. (b) Al final del proceso de biodegradación, día 68. (c) Al final del proceso de degradación hidrolítica, día 68.

extremos de la cadena. Esto puede atribuirse al ataque de los microorganismos, que genera como producto dióxido de carbono (CO_2), lo que explica la desaparición del pico presente en la banda 1046 cm^{-1} , correspondiente al C-O. Además, se aprecia

un pico en 2974 cm^{-1} asociado al enlace $-\text{CH}$ proveniente del grupo aromático presente en las cadenas del PET, lo cual es lógico en los procesos de degradación biológica que transforman estos en producto en compuestos de bajo peso molecular [20]. Otro cambio notable es el aumento del pico en la región 1713 cm^{-1} propio al estiramiento del enlace $\text{C}=\text{O}$ del grupo éster. Esto es debido a las rupturas de la cadena que pueden formar grupos finales tipo aldehído y también por los largos segmentos de cadena del PET que pueden unirse al anillo aromático proveniente de dicha escisión, lo que confirma el hecho de que se observen bandas alrededor de 1665 cm^{-1} correspondiente a enlaces de tipo Ar-CO-Ar [20]. Todo esto, corrobora lo antes señalado sobre la biodegradación que experimenta el PET. En cuanto, al espectro c de la Figura 5, referente a la degradación hidrolítica del PET se observan algunos cambios en la estructura del material que demuestran que el PET también es degradado durante este proceso.

Tabla 7: Análisis cuantitativo de los cambios presentados en las bandas características en el estudio de la degradación del PLA.

Proceso (*)	Transmitancia (%T)		
	CH/2946	C=O/1747	CO/1180
Sin degradar	-	66,45	64,19
Biodegradación	94,17	22,78	26,51
Degradación hidrolítica	94,05	21,16	24,44

(*): Grupo funcional / Longitud de onda (cm^{-1})

En relación al PLA, se observa en los espectros b y c de la Figura 5 la aparición de una nueva banda en 2946 cm^{-1} debido a un alargamiento de los grupos C-H [19]. En la Tabla 7, se muestra que para las bandas de los grupos funcionales $\text{C}=\text{O}$ y CO , el porcentaje de transmitancia en ambos procesos disminuye (mayor absorbancia) en comparación al espectro obtenido al inicio del proceso, como se observa para la banda más importante (1747 cm^{-1}) correspondiente al grupo carbonilo. El PLA presentó al inicio una transmitancia de 66,45 %T, y al final del proceso de biodegradación obtuvo una transmitancia de 22,78 %T y en la degradación hidrolítica de 21,16 %T. Esto se debe

a que en la degradación se producen nuevas especies, como ácidos carboxílicos, que ocasionan un aumento de la absorbancia en la banda. Por lo antes mencionado, se corrobora que el PLA fue degradado en ambos procesos, y que la degradación hidrolítica actuó con mayor intensidad sobre el PLA [19].

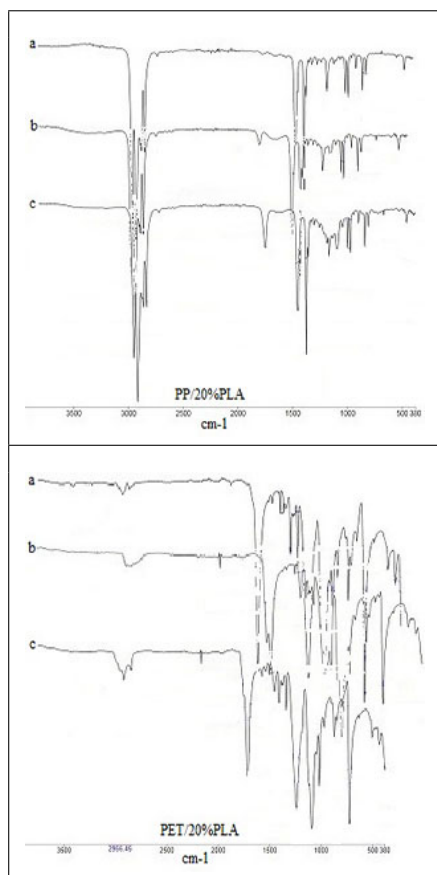


Figura 6: Espectro infrarrojo de las mezclas binarias PP/20 %PLA y PET/20 %PLA. (a) Al inicio del proceso, día 0. (b) Al final del proceso de *biodegradación*, día 68. (c) Al final del proceso de degradación *hidrolítica*, día 68.

En la Figura 6 se presenta el espectro infrarrojo realizado de las mezclas binarias PP/20 %PLA y PET/20 %PLA al inicio del proceso (día 0) y al final de los procesos de degradación utilizados (día 68). En relación a los espectros de la mezcla de PP/20 %PLA se observa que luego de la degradación aparece una banda. En la biodegradación (espectro b de la Figura 6) banda se encuentra en 1756 cm^{-1} ; 95,89 %T, mientras que para la degradación hidrolítica (espectro c),

se observa en 1750 cm^{-1} ; 89,30 %T. Esta banda es característica de los grupos ésteres alifáticos del PLA [19]. En virtud, de estos resultados y en correspondencia con las observaciones obtenidas con los valores de porcentaje de masa retenida se corrobora que la mezcla fue degradada en un margen mayor en el proceso hidrolítico que en la biodegradación.

En cuanto, a los espectro b y c de la Figura 6 de la muestra de PET/20 %PLA se observa un ligero desplazamiento del grupo carbonilo debido a la presencia de interacciones del tipo puentes de hidrogeno que influyen en su desplazamiento. Esta banda del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) se mantiene en $1712\text{--}1713\text{ cm}^{-1}$ por lo que se puede inferir que la energía de activación de la reacción del grupo carbonilo terminal en la cadena del PLA es mucho más baja que en la cadena del PET, debido a la baja concentración del grupo carbonilo perteneciente a la cadena de PLA. En la mezcla se generó entre los polímeros una baja interacción molecular; que ocasiona una mínima degradación en ambos procesos [6].

4. Conclusiones

El aumento del porcentaje de PLA incrementa el índice de fluidez, lo que reduce el peso molecular del material y lo hace susceptibles a la degradación. La pérdida de masa ocasionada en la degradación hidrolítica del PLA fue de 21,20 % y de 3,68 % en la biodegradación. En tanto, que el PP y PET se degradan en una menor proporción que el PLA. En la degradación hidrolítica la mezcla de PP/20 %PLA perdió el 11,07 % de masa y la mezcla de PET/20 %PLA 6,05 %. La espectroscopia infrarrojo por Transformada de Fourier FTIR permite corroborar los cambios estructurales que sufren los materiales durante el proceso de degradación.

Agradecimientos

Al FONACIT por el financiamiento recibido a través del proyecto N° 2011001269, el cual permitió sufragar parte de los costos involucrados para la realización de este trabajo. Al personal

docente y técnico que labora en el Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas, en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo y los que laboran en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia (IUTVAL) por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

5. Referencias

- [1] M. del P. Cabildo Miranda, P. Cornago Ramirez, C. Escolastico Leon, S. Esteban Santos, C. Lopez Garcia, and D. Sanz del Castillo. *Bases químicas del medio ambiente*. UNED, 2013.
- [2] V. Guanipa. Selección de materiales de ingeniería. Venezuela, 2011.
- [3] Lenin Casanova, Maibeth Jiménez, Víctor Zamora, and Jhonny Medina. Fabricación de bloques huecos de concretos con mezclas poliméricas a base de policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS) reciclado. *Ingeniería y Sociedad UC*, 12(1):23–30, 2017.
- [4] PlasticsEurope. Plásticos - situación en 2017. Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa. Informe Técnico, PlasticsEurope, 2018.
- [5] Magda Elva Perales Castro. Modificación estructural del polietiléntereftalato con ácido poliláctico. Síntesis de polímeros biodegradables. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.
- [6] Liliana Serna, Aída Rodríguez de S., and Fred Albán. Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 5(1):16–26, 2011.
- [7] Omar Maldonado and Yenifer Roche. Evaluación de la degradación hidrolítica y la biodegradación de mezclas binarias con ácido poliláctico (pla) y diferentes tipos de residuos plásticos. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2017.
- [8] COVENIN 1769-81, Frutas tomas de muestras. COVENIN, 1981.
- [9] Edgardo Figueira Maldonado. Degradación hidrolítica a diferentes pH de un material compuesto poli(ácido láctico)/quitosano. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2008.
- [10] ASTM D 1238 - 13(2013), Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer, 2013.
- [11] V. T. Santana, S. P. C. Goncalves, J. A. M. Agnelli, and S. M. Martins-Franchetti. Biodegradation of a polylactic acid/polyvinyl chloride blend in soil. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(1):536–540, 2012.
- [12] Elena Ramos Vásquez and Doris Zúñiga Dávila. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología aplicada*, 7(1-2):123–130, 2008.
- [13] Wilmar Andrés Botía Diaz. Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo. Trabajo Especial de Grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2015.
- [14] Sasha Solórzano O. Estudio de las propiedades mecánicas y reológicas de nanocompuestos de polipropileno y sus mezclas. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2007.
- [15] Ricardo Mendoza Quiroga and Jorge A. Medina Perilla. Propiedades adhesivas de mezclas de almidón de yuca termoplastificado y ácido poliláctico (tps/pla). *INGE CUC*, 7(1):217–228, 2011.
- [16] Gustavo Luengo Rico. *Mezclas de polímeros. Estudio de su compatibilidad*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, España, 1993.
- [17] Marco A. Sabino, Dayanara Morales, Gladys Ronca, and José Luis Feijoo. Estudio de la degradación hidrolítica de un copolímero biodegradable. *Acta Científica Venezolana*, 54:18–27, 2003.
- [18] J. E. Rodríguez-Páez, C. Villaquirán, and J. Cobo. Estudio de la formación de los complejos intermedios durante la síntesis de alumina. *Materials Research*, 4(4):255–264, 2001.
- [19] Ana Karina Rodríguez Atencio. Estudio de la degradación de compuestos de poli(ácido láctico) con sulfato de calcio y quitosano. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2009.
- [20] Nohemí Magda Araque Pacheco. Estudio y caracterización de la degradación hidrolítica y en compostaje de PET virgen y reciclado. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2008.

Catalysts sulphide Fe-Mo supported in Zn-hydroxyapatites and its application in thiophene hydrodesulfurization reaction

Carlos Felipe Linares^a, Edith Figueredo^{*,a,b} y Freddy Ocanto^a

^aUnidad de Síntesis de Materiales y Metales de Transición (SIMMET), Departamento de Química, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bLaboratorio de Calidad Ambiental, Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- Hydroxyapatites with variable Ca-Zn amounts were synthesized as a new support of hydrotreating catalysts. Then, these supports were impregnated with Mo, as active phase, and Fe as promoter. After that, solids were calcined at 400 °C. These catalytic precursors were characterized by different physicochemical techniques such as: X-ray diffraction (XRD), temperature programmed reduction (TPR), Fourier transformed infrared spectroscopy (FTIR) and specific area measurements by BET method. Finally, these catalysts were employed in the reaction of hydrodesulfurization of thiophene. Results showed low catalytic activity values possibly due to the low presence of the octahedral molybdate or these solids. Identified phases by XRD were: ferrimolybdate ($\text{Fe}_2\text{Mo}_{3.9}\text{O}_{14.7}\cdot 10.5\text{H}_2\text{O}$), ferric molybdate ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$), calcium zinc phosphate ($\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$) and calcium molybdate or scheelite (CaMoO_4).

Keywords: hydrotreating; hydroxyapatites; thiophene.

Catalizadores sulfurados Fe-Mo soportados en Zn-hidroxiapatitas y su aplicación en la reacción de hidrodesulfuración de tiofeno

Resumen.- Se sintetizaron hidroxiapatitas con contenido Ca-Zn variable, como un nuevo soporte de catalizadores de hidrotratamiento. Estos soportes, luego fueron impregnados con Mo, como fase activa, y Fe, como promotor. Posteriormente los sólidos fueron calcinados a 400 °C. Estos precursores catalíticos fueron caracterizados por técnicas fisicoquímicas tales como: difracción de rayos X (DRX), reducción a temperatura programada (TPR), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y medidas de área específica por el método BET. Finalmente, estos catalizadores fueron empleados en la reacción de hidrodesulfuración de tiofeno, obteniéndose valores bajos de actividad catalítica, posiblemente debido a la poca presencia de molibdeno octaédrico en dichos sólidos. Las fases identificadas por DRX fueron: ferrimolibdato ($\text{Fe}_2\text{Mo}_{3.9}\text{O}_{14.7}\cdot 10.5\text{H}_2\text{O}$), molibdato férrico ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$), fosfato de calcio y cinc ($\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$) y Molibdato de calcio o scheelita (CaMoO_4).

Palabras claves: hidrotratamiento; hidroxiapatita; tiofeno.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

Las reacciones de hidrotratamiento suelen llevarse a cabo, generalmente, en presencia de catalizadores Co-Mo o Ni-Mo soportados en alúmina para la remoción de heteroátomos provenientes de compuestos orgánicos presentes en el crudo. Con la finalidad de proteger el ambiente,

muchos países han adoptado normas y leyes que regulan la cantidad de heteroelementos permitidos en las fracciones del petróleo así como sus consecuentes emisiones a partir de la combustión [1]. Actualmente, los trabajos en hidrotratamiento están orientados a modificar el soporte utilizado tradicionalmente (Al_2O_3) o sustituirlo por otros [2], debido a que son poco efectivos para las cargas de petróleo procesadas. Así, nuevos materiales mesoporosos [3], carbones, hidrotalcitas [4] e hidroxiapatitas son prometedores de resultados interesantes.

* Autor para correspondencia:

Correo-e: emfigueredo@gmail.com (Edith Figueredo)

En este sentido, una alternativa la

constituye el uso de hidroxiapatita fosfocálcica ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), perteneciente a la familia cristalográfica de las apatitas, compuestas por isomorfos que poseen una misma estructura hexagonal. Esta investigación plantea el uso de hidroxiapatita como soporte catalítico, promovidas con Fe y Mo como fases activas; anteriormente se pensaba que el hierro mostraba poca participación como promotor; sin embargo, estudios realizados determinaron que los sulfuros de hierro son fases activas en procesos de hidrodesmetalización de crudos pesados [5]. Por otra parte un efecto sinérgico fue observado en reacciones de HDT; cuando el sulfuro de niobio era promovido con hierro [6].

En estudios previos la hidroxiapatita fue estudiada como soporte catalítico en catalizadores sulfurados CoMo, y NiMo para la reacción de HDS de tiofeno, los resultados arrojaron que el catalizador CoMo/Hap (0% Zn) resultó ser más activo en comparación con el catalizador comercial CoMo/ γ -alúmina [7]; mientras que en catalizadores sulfurados NiMo, se encontró que presentaron mayor actividad los que contenían cantidad variable en cinc que el catalizador comercial [8].

El propósito de esta investigación fue sintetizar hidroxiapatitas de contenido Ca-Zn variable como un nuevo soporte de catalizadores de reacciones de hidrodesulfuración, con el fin de mejorar el uso de los catalizadores convencionales soportados en γ -alúmina.

2. Materiales y métodos

Síntesis del soporte utilizando el método de coprecipitación

Los soportes de hidroxiapatita sustituida por cinc fueron sintetizados por el método propuesto por Miyaji [9]. Se preparó una disolución acuosa de fósforo [P] 0,06 M, a partir del fosfato ácido de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) (disolución A). Después, una disolución acuosa $[\text{Ca} + \text{Zn}] = 0,1$ M (disolución B) fue preparada disolviendo acetato de calcio dihidratado ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{H}_2\text{O}$) y acetato de cinc dihidratado ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{H}_2\text{O}$) en agua destilada, para las siguientes composiciones

porcentuales molares en Zn: 0, 3, 6, 9, 12 y 15. Luego 100 mL de la disolución B fueron añadidos a 100 mL de la disolución A con agitación vigorosa. El pH de la disolución fue ajustado a 8 con hidróxido de amonio (NH_4OH) 1 M y la disolución fue mantenida con agitación constante a una temperatura de 90 °C por 5 h. Por último, se filtró al vacío y el producto se secó en una estufa a 100 °C por 10 h. Los soportes sintetizados fueron impregnados con las sales de hierro [sulfato ferroso de amonio hexahidratado $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{FeSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Fisher Scientific, 99 %] y heptamolibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Riedel de Haën, 99 %] por el método de humedad incipiente con una relación atómica Fe: Mo (1: 3), y una concentración de trióxido de molibdeno MoO_3 del 15 %. Los sólidos secos se calcinaron en una atmósfera de aire a 400 °C por 4 h.

Caracterización de los sólidos

Los sólidos sintetizados, y los precursores catalíticos fueron caracterizados mediante las técnicas de: difracción de rayos X de polvo (Siemens CuK (α): 1,54060 Å), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) utilizando KBr como agente dispersante, los espectros fueron registrados en un espectrómetro Shimadzu 8400 S, en el intervalo de 4000-500 cm^{-1} , superficie específica (Quantachrome) usando N_2 como gas adsorbente y reducción a temperatura programada (TPD/TPR Chemisorb Analyzer 2900) bajo una corriente gaseosa de H_2/He al 10 % en H_2 , usando un flujo de 50 cm^3/min .

Pruebas de actividad catalítica

Los precursores catalíticos fueron sometidos a la reacción de hidrodesulfuración de tiofeno. Previo a la reacción, 200 mg del sólido fueron colocados en un reactor de vidrio y sulfurados por 2 h utilizando CS_2 /heptano (10 mL/h) como agente sulfurante al 10 % v/v junto con una corriente de H_2 (100 mL/min) a 400 °C. Luego de sulfurados los sólidos, la temperatura de reacción fue ajustada a 280 °C. Se fijó un flujo de H_2 en 0,25 mL/s y se pasó por el reactor una carga de tiofeno/heptano al 10 % m/m en tiofeno a una velocidad de 1

mL/h. Los productos de reacción se inyectaron en forma gaseosa en un cromatógrafo de gases Varian 3800 (AutoSystem XL) equipado con detector FID usando una columna capilar (5 % bifenilo y 95 % de dimetilsilano) de 30 m de longitud y un diámetro interno de 0,25 mm.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de los soportes sintetizados y de los precursores catalíticos

Difracción de rayos X (DRX). La Figura 1 señala los difractogramas de las muestras de las Zn-hidroxiapatitas sintetizadas. Estos difractogramas muestran picos intensos correspondiente a los planos: (211), (002), (132), (300), (222) y (213) los cuales son representativos de las estructuras hidroxiapatitas (JCDPS 09-0432) [9]. No se identificaron otras fases adicionales. Adicionalmente y en forma general, a medida que el contenido de Zn aumenta, la intensidad de los picos disminuye y comienza a hacerse más anchos. Una excepción, lo constituye el difractograma con un 15 % Zn, el cual resultó ligeramente mayor que el difractograma con 12 % Zn, lo cual pudiese deberse a errores experimentales.

Por otro lado, la Figura 2 muestra los difractogramas correspondiente a las muestras seleccionadas de los precursores catalíticos: FeMo/Hap(0 %Zn), FeMo/Hap(6 %Zn) y FeMo/Hap(15 %Zn) calcinadas a 400 °C. Para la muestra FeMo/Hap (0 %Zn), se identificaron las siguientes fases: hidroxiapatita, scheelita CaMoO_4 (JPDCS 77-2238), ferrimolibdito $\text{Fe}_2\text{Mo}_3.9\text{O}_{14.7}10.5\text{H}_2\text{O}$ (JPDCS 15-0289) y óxido de hierro y molibdeno $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ (JPDCS 20-0526). La scheelita se forma por la reacción a alta temperatura entre el Ca, que migra fuera de la estructura de la hidroxiapatita, y el heptamolibdato de amonio impregnado.

La fase ferrimolibdito, así como la fase óxido de hierro y molibdeno, posiblemente se formaron por la reacción a altas temperaturas entre el heptamolibdato de amonio y la sal de Mohr utilizadas en el proceso de impregnación de los sólidos. Para las muestras con contenido de cinc se identificó, adicionalmente, la fase fosfato de calcio y cinc $\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$ (JPDCS 48-1196) [8].

La fase ferrimolibdito, así como la fase óxido de hierro y molibdeno, posiblemente se formaron por la reacción a altas temperaturas entre el heptamolibdato de amonio y la sal de Mohr utilizadas en el proceso de impregnación de los sólidos. Para las muestras con contenido de cinc se identificó, adicionalmente, la fase fosfato de calcio y cinc $\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$ (JPDCS 48-1196) [8].

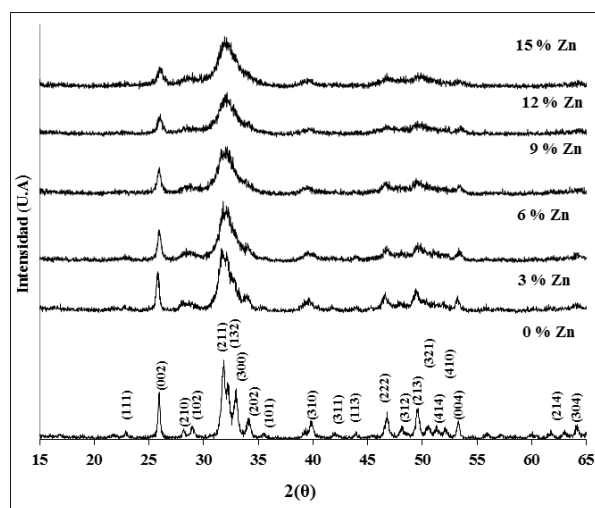
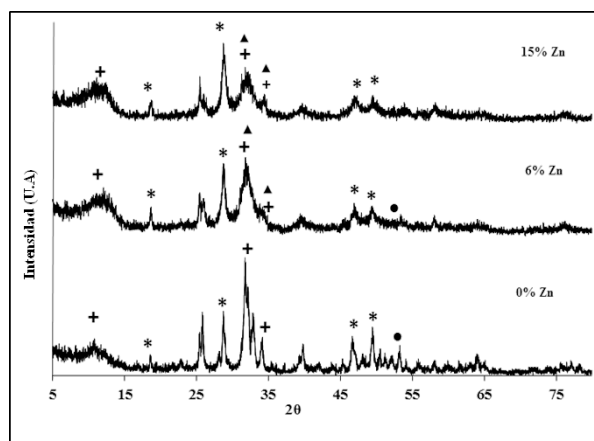


Figura 1: Difractogramas de las muestras sintetizadas para diferentes composiciones molares de Zn.



- *: Fase scheelita CaMoO_4 .
- +: Fase ferrimolibdito $\text{Fe}_2\text{Mo}_{3.9}\text{O}_{14.7}10.5\text{H}_2\text{O}$.
- : Fase óxido de hierro y molibdeno $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$.
- ▲: Fase fosfato de calcio y cinc $\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$

Figura 2: Difractogramas de las muestras FeMo/Zn-hidroxiapatitas calcinadas a 400 °C.

La fase ferrimolibdito, así como la fase óxido de hierro y molibdeno, posiblemente se formaron

por la reacción a altas temperaturas entre el heptamolibdato de amonio y la sal de Mohr utilizadas en el proceso de impregnación de los sólidos. Para las muestras con contenido de cinc se identificó, adicionalmente, la fase fosfato de calcio y cinc $\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$ (JPDCS 48-1196) [8].

En cuanto al tamaño del cristal, en la Tabla 1 se observa, que el soporte tipo Hap 0% Zn, presentó el mayor tamaño granulométrico de cristal en comparación con los demás soportes. A medida que aumenta el contenido de cinc en el sólido, se observa una disminución del tamaño granulométrico de cristal, para los soportes 6, 9 y 12 % Zn. Este resultado es concordante con lo observado en los difractogramas de estas muestras, en donde se aprecia que la intensidad de los picos disminuye y comienzan a hacerse más anchos, cuando las muestras contienen cinc. Según Miyaji [9], el tamaño granulométrico de los cristallitos es más pequeño a medida que el contenido de Zn incrementa.

En el caso, de la hidroxiapatita con un 15 % Zn, el tamaño granulométrico fue superior, inclusive a la hidroxiapatita con 6 % Zn, siendo concordante con lo observado en los patrones de DRX. No tenemos una explicación clara para este resultado, pero errores experimentales pudiese estar involucrados.

Tabla 1: Tamaño de los cristales de los soportes sintetizados y de los precursores calcinados a 400 °C usando la ecuación de Scherrer.

Hap	Tamaño de los cristales ($\pm 0,1$) (nm)	
	Hidroxiapatita (Hap) sintetizada	FeMo/Hap calcinadas a 400 °C
0 % Zn	19,4	12,0
6 % Zn	9,2	7,8
9 % Zn	9,0	5,3
12 % Zn	8,4	4,9
15 % Zn	10,2	5,0

Para las muestras calcinadas, se puede observar la disminución del tamaño de los cristales a medida que aumenta el contenido de cinc en el sólido. Este resultado es concordante con lo observado en los difractogramas de rayos X del soporte de estas muestras, en donde se aprecia que las señales se

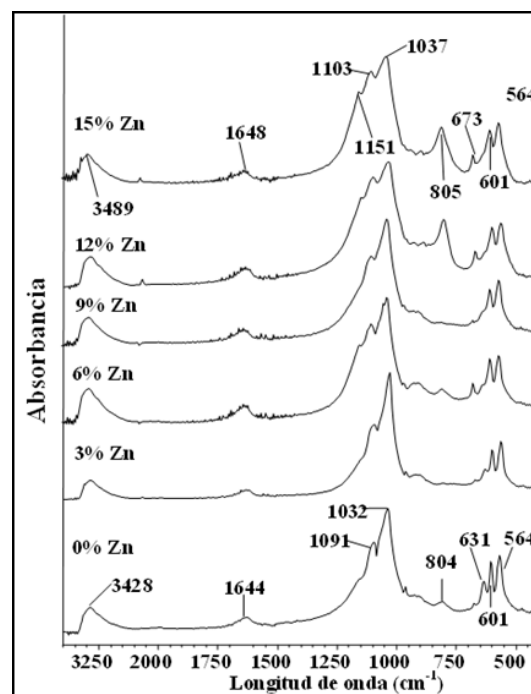


Figura 3: Espectros FTIR de las muestras FeMo/Zn-hidroxiapatitas calcinadas.

hacen más anchas al incrementarse el contenido de cinc en las mismas.

Espectroscopia de infrarrojo (IR-FT). En la Figura 3 se muestran las bandas de PO_4^{3-} alrededor de 1101, 1032, y 564 cm^{-1} . Estas bandas corresponden a los modos de vibración μ_3 y μ_4 de este anión [10]. Además, se observa la banda a 805 cm^{-1} asociada a la fase scheelita [11]. Esta fase fue también determinada mediante DRX. La intensidad de esta banda se incrementa ligeramente a medida que incrementa el contenido de Zn. Esta fase de CaMoO_4 pudiese disminuir el contenido de especies de Mo octaédrico útiles para la reacción de HDS debido a su difícil reducción. También se observan bandas alrededor de 632, 3420 y 1600 cm^{-1} para todas las muestras sintetizadas y calcinadas a 400 °C, las cuales se corresponden con las moléculas de agua adsorbida o los grupos OH^- de la hidroxiapatita.

La banda a 1091 cm^{-1} puede ser adjudicada a los aniones HPO_4^{2-} , los cuales, generalmente pueden generar una banda menos intensa a 875 cm^{-1} que pudiese estar solapada con la banda a 916 cm^{-1} adjudicada a los aniones fosfatos [11, 12].

Superficie específica. En la Tabla 2, se reportan los datos de la superficie específica, en general estos resultados arrojaron un aumento de la superficie específica a medida que la fracción de Zn se incrementa en la estructura de la hidroxiapatita, hasta alcanzar un máximo en la superficie específica para un contenido de Zn de 6 % molar; por consiguiente debería tener una mayor actividad en las reacciones de HDS.

Luego la superficie específica tiende a estabilizarse a mayores contenidos de Zn. Estos resultados parecieran indicar que el tamaño de los cristales se hace más pequeño a medida que se incrementa el contenido de Zn hasta un cierto contenido en Zn, tal como se confirmó mediante los resultados obtenidos por DRX e FT-IR.

Tabla 2: Área específica por el método BET, obtenida para las muestras FeMo/Zn-hidroxiapatitas calcinadas a 400 °C.

Sólidos	Área específica por el método BET ($\pm 1 \text{ m}^2/\text{g}$)
FeMo/Hap(0 % Zn)	75
FeMo/Hap (3 % Zn)	74
FeMo/Hap(6 % Zn)	106
FeMo/Hap (9 % Zn)	95
FeMo/Hap (12 % Zn)	85
FeMo/Hap (15 % Zn)	99

Perfiles de reducción a temperatura programada (TPR). En la Figura 4, se presenta el resultado de los análisis de reducción a temperatura programada de los precursores catalíticos FeMo/Zn-hidroxiapatitas calcinados a 400 °C. En todos los perfiles fue posible observar dos señales perfectamente distinguibles: una señal “A” que aparece entre 500 y 700 °C, y otra señal “B” que aparece entre 700 y 1100 °C.

Estas señales están relacionadas con las especies de molibdeno reducibles. Según Lee, [13] el primer pico puede ser asignado a las especies octaédricas de Mo reducible, y el segundo pico, puede ser adjudicado a especies tetraédricas de Mo más difíciles de reducir. No se descarta, que este último pico esté acompañado por especies de fosfato las cuales pueden ser también reducibles

a fosfito [14]. Para el precursor FeMo/alúmina, se destacan estos picos bien pronunciados: uno bien definido y con un alto consumo de H_2 a 500 °C y uno ancho a 733 °C. Se observa que el pico correspondiente a las especies octaédricas presentó mayor consumo de hidrógeno que aquel señalado para las especies tetraédricas. La señal “A” identificada para el precursor soportado en alúmina comercial se redujo a temperaturas menores que aquellos mostrados en la señal “B”, el cual se redujo a temperaturas muy similares a los observados en FeMo/alúmina. La razón de que estas señales aparezcan a temperaturas menores en la alúmina, es debido a las interacciones metal-soporte más débiles que aquellas observadas en la hidroxiapatita. Para los precursores FeMo/Zn-hidroxiapatitas, la señal “A” se observó entre 570 y 700 °C y la señal “B” entre 750 y 1100 °C. A medida que aumenta el contenido de cinc, la temperatura de reducción de la señal “A”, correspondiente al molibdeno octaédrico, responsable de la actividad catalítica en los catalizadores de HDS, es desplazada a temperaturas mayores haciéndolo más difícil de reducir.

Pruebas catalíticas. En la Figura 5 se muestra la actividad específica (mol de tiofeno convertido/h*g) obtenida una vez alcanzado el estado estacionario del sistema en estudio. Se observa que el catalizador de 0 % Zn posee la más alta actividad, por otro lado a medida que aumenta el contenido de cinc en la estructura de la hidroxiapatita, la tendencia general es la disminución de la actividad catalítica, a excepción del catalizador de 6 % Zn.

Los resultados reflejan el compromiso entre la superficie específica y la relación entre los sitios de Mo tetraédricos y los octaédricos; así el catalizador con 0 % en cinc, aunque tiene una relación A/B menor, en comparación con el catalizador a 3 %, presenta una mayor actividad.

Hecho que se resalta con el catalizador al 6 %, el cual, aunque presenta una relación A/B cercana a 1, al tener la mayor superficie específica, se refleja en una mayor actividad. Es posible que para este catalizador en particular presente una composición óptima de los componentes

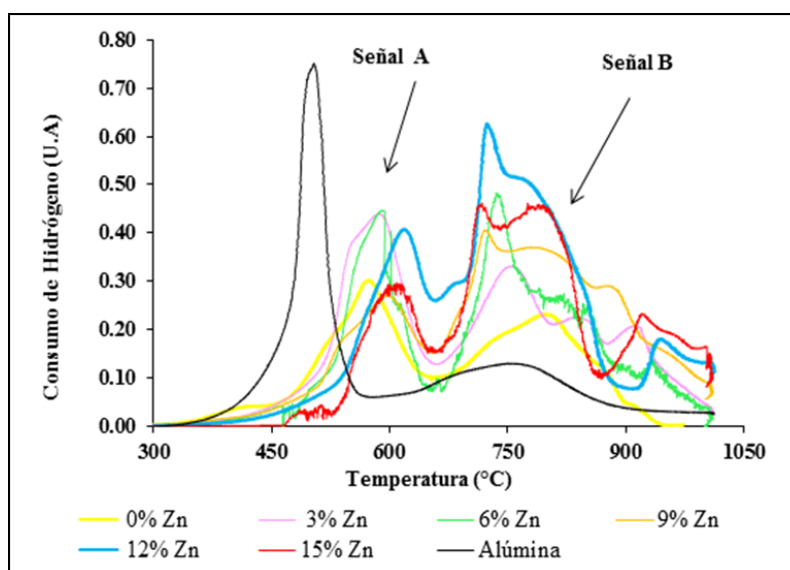


Figura 4: Perfiles de TPR de las muestras FeMo/Zn-hidroxiapatitas calcinadas.

de la mezcla [15]. Luego, y a medida que se incrementó el contenido de Zn, se observa una disminución progresiva de la actividad catalítica debido al aumento de las especies octaédricas del molibdeno. Este comportamiento podría estar relacionado con una mayor proporción de las fases ferrimolibdito $\text{Fe}_2\text{Mo}_{3.9}\text{O}_{14.7}10.5\text{H}_2\text{O}$, óxido de hierro y molibdeno $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$, las cuales disminuyen la concentración de la fase activa, afectando la actividad catalítica en la reacción de HDS de tiofeno.

4. Conclusiones

Los soportes de hidroxiapatita sustituida con cinc desde 0 hasta 15 por ciento molar, fueron posible sintetizarlos con la metodología empleada. Los precursores catalíticos impregnados con la sal de Mo y la sal de Fe, después de la calcinación a 400 °C, mostraron la presencia de las siguientes fases: $\text{Fe}_2\text{Mo}_{3.9}\text{O}_{14.7}10.5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$, $\text{Ca}_{19}\text{Zn}_2(\text{PO}_4)_{14}$ y CaMoO_4 . A medida que se incrementó el contenido de Zn en el soporte, se observó una disminución progresiva de la actividad catalítica. Estos sólidos, resultaron pocos activos a la reacción de HDS de tiofeno estudiada.

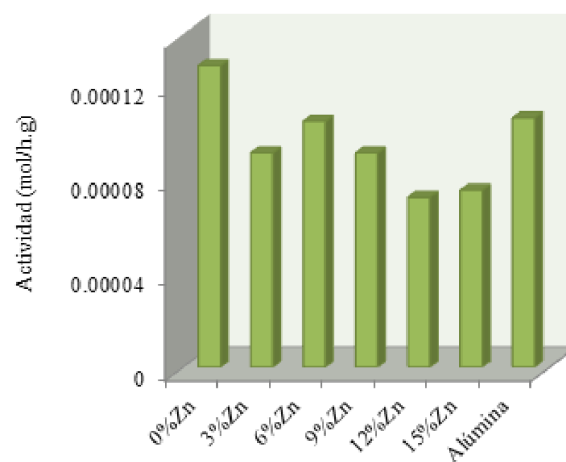


Figura 5: Actividad de los catalizadores FeMo/Zn-hidroxiapatitas en la reacción HDS de tiofeno calcinados a 400°C en función del contenido de Zn.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fonacit PAE N° 2011000797, por el apoyo financiero.

5. Referencias

- [1] Christian Marcilly. Evolution of refining and petrochemicals: what is the place of zeolites. *Oil & gas science and technology*, 56(5):499–514, 2001.
- [2] G. Alvez, R. García, R. Arriagada, and R. Cid. Arcillas pilareadas II. Hidrodesulfuración de tiofeno

- sobre catalizadores Ni, W soportados sobre arcillas pilareadas. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 44(3):337–344, 1999.
- [3] Brenda Ledesma and Andrea Beltramone. *Catalizadores de Ir soportados en materiales mesoporosos. Para reacciones de HDT*. Editorial Académica Española, 2017.
- [4] V. C. Mujica and C. F. Linares. Effect of the synthesis method of Ni-Al hydrotalcites as support of CoMo catalysts in hydrotreatment reactions. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 41(1):41–49, 2018.
- [5] F. Gonzalez-Jimenez, H. Constant, R. Iraldi, E. Jaimes, and M. Rosa-Brussin. Mössbauer study of hydro-demetalization clay catalysts of heavy oils: Role of pyrrhotites. *Hyperfine Interactions*, 28(1-4):927–930, 1986.
- [6] Luis Lippolis and Miguel Ángel Luis. Reacciones de HYD del 2MN, HDS de DBT y competitiva en condiciones de baja severidad empleando sulfuros máscicos mixtos de Fe-Nb no frescos. *Revista Ingeniería UC*, 17(1):61–72, 2010.
- [7] B. García, G. González, F. Ocanto, and C. F. Linares. CoMo/Zn-hydroxyapatites as catalysts for the hydrodesulfurization reaction of thiophene. *Indian Journal of Chemical Technology*, 19(6):403–408, 2012.
- [8] Carlos F. Linares, Edith Figueredo, Domingo Peraza, Gema González, and Freddy Ocanto. Efecto de la temperatura de calcinación en catalizadores NiMo/Zn-hidroxiapatitas en la reacción de hidrodesulfurización de tiofeno. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 34(1):66–75, 2014.
- [9] Fumiaki Miyaji, Yoshiteru Kono, and Yoko Suyama. Formation and structure of zinc-substituted calcium hydroxyapatite. *Materials Research Bulletin*, 40(2):209–220, 2005.
- [10] Ursula Spadavecchia and Gema González. Obtención de hidroxiapatita nanométrica para aplicaciones médicas. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 22(4):37–44, 2007.
- [11] Y. Saih, M. Ait Chaoui, A. Ezzamarty, and M. Lakhdar. Based CoMo sulphided catalysts supported on hydroxyapatite: Dimethyldisulphide (DMDS) hydrogenolysis. *Catalysis Communications*, 2(2):81–87, 2001.
- [12] Ilaria Cacciotti, Alessandra Bianco, Mariangela Lombardi, and Laura Montanaro. Mg-substituted hydroxyapatite nanopowders: synthesis, thermal stability and sintering behaviour. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(14):2969–2978, 2009.
- [13] Jung Joon Lee, Heeyeon Kim, and Sang Heup Moon. Preparation of highly loaded, dispersed MoS_2/Al_2O_3 catalysts for the deep hydrodesulfurization of dibenzothiophenes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 41(1-2):171–180, 2003.
- [14] J. Guerra, J. Brito, G. González, R. Villalba, M. Pagano, and J. Sánchez. Uso catalítico de hidroxiapatitas sustituidas con vanadato y molibdato en hds de tiofeno. In *XXI Simposium Iberoamericano de Catálisis*, Málaga, España, 2008.
- [15] Edith María Figueredo Ruiz. *Hidroxiapatitas Ca-Zn: un nuevo soporte en la reacción de hidrodesulfuración de tiofeno*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2016.

Development of virtual instrumentation applied to telecommunications laboratories using the Red Pitaya board

Giusseppe Perretti, Robert Fernández, Carlos Mejías y Carlos Aponte*

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- A teaching telecommunication lab requires equipment endowment such as spectrum analyzers, impedance analyzers, oscilloscopes, signal generators, function generators, and time-domain reflectometers, which means expensive funding for the universities to invest in these types of equipment. However, thanks to the built-in data-acquisition-and-signal-generation platform called Red Pitayas, it is possible to develop a low-cost workbench, which represents an opportunity for universities that cannot afford large fundings for equipment endowment. The teaching laboratories of the Telecommunication school at the University of Carabobo require workbenches through virtual instrumentation to help the students during the equipment training, achieving an effective way to the issues relate to resource generations, researching, and teaching.

Keywords: instrumentation; virtual; Red Pitaya.

Desarrollo de instrumentación virtual aplicada a laboratorios de telecomunicaciones usando la tarjeta Red Pitaya

Resumen.- Un laboratorio de telecomunicaciones requiere una dotación de equipos de medición tales como el analizador de espectro, analizador de impedancia, osciloscopio, generador de señales, generador de funciones y reflectometría temporal. Para adquirir estos equipos las universidades deben invertir miles de dólares en equipamiento especializado. Gracias a la tarjeta comercial Red Pitaya es posible desarrollar un banco de trabajo con un coste de cientos de dolares lo que representa una oportunidad de ahorrar en la dotación de laboratorios. En el caso de los laboratorios de la Escuela de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, se requiere que los bancos de trabajo desarrollados con instrumentación virtual faciliten el entrenamiento en equipos de medición y que se alcancen de manera eficaz los propósitos relacionados con la generación de recursos, investigación y docencia.

Palabras claves: instrumentación; virtual; Red Pitaya.

Recibido: abril 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

El desarrollo de una variedad de herramientas virtuales que pretenden ser instrumentos flexibles para adaptarse a las necesidades de aprendizaje del estudiante ha beneficiado a carreras como la ingeniería [1]. Entre estas herramientas virtuales que se han creado para facilitar la comprensión

de los fenómenos estudiados en los laboratorios de las distintas ramas de la ingeniería se encuentran: laboratorios remotos, laboratorios virtuales, instrumentación virtual, entre otros [2], donde la instrumentación virtual es la que más se asemeja a los laboratorios tradicionales, ya que está constituida por un software y un hardware, que permiten emular equipos físicos, y además son una solución económica frente a los altos precios de los equipos de medición utilizados en los laboratorios [2]. En este sentido, en el 2001 *National Instrument* define la instrumentación virtual como un sistema de adquisición, procesamiento y presentación de señales físicas desde una computadora a través de

* Autor para correspondencia:

Correo-e: caponte@uc.edu.ve (Carlos Aponte Dezzee)

instrumentos virtuales o interfaces dedicadas.

A medida que evolucionan las tecnologías de información y comunicación (TIC), se presentan mayores posibilidades de que las Universidades puedan crear nuevos contenidos educativos, con el propósito de generar mejores experiencias en las aulas de clases y laboratorios que faciliten los procesos aprendizaje [3]. Sin embargo, ha quedado demostrado que un programa de aprendizaje apoyado en las TIC, debe estar fundamentado con un plan de estrategias pedagógicas que apunten a satisfacer necesidades específicas de aprendizaje en el alumno con el fin de aprovechar al máximo este tipo de herramientas [4, 1].

En la Universidad de Carabobo, específicamente en la escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, se realizaron trabajos para potenciar los módulos básicos de la Red Pitaya y el uso de instrumentación virtual[5, 6], pero no se utilizaban debido a que se requería el desarrollo de equipos adicionales para completar los bancos de trabajo. Adicionalmente no existía un plan definido que incluyera la IV en las diferentes prácticas de laboratorio. Así nace la necesidad de desarrollar nuevo equipamiento en la Red Pitaya y elaborar un material didáctico que sea efectivo para el aprendizaje, lo cual representa un ahorro de miles de dólares en equipamiento y establece las bases para implementar centros de entrenamientos bajo esta metodología en cualquier institución, pública o privada.

2. Metodología

2.1. Elaboración de Instrumentos Virtuales

La Red Pitaya es una tarjeta de instrumentación de bajo costo, diseñada para utilizarse como instrumento de medida y de control. Cuenta con un *textit{System On Chip (SOC) Xilinx Zynq 7010}*, este contiene un procesador de doble núcleo ARM9 que permite ejecutar el sistema operativo Linux, además, el chip contiene una FPGA disponible para realizar el procesamiento digital de señales. Para la adquisición y generación de señales esta incluye ADCs y DACs de 125Msps, permitiendo procesar señales hasta los 50 MHz con una resolución de 14-bit. La interfaz física de la tarjeta cuenta con 2 puertos de entradas y 2 puertos de salidas, todos con

conectores estándar tipo SMA-F, así como también un puerto Ethernet por el cual se puede conectar a una red y acceder al a través de un navegador e interactuar con la tarjeta mediante una interfaz gráfica, así como la mostrada en la Figura 1. En dicha interfaz se puede acceder a las aplicaciones ya precargadas o bien se pueden desarrollar nuevas aplicaciones, como las implementadas en este trabajo, ya que es un sistema de código abierto [7].

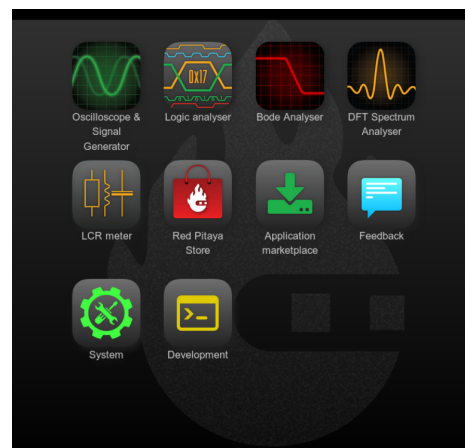


Figura 1: Menú principal de aplicaciones de la Red Pitaya. Fuente: <https://www.redpitaya.com/>

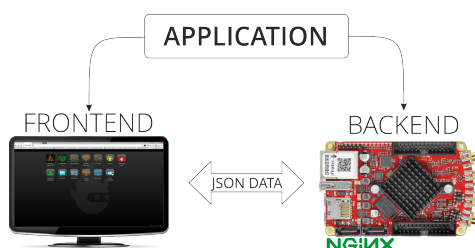


Figura 2: Etapas de una aplicación desarrollada en la plataforma Red Pitaya. Fuente: <https://www.redpitaya.com/>

Las aplicaciones de Red Pitaya están compuestas por 2 etapas, el *Frontend* y el *Backend*, así como se plantea en la Figura 2. Dichas etapas deben ser completadas correctamente para poder ejecutar las aplicaciones desde el navegador. El *Frontend* de la aplicación es todo aquello que el usuario visualiza, en otras palabras, es la interfaz ejecutada desde

el navegador. En ella se muestra la data recibida de la tarjeta, así como también los parámetros que pueden ser manipulados por el usuario, los cuales son necesarios para la configuración del procesamiento y control de datos por parte de la Red Pitaya.

Para el diseño de la interfaz se cuenta con las herramientas de programación que prestan los lenguajes de programación HTML5, CSS y JavaScript, donde HTML5 adecua la disposición de los elementos mostrados en pantalla, CSS agrega el estilo visual de los elementos y JavaScript facilita la creación de aplicaciones rápidas y confiables. Se tomo en cuenta la opinión de los encuestados y la interfaz es lo mas parecida posible al equipo físico.

Por otro lado el *Backend*, a diferencia del *Frontend*, el usuario no tiene acceso a este código directamente, sin embargo, conforma el núcleo de la de la aplicación. En el ocurre todo el procesamiento que la tarjeta realiza para llevar a cabo las operaciones solicitadas por la aplicación. El código que conforma esta etapa es incluido en un controlador. Dicho controlador es un archivo de extensión .so o una librería compartida de Linux. El controlador opera con dos objetos importantes, que son: las señales y los parámetros, donde las señales son los contenedores de toda la data almacenada en el *buffer* de la FPGA, mientras que los parámetros contienen las variables que operan sobre las diferentes funciones de la tarjeta o APIs (Application programming interface).

Las APIs de Redpitaya son una librería de funciones que sirven como enlace entre el controlador y la FPGA, ver Figura 3. Estas permiten que el controlador modifique los registros de la FPGA, y este a su vez, controla todo el hardware de la tarjeta, bien sea el ADC, DAC, pines GIOP, y leds.

En la Figura 4 se muestra un esquema del proceso que ocurre al iniciar una aplicación desde la interfaz web. En la primera fase, el servidor Nginx se encarga de cargar la imagen de FPGA requerida y el controlador necesario para operar la aplicación iniciada. A Partir de aquí el servidor establece la comunicación entre interfaz web y controlador a través de un archivo de texto con formato JSON. Este archivo JSON contiene los dos objetos antes

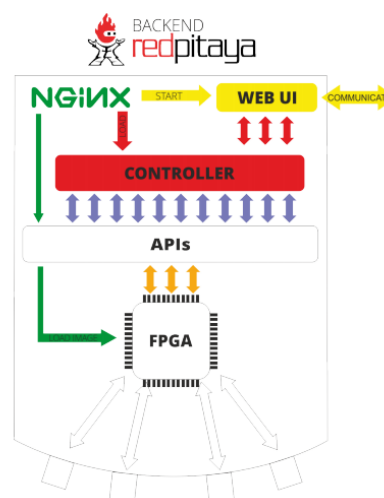


Figura 3: Esquema de funcionamiento de la Red Pitaya. Fuente: <https://www.redpitaya.com/>.

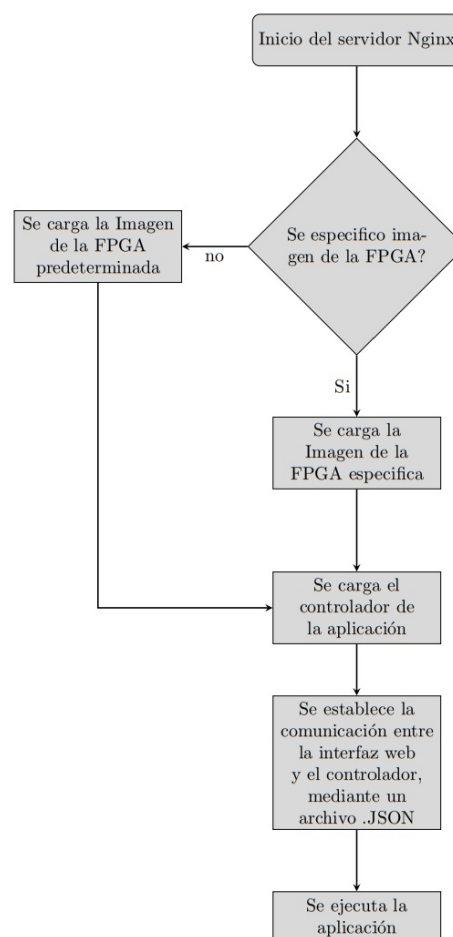


Figura 4: Diagrama de inicio de una aplicación.

mencionados, que son las señales y los parámetros. Por último, la aplicación es iniciada y el usuario empezara a recibir la información requerida.

El laboratorio de Instrumentación Electrónica (LIE) consta de 3 prácticas que abarcan el uso de 5 equipos: osciloscopio, analizador de espectro, analizador de impedancia, generador de funciones y generador de señales. Mientras que el Laboratorio de Sistemas de Ondas Guiadas (LSOG) consta de 5 prácticas en las cuales se requieren de los siguientes equipos: analizador de impedancia, analizador de espectro, reflectómetro de dominio de tiempo (TDR), generador de señales y generador de funciones.

Haciendo la comparación con las aplicaciones elaboradas empleando Red Pitaya en el trabajo de grado [5], se decidió desarrollar las aplicaciones correspondientes a: generador de señales y TDR. Convirtiendo a la tarjeta Red Pitaya en un banco de trabajo donde están operativos todos los equipos necesarios para alcanzar los objetivos de cada práctica de laboratorio, tomando en cuenta las limitaciones físicas de la tarjeta.

El generador de señales es utilizado en las prácticas de LIE, cuyos objetivos son la caracterización de señales moduladas AM y FM en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Dichos objetivos pueden ser realizados con la aplicación desarrollada del generador de señales. En el caso del LSOG, el TDR se emplea para determinar las fallas a lo largo de un cable en estudio, así como también la caracterización de una línea de transmisión conectando cargas conocidas en el extremo de la línea. Todo esto a través de diferentes métodos de medición que pueden ser implementados mediante la aplicación desarrollada en la tarjeta Red Pitaya de la misma forma que se realizan en el equipo físico. Para evaluar el nivel de conocimiento teórico y práctico en el manejo de los equipos utilizados en los laboratorio, se realizó una encuesta diagnóstica a los estudiantes de la Escuela de Telecomunicaciones de la UC. Esto con el fin de sustentar la elaboración de los distintos materiales didácticos e interfaces que componen las aplicaciones de Red Pitaya. Durante todas las fases del proyecto se realizaron encuestas

para medir la efectividad de la metodología implementada.

Para aplicar el material didáctico a los grupos de estudiantes en los que se divide una sección de Laboratorio se coordinó con los profesores asignados a las secciones del laboratorio de Instrumentación Electrónica y del laboratorio de Sistemas de Ondas Guiadas. Cada grupo inicia la práctica en la primera semana con el instrumento virtual, en la semana siguiente continua los objetivos de la práctica con el instrumento tradicional. Se indicó en cada práctica cuales objetivos son realizables empleando la instrumentación virtual de acuerdo con las limitaciones que posee la Red Pitaya y se facilitó el material didáctico desarrollado. Se seleccionó una única sección que sólo trabajó con el instrumento tradicional la cual fue tomada como grupo de control.

2.2. Evaluación de la eficacia de la Instrumentación Virtual

Para comprobar la eficacia de la implementación de instrumentos virtuales en el desarrollo de prácticas de laboratorio se emplearon encuestas con la finalidad de recolectar la información referente al conocimiento, usabilidad, utilidad, expectativas, metodología y herramientas empleadas en el desarrollo de la práctica empleando instrumentación virtual [8].

Consta de una fase previa, o Pre-Encuesta, que será tomada antes de iniciar la práctica del laboratorio; del mismo modo existe una fase posterior a la culminación de los objetivos de la práctica asignada donde se realiza una Post-Encuesta para contrastar la expectativa del estudiante con base en los criterios mencionados además de las perspectivas visuales de la interfaz desarrollada en el instrumento virtual [8, 9]. El tipo de encuesta desarrollada fue de respuesta cerrada de elección única y dicotómica.

Para que una herramienta de recolección de datos sea fiable con la respuesta que se obtenga es necesario realizar el proceso de confiabilidad del instrumento. Para este caso, debido a que se trabajó con una encuesta del tipo dicotómica, se usó el modelo de Kuder-Richardson empleado a

ítems dicotómicos sobre 10 estudiantes ajenos a los cursos de IE y SOG ver Tabla 1.

Tabla 1: Confiabilidad de la encuesta.

Encuesta	V_t	$\sum pq$	n	r_n
Pre	4,62	1,88	10	0,66
Post	11,12	3,35	19	0,74

r_n : es el coeficiente de confiabilidad.

V_t : es la varianza total de la encuesta.

n: es el número de encuestados.

$\sum pq$: es la sumatoria de la varianza individual de los ítems.

Para considerar una encuesta confiable se debe cumplir que el coeficiente $K - R_{20} > 0,6$. En el caso de las encuestas empleadas, éstas cumplen los criterios necesarios para considerar la herramienta de recolección de datos como válida.

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Comprobación de mediciones de las aplicaciones desarrolladas

3.1.1. TDR

Se realizaron mediciones con los equipos tradicionales y se compararon los resultados con los módulos del TDR y del generador de señales desarrollados para la Red Pitaya en este trabajo.

La evaluación del módulo de TDR desarrollado para la Red Pitaya se realizó mediante la medición de la longitud de las líneas de transmisión coaxiales disponibles en el LSOG, utilizando las cargas en cortocircuito y en circuito abierto para visualizar el comportamiento temporal del extremo de la línea de transmisión. El mismo procedimiento se aplicó con la función de VSWR del Site Master S331C de Anritsu para determinar la longitud del cable. Al comparar ambos resultados, se observó que el resultado de la medición de la longitud de la línea de transmisión coaxial fue de 11,4 m ver Figuras 5 y 6. Así mismo, se realizó una segunda medición, donde se utilizó una línea de transmisión con diferente longitud y se obtuvo una longitud de 45,6 m para ambas mediciones (instrumento de medición y Red Pitaya).

3.1.2. Generador de Señales

El módulo de generador de señales cuenta con 3 tipos de modulación: AM, FM, y PM. Para el

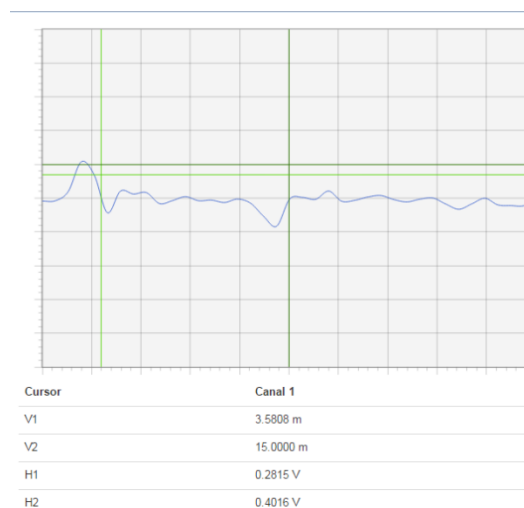


Figura 5: Medición de reflexiones en un cable RG-58 de 11m de longitud, con terminación en corto circuito, utilizando la aplicación TDR-UC.

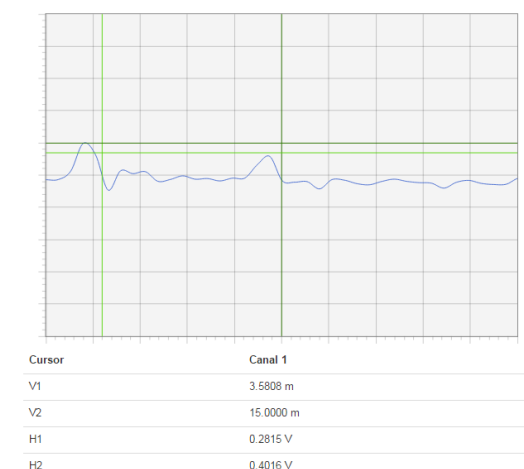


Figura 6: Medición de reflexiones en un cable RG-58 de 11m de longitud, con terminación en circuito abierto, utilizando la aplicación TDR-UC.

caso de la Señal AM se evalúa la precisión de la señal en el tiempo y la frecuencia en cuanto a amplitudes de señal moduladora, portadora e índice de modulación. En cambio, para las señales angulares FM y PM se analiza solo el en el dominio de la frecuencia ya que de esta manera se puede obtener información de cómo están dispuestas las líneas espectrales que componen la señal así como su frecuencia y ancho de banda, mientras que en el

dominio del tiempo es limitada la información que se puede obtener en este tipo de señales.

Generador de Señal AM. Empleando el instrumento virtual osciloscopio Red Pitaya UC se generó una señal AM con cuatro índices de modulación, m , para evaluar el comportamiento temporal de la señal ($m = 30\%$, $m = 50\%$, $m = 80\%$ y $m = 100\%$), ver ejemplo en Figura 7. En este sentido, se plantearon seis escenarios de medición con la finalidad de determinar el margen de error porcentual por cada índice de modulación. En la Tabla 2 se presentan los errores medidos, observando que el generador de señales AM tiene una alta precisión.

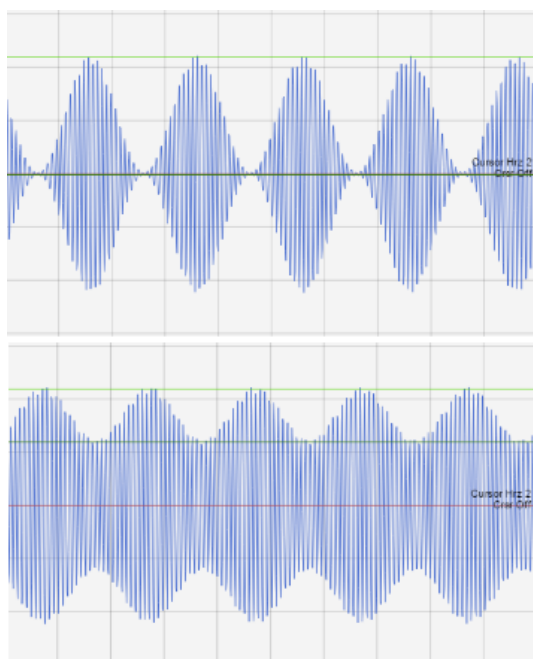


Figura 7: Forma de onda temporal para señal AM con distintos índices de modulación para $f_C = 1\text{MHz}$, $f_M = 1\text{KHz}$.

Tabla 2: Errores de los índices de modulación AM empleados en los experimentos.

m	Media de valores medidos	Error porcentual
30	29,105	2,98 %
50	50,441	0,88 %
80	81,48	1,85 %
100	99,02	0,98 %

Generador de Señal FM. La caracterización de señales FM se realizó en el dominio de la frecuencia mediante el analizador de espectros HP 4396B debido a que este instrumento ofrece ancho de banda con suficiente resolución para comparar los armónicos provenientes del Generador de Señales HP 8647A. Cabe señalar que la frecuencia de portadora más baja que se puede generar con el equipo es de 250 kHz, mientras que la máxima frecuencia de moduladora es de 1kHz, por lo que para estas frecuencias la Red Pitaya no es capaz de detectar armónicos debido a las limitaciones de la resolución de ancho de banda.

Recordando que la señal FM forma parte de las señales moduladas por ángulo, estas manifiestan su comportamiento en según la función de Bessel, por lo que se tomaron los valores de β que anula los armónicos de la señal.

Para este experimento se empleó el Generador de Señales diseñado para la Red Pitaya y el Generador de Señales HP 8647A para luego realizar la comparación de las señales generadas. En este sentido, con la aplicación Red Pitaya se ajustó la frecuencia de la señal portadora en 25 KHz y una señal moduladora de 1Khz, mientras que para el equipo tradicional la frecuencia de la señal portadora fue de 800 KHz y se moduló con la señal interna de 1Khz. Aunque ambas señales tienen diferente frecuencia de portadora, solamente se varió la de desviación máxima de frecuencia ΔF .

Al comparar ambas señales se observa que tienen un comportamiento frecuencial similar con la cantidad de armónicos respectivas en cada frecuencia; aunque en el generador de Red Pitaya se observan mayores líneas espectrales, estas componentes contienen un nivel de potencia inferior al armónico considerado como nulo para ese valor de índice de modulación, por lo que también son consideradas nulas. Asimismo, los nulos de las componentes espectrales coinciden teóricamente en ambos generadores.

Para valores de $\Delta F > 7600\text{Hz}$ la señal no corresponde a una FM. De igual manera sucede al aumentar la frecuencia de la moduladora f_M a valores mayor a 3Khz, lo que limita la operación del instrumento. No obstante, el generador diseñado para la Red Pitaya puede realizar modulación

Tabla 3: Comparativas de medidas de ancho de banda FM.

Parámetros de la señal			Anchos de Banda Teóricos			Anchos de Bandas Medidos		
m	f_m (Hz)	Δf (Hz)	BW Carson (Hz)	n	BW Bessel (Hz)	BW HP 8647A (Hz)	BW Red Pitaya (Hz)	BW Red Pitaya (> -60 dbm) (Hz)
2,4	1000	2400	6800	5	10000	10000	10000	10000
3,83	1000	3830	9660	6	12000	14000	16000	14000
5,14	1000	5140	12280	8	16000	18000	20000	16000
6,38	1000	6380	14760	9	18000	20000	22000	20000
7,59	1000	7580	17160	10	20000	22000	24000	22000

Tabla 4: Margen de error en el ancho de banda FM.

m	Error porcentual RP			Error porcentual RP > -60 dbm		
	Carson	Bessel	HP8647A	Carson	Bessel	HP8647A
2,4	47,05 %	0 %	0 %	47,05 %	0 %	0 %
3,83	65,63 %	33,33 %	16,66 %	44,92 %	16,66 %	0 %
5,14	62,86 %	25 %	12,5 %	30,29 %	0 %	11,11 %
6,38	49,05 %	22,22 %	11,11 %	35,55 %	11,11 %	0 %
7,59	39,86 %	20 %	10 %	28,20 %	10 %	0 %

interna hasta 3KHz; a diferencia del Generador de Señales HP 8647A que solamente puede modular con señales interna de 1KHz y 400 Hz.

La Tabla 3 muestra los anchos de bandas teóricos y los medidos para las diferentes variaciones realizadas. Cabe señalar que al aplicar la regla de Carson se obtienen las aproximaciones del ancho de banda menores que al emplear la ecuación de los coeficientes de Bessel [10].

En la medición del ancho de banda real se obtuvo una variación alrededor del 4 kHz con respecto al teórico de los coeficientes de Bessel y unos 2 kHz con respecto a el generador HP8647A, mientras que con la aproximación por regla de Carson, la diferencia mínima fue de 3,2 kHz y la máxima de 6,84 kHz.

Sin embargo, si se consideran despreciables los armónicos que tengan una potencia menor a -60 dBm el error en el cálculo del ancho de banda disminuye notablemente, coincidiendo en gran parte con el ancho de banda esperado véase en la Tabla 4.

3.1.3. Generador de Señal PM

Al igual que en FM, se empleó la misma configuración tanto para el Generador de Señales Red Pitaya, como para el Generador de Señales HP 8647A para realizar la comparación de las señales. No obstante, la variable en este caso fue

la de desviación fase $\Delta\theta$. Recordando que la señal PM es una modulación angular, el comportamiento espectral es aproximadamente igual a una señal FM, como la analizada en la sección anterior. Para medir la precisión del generador se realizaron varios montajes donde se evidenció como el nulo ocurre en el armónico principal en ambas señales. De la misma manera que en FM, las líneas espectrales que tienen un nivel de amplitud por debajo del nulo se consideran nulas.

3.1.4. Generador de Funciones

Las funciones Diente de Sierra y Señal modulada por ancho de pulso (PWM) fueron anexadas al generador de funciones y se validó el resultado al comparar con los valores teóricos.

Función PWM. El generador de funciones PWM para la Red Pitaya se utilizó para crear una señal de prueba de amplitud $1V_{p-p}$ y una frecuencia $f = 1$ KHz con tres ciclos útiles distintos, $D = 10\%$, $D = 40\%$ y $D = 80\%$. La caracterización temporal de las señales se realizó mediante la herramienta de los cursores del osciloscopio Red Pitaya para los tres ciclos útiles. El margen de error en el ciclo útil fue mínimo, obteniendo una señal precisa respecto a lo esperado. Véase la Tabla 5. Para el rango de los MHz, la señal empieza a presentar los característicos rizados de Gibbs debido distorsión.

Tabla 5: Medición de ciclo útil correspondiente con tres ciclos útiles distintos, $D = 10\%$, $D = 40\%$ y $D = 80\%$.

Ciclo útil teórico	t_1	t_2	Δt	Ciclo útil medido	Error porcentual
10 %	1257,57 μs	1359,31 μs	101,74 μs	10,17 %	1,70 %
40 %	507,57 μs	908,73 μs	401,16 μs	40,12 %	0,30 %
80 %	806,99 μs	1612,22 μs	805,23 μs	80,52 %	0,65 %

Sin embargo, mediante una adaptación de 50 Ω es posible reducir este fenómeno.

Función Diente de Sierra. Se generó la señal Diente de Sierra y se probó la herramienta de tiempo de subida con la herramienta del osciloscopio de la Red Pitaya, obteniendo resultados satisfactorios. Para frecuencias mayores a 1 MHz, la señal comienza a presentar distorsión en los picos de cambio brusco. Se logró alcanzar frecuencias de trabajo de 10 Mhz al adaptar el puerto de entrada del osciloscopio con una carga de 50 Ω .

4. Evaluación de la efectividad de la metodología desarrollada

Se realizó el análisis de las encuestas aplicadas en la dinámica de los laboratorios LIE y LSOG. Primero se determinó el porcentaje de conocimiento previo del equipo, luego se realizó la comparación de la apreciación del estudiante antes y después del desarrollo de la práctica; finalmente se diagnosticó la proporción de estudiantes motivados a continuar con este sistema.

4.1. Conocimiento Previo

El 54 % de los estudiantes manifestaron tener conocimiento previo sobre los equipos y el 67 % indicó que había interactuado con algún equipo de los empleados en las prácticas de laboratorio LIE y LSOG. Estos resultados van enfocados al osciloscopio y Generador de Funciones que usan en laboratorios como Mediciones Eléctricas y Electrónica (II y III).

4.2. Comparativa de encuestas

En las pre-encuestas y post-encuestas se realizaron consultas con el fin de evaluar el nivel de influencia de la instrumentación en el desempeño de las prácticas del laboratorio.

4.2.1. Confianza

El nivel de confianza de los participantes al momento de manipular los equipos del laboratorio aumentó de un 33 % a un 79 %. Además, las expectativas con respecto al fortalecimiento del nivel de confianza esperado por los estudiantes se cumplieron; reafirmando la influencia de la instrumentación virtual en la manipulación de los equipos de laboratorio.

4.2.2. Expectativa

En esta categoría se presentan dos preguntas relativas a las expectativas del aprendizaje empleando instrumentación virtual. La expectativa de que se pueden alcanzar los objetivos de una práctica se mantuvo en 83 %. Con respecto a la expectativa de que la interfaz virtual no debería ser semejante al instrumento tradicional Inicialmente solo un 8 % de los estudiantes consideraba que no debería ser semejante al instrumento tradicional. Luego del desarrollo de la práctica se alcanzó una unanimidad de la expectativa y se considera que deben ser semejantes.

4.2.3. Herramientas

Con respecto al uso de las múltiples plataformas, como lo son dispositivos móviles o computadoras, los estudiantes mantuvieron la opinión, en un 92 %, de que ayudan a aprender de una manera más didáctica la operación y funcionamiento de los equipos del laboratorio.

4.2.4. Utilidad

El 100 % de los estudiantes consideraron que el uso de instrumentación virtual en el desarrollo de las prácticas contribuyen al crecimiento de las competencias que debe poseer un ingeniero de telecomunicaciones para desenvolverse en el campo laboral.

4.2.5. Metodología

En la pre-encuesta un 75 % de los estudiantes opinaban que se podía afianzar el conocimiento adquirido en la parte teórica de la materia realizando las prácticas empleando instrumentos virtuales. Luego de interactuar con la Red Pitaya y el 92 % considera que es posible relacionar la teoría con la práctica usando instrumentación virtual.

4.3. Usabilidad del Instrumento

En el ámbito de la usabilidad de los equipos los estudiantes consideran que los instrumentos realizados son fáciles de usar para realizar las mediciones correspondientes a las prácticas y cumplir con cada uno de los objetivos. Es importante destacar que el 79 % de los estudiantes consideran que el material didáctico contribuyó en gran medida al aprendizaje de los equipos y su desenvolvimiento en el laboratorio. Un 75 % de los estudiantes valoraron que es posible realizar las mismas mediciones u operaciones en el instrumento virtual y en el instrumento tradicional, teniendo conocimiento de las limitaciones que posee la tarjeta al momento de trabajar. Por otro lado, el 79 % de los alumnos tizaron como precisas las medidas de las aplicaciones desarrolladas, es decir 19 estudiantes de los 24 que se tomaron para el estudio.

Al observar los resultados obtenidos en la encuesta se aprecia que un 71 % de los estudiantes valoran como correcto la emulación de los instrumentos virtuales de la Red Pitaya. Bajo este sistema un 96 % los estudiantes se sintieron motivados al realizar la práctica y consideraron que se debería continuar implementado las prácticas mediante instrumentos virtuales apoyado con materiales didácticos para su mejor comprensión, comparado con un 88 % obtenido en la encuesta previa.

4.4. Evaluación de Grupo de Control

El grupo de control contaba para su preparación con el material de las clases de teoría y manuales técnicos de los equipos tradicionales dispuestos en la escuela de telecomunicaciones, la puntuación obtenida en la evaluación al inicio de la práctica fue de 5,22 pts. La nota obtenida

en la evaluación final fue 10,33 pts. Los grupos que trabajaron con la Red Pitaya y el material didáctico basado en simulaciones, obtuvieron una calificación promedio de 14,17 pts en la evaluación final, comparado con la nota inicial de 5,42 pts se logró una mejora del 262 %.

5. Conclusiones

Con el uso de simulaciones como herramientas didácticas para el aprendizaje del manejo de los instrumentos de laboratorio, se obtuvieron calificaciones mayores en comparación a las demás estrategias desarrolladas, una mejora de 262 %. Ésta fue la más aceptada por parte de los estudiantes al realizar la práctica. Los estudiantes aumentaron el nivel de confianza que demostraban previo a realizar la práctica. Sin embargo, el margen de calificaciones obtenidas entre cada una de ellas no fue tan amplio; los tutoriales un 243 % y el manuales 147 % y la de control 197 % relativo a la nota inicial de cada caso. Cabe destacar que se obtuvieron calificaciones mayores a los del grupo de control.

Las herramientas tutoriales otorgan mayor detección en los errores cometidos durante un ensayo previo, facilitando las decisiones a efectuar al momento de realizar la práctica disminuyendo el margen de error en el uso de las funciones del instrumento.

Las aplicaciones desarrolladas con la tarjeta de adquisición Red Pitaya tienen una alta aceptación por los estudiantes de los laboratorios de Instrumentación Electrónica y Sistemas de Ondas Guiadas. Fueron valoradas como fáciles de usar, además de que permiten realizar las mismas mediciones que se podrían realizar con el equipo físico. También cuentan con un margen de error aceptable en las mediciones realizadas, lo cual es indispensable para que se valide su uso en laboratorios universitarios, centros de investigación y laboratorios de medición privados.

Los estudiantes consideran que las interfaces deben ser similares visualmente al instrumento tradicional, mas no consideran necesario el uso de perillas para el manejo de los cursores del instrumento. Por otro lado, aprueban el uso de

botones para activar funciones como también el uso de cajas de textos para introducir valores.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación realizada, la instrumentación virtual es una metodología apropiada para el aprendizaje en laboratorios de ingeniería. Aumentan la confianza del estudiante al operar un instrumento, tenga conocimiento previo o no, lo cual conlleva a una mayor motivación en el aprendizaje, facilitan el logro de los objetivos pautados para las prácticas y refuerzan el conocimiento adquirido en el curso teórico. Los estudiantes consideran que la instrumentación virtual va acorde a las competencias que debe poseer un ingeniero. Por las razones expuestas anteriormente, se está de acuerdo con la implementación de la instrumentación virtual como complemento en las prácticas de laboratorios.

Se comprobó la efectividad de los módulos de instrumentación virtual en los alumnos de instrumentación electrónica y sistemas de ondas guiadas; por lo tanto, es factible la implementación de esta herramienta durante las sesiones de laboratorio.

Los materiales didácticos desarrollados y empleados en el laboratorio ofrecen una mejora en el aprendizaje de un equipo de laboratorio empleando la instrumentación virtual sobre la metodología de aprendizaje de un instrumento tradicional; dicho de otra forma, tienen mayor efectividad en el conocimiento adquirido por el estudiante. Esto representa una gran oportunidad para reducir los costes del equipamiento de Laboratorios en los centros de enseñanza.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2018.

6. Referencias

[1] Jesús Salinas. Innovación docente y uso de las TIC en la enseñanza universitaria. *Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento (RUSC)*, 1, 2004.

[2] J. M. Andújar Márquez and T. J. Mateo Sanguino. Diseño de laboratorios virtuales y/o remotos. Un caso práctico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1):64–72, 2010.

[3] Tareq Alkhaldi, Ilung Pranata, and Rukshan I. Athauda. A review of contemporary virtual and remote laboratory implementations: observations and findings. *Journal of Computers in Education*, 3(3):329–351, 2016.

[4] James M. Marshall. Learning with technology: Evidence that technology can, and does, support learning. Report, Cable in the Classroom Foundation (CIC), San Diego, 2002.

[5] E. Marmol and J. Viera. Desarrollo de instrumentación electrónica de bajo costo mediante SDR empleando la tarjeta redpitaya. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, 2015.

[6] Jorge De Castro and Kevin Henriquez. Desarrollo de un generador vectorial de onda arbitraria basado en radio definida por software y software libre. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, 2015.

[7] C. J. García-Orellana, M. Macías-Macías, H. González-Velasco, A. García-Manso, and R. Gallardo-Caballero. Remote laboratory experiments of analog electronics based on RedPitaya. In *2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAE)*, pages 1–7, June 2016.

[8] M. J. Albert Gómez, M. García Pérez Calabuig, and Gabriel Díaz. La evaluación como instrumento de formación para el aprendizaje a través de los laboratorios remotos. *REDU. Revista de Docencia Universitaria*, 14(1):377–403, 2016.

[9] Vanesa Gámiz Sánchez and María Jesús Gallego Arrufat. Modelo de análisis de metodologías didácticas semipresenciales en educación superior. *Educación XXI: revista de la Facultad de Educación*, 19(1):39–61, 2016.

[10] Wayne Tomasi. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Prentice Hall, Phoenix, Arizona, 2003.

Nevus classification by calculating the fractal dimension and the harmonic analysis of the contour extracted from multispectral images

Alvaro Ascencio^a, José Zapata^a y Ahmad Osman^{*a,b}

^aEscuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bCentro de Análisis y Tratamiento de Señales (CATS), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- The implementation of algorithms that allow classifying images from digital dermatoscopes with the purpose of improving the early detection of melanomas, is a key aspect in the solution of the problems that exist in many hospital centers inside and outside the country. In this sense, a prototype tool was developed that allows the classification of multispectral images of nevi, taking as a previous reference the value of the fractal dimension and later making use of the Fourier coefficients; both calculations were applied to the contour extracted from said images. The validation of the calculations that allowed the distinction was made through an analysis of variance for the case of fractal dimension, which allowed to show the statistical difference of the values of the dimension associated with the nevi. On the other hand, the analysis of the linear discriminant was applied to the Fourier coefficients of the contour and thus achieve a premature classification using machine learning. This study succeeds in revealing an evident potentiality regarding fractal dimension parameters and Fourier coefficients as significant elements that could be incorporated into the future development of nevus classifiers, with the purpose of facilitating the diagnosis of melanocytic lesions of the skin and the definition of malignancy.

Keywords: nevus; multispectral images; fractal dimension; Fourier coefficients.

Clasificación de nevus mediante el cálculo de la dimensión fractal y el análisis armónico del contorno extraído de imágenes multiespectrales

Resumen.- La implementación de algoritmos que permiten clasificar imágenes provenientes de dermatoscopios digitales con el propósito de mejorar los procesos de detección temprana de melanomas, es un aspecto clave en la solución de la problemática existente en muchos centros hospitalarios dentro y fuera del país. En este sentido, se desarrolló una herramienta prototipo que permite la clasificación de imágenes multiespectrales de nevus, tomando como referencia previa el valor de la dimensión fractal y posteriormente haciendo uso de los coeficientes de Fourier; ambos cálculos fueron aplicados al contorno extraído de dichas imágenes. La validación de los cálculos que permitieron la distinción se hizo mediante un análisis de varianza para el caso de dimensión fractal, lo que permitió mostrar la diferencia estadística de los valores de la dimensión asociados a los nevus. Por otro lado, se aplicó el análisis del discriminante lineal a los coeficientes del Fourier del contorno y así lograr una clasificación prematura haciendo uso del aprendizaje de máquina. Este estudio, logra develar una evidente potencialidad en lo concerniente a los parámetros dimensión fractal y coeficientes de Fourier como elementos significativos que pudieran incorporarse al desarrollo futuro de clasificadores de nevus, con el propósito de facilitar el diagnóstico de las lesiones melanocíticas de la piel y la definición de malignidad.

Palabras claves: nevus; imágenes multiespectrales; dimensión fractal; coeficientes de Fourier.

Recibido: abril 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

La clasificación de nevus en el contexto de los diagnósticos realizados en el ejercicio dermatológico-

co, acelera el proceso de detección temprana de los melanomas. Los múltiples estudios realizados en este ámbito se basan generalmente en análisis bajo concepciones geométricas *euclidianas* y de acceso eventual al dominio transformado de la totalidad de la imagen, generando dilatación de temporal en el procesamiento de la información. Sin embargo, la geometría fractal y el análisis armónico del contorno vislumbran un estudio perspicaz

* Autor para correspondencia:

Correo-e:ahmadosmanc@gmail.com (Ahmad Osman)

que evita considerar al nevus como cualquier forma geométrica regular y además permite una indagación más profunda sobre el compartamiento irregular y fragmentado que poseen sus bordes. [1, 2, 3, 4, 5].

Es por ello, que el propósito de este trabajo consiste en la implementar la clasificación de lunares aplicando el cálculo de la dimensión fractal como distinción previa y además un análisis armónico del contorno extraído de imágenes multiespectrales, usando el cómputo asistido; garantizando los criterios de código abierto, escalabilidad, adaptabilidad y su posibilidad de ejecución multiplataforma [6].

2. Desarrollo de la investigación

El desarrollo de la clasificación consistió en tres fases principales, las cuales se describen a continuación:

2.1. Determinación de la dimensión fractal y coeficientes de Fourier del contorno de la imágenes multiespectrales.

Primeramente nos hicimos de un conjunto imágenes multiespectrales de distintos tipos de nevus previamente clasificados, las cuales fueron proporcionadas por el Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo de la Universidad de Carabobo. Dichas imágenes fueron organizadas según la Tabla 1 con el objeto de tener una data más estructurada.

Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
41	17	51	18

Tabla 1: Tipos de imágenes de nevus

Es bueno acotar que estas imágenes fueron obtenidas a través de un dermatoscopio multiespectral, desarrollado por el Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas Universidad de Carabobo, constituido por ocho LEDs tricromáticos de 3 mm cada uno que emiten una iluminación en los rangos de azul (470 nm), verde (580 nm), rojo (660 nm) y su combinación para blanco, cyan (510nm),

magenta (405nm) y amarillo (578nm), con una lente de 25 mm y aumento variable de 20X a 200X [7].

Una vez organizada la data, se inicia el proceso de extracción del borde de las imágenes multiespectrales de los nevus. Esta etapa consiste en pasar cada imagen por varios procesos de rutina como: transformación a escala de grises, aplicación de filtros gausseanos para suavizado de texturas y eliminación de elementos perturbadores, binarización de la imagen mediante *OTSU*, aplicación de las técnicas de *erosión* y *dilatación*, así como también un análisis de la imagen binaria y de los gradientes en los píxeles para obtener los puntos donde existe cambio, y por consiguiente donde esta el borde [8].

Una vez extraído el borde, se realizó el cálculo de los valores de dimensión fractal Mediante el la implementación del método de *Box-counting* y luego se calcularon los coeficientes de Fourier del borde a partir de los datos del valor del radio r generados al realizar el cálculo del contorno del nevus normalizado [7, 9, 1].

2.2. Aplicación de los fundamentos estadísticos para la validación de los resultados de dimensión fractal y coeficientes de Fourier.

Los valores obtenidos de dimensión fractal y coeficientes de Fourier calculados para cada imagen fueron sometidos diversos análisis los cuales establecen si es posible realizar una caracterización de los nevus según su tipo.

- El primero fue el análisis de varianza o ANOVA (analysis of variance) el cual se aplicó solo para el cálculo de la dimensión fractal del borde. El factor resultante nos sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa, se aplica para contrastar la igualdad de medias de tres o más poblaciones independientes y con distribución normal [10, 11].

La variable explicativa (predictor) es *tipo de nevus* y la variable de estudio *dimensión fractal*. Para ejecutarlo se cumplen los siguientes pasos:

1. Discriminación de datos: se descartan para este test las imágenes cuyo borde no fue capturado de forma correcta. La cantidad de imágenes a procesar según la frecuencia de estudio se muestra en la Tabla 2.

Espectro	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
RGB	26	10	25	10
Cyan	34	7	27	10
Azul	19	5	25	10
Amarillo	13	5	17	5
Verde	10	5	21	5
Magenta	23	10	24	10
Rojo	10	5	17	1

Tabla 2: Numero de imágenes seleccionadas

2. Estructuración de datos: ellos están ordenados y agrupados según el tipo de nevus al que pertenezca cada valor de dimensión fractal de estudio. Estos fueron organizados en una base de datos.
3. Cálculo del *value p*: el cual nos indica en qué frecuencias es posible caracterizar a los nevus según el valor de dimensión fractal. Se establece el nivel de significación $\alpha = 0,5$, y se verifican las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula. Las medias de los grupos son iguales, mediante el cumplimiento de la siguiente condición $\text{value } p > \alpha$.

Hipótesis alternativa. Las medias de los grupos se diferencian, mediante el cumplimiento de la siguiente condición $\text{value } p \leq \alpha$.

4. Representación de los resultados: el resultado del ANOVA determina si se encontró o no diferencias significativas que permitan la clasificación. Ellos se representarán de forma gráfica, ilustrando los valores de las medias grupales y desviación estándar.

- Análisis lineal discriminante (LDA sus siglas en inglés), es un algoritmo de aprendizaje supervisado que usa las etiquetas de los datos de entrada para aplicar la clasificación

correspondiente. Fue aplicado únicamente para el análisis armónico y nos permite obtener la descomposición de la función que representa el contorno obtenido del nevus en tonos puros que llamaremos *armónicos* [9, 11, 12].

El conjunto de armónicos o vector *FFT* constituyen los valores de entrada que permitan realizar un reconocimiento de patrones y aprendizaje de máquina para encontrar una combinación lineal de rasgos que caracterizan a los cuatro tipos de nevus estudiados, de esta forma poder separarlos en grupos y realizar una clasificación. En este proceso se cumplen los siguientes pasos:

1. En primer lugar se tomaron: 5, 10 y 15 coeficientes para realizar la representación del contorno, y determinar con cual de estos valores resulta mas efectiva la clasificación mediante LDA.
2. Estructuración de los datos de entrada, los cuales están agrupados según el tipo de nevus, cada grupo esta identificado por un numero (1: Compuesto, 2: Displásico, 3: Intradérmico, 4: Unión) seguidamente de los 15 coeficientes de Fourier que representan la función del contorno de cada nevus, plasmados en una base de datos.
3. Representación gráfica de los resultados, en la cual se reflejan las 4 zonas que describen los tipos de nevus, y los valores contenidos en cada una de ellas.

2.3. Desarrollo de una interfaz de usuario mediante wx Python

Ya establecidos los métodos de clasificación para los nevus, se desarrolló una interfaz gráfica que permita manejarlos en un mismo entorno de forma sencilla y efectiva. La biblioteca *wxPython* facilita el desarrollo de interfaces gráficas portables (funcionales en Windows y Linux) con licencia: LGPL.

2.3.1. Creación del archivo ejecutable .exe

La creación del .exe se implemento con el módulo *cx Freeze*, el cual nos permite congelar

los scripts de *Python* en un archivo ejecutable, disponibles en *WINDOWS* y *LINUX*, siguiendo los siguientes pasos:

- Descarga e instalación de *Python v2.7* y las librerías correspondientes: *cxfreeze*, *opencv2*, *matpaloatlib*, *numpy*, *pandas*, *sklearn*, *wxPython*, *Pycrypto*, *PyHooks*.
- Creación de un script llamado: *setup.py*, en el cual se ejecuta la acción de conversión.
- Ubicar el archivo *setup.py* y *main.py* (este script es el que contiene el código que se congelará en un ejecutable), dentro de la carpeta de instalación de *Python 2.7*.
- Vía *cmd* nos ubicamos dentro de la carpeta donde se encuentran los archivos de trabajo y se ejecuta el comando *python setup.py build*, este genera una carpeta llamada *build* y dentro de la misma se encuentra el archivo ejecutable.

2.3.2. Creación de manual de usuario

Se creó un manual de usuario lo cual permite facilitar el acceso a la experimentación científica futura y mitigar el tiempo de aprendizaje para el manejo de la herramienta de clasificación. En el mismo se especifica los pasos a seguir para cargar y analizar las imágenes de los nevus.

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Extracción del borde

3.1.1. Datos de Estudio

Una muestra del formato entregado de las imágenes se ilustra en la Figura 1.

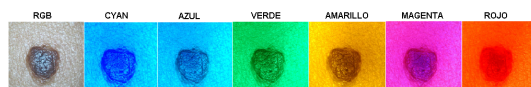


Figura 1: Nevus captado en los 7 espectros de estudio.

Basados en los datos proporcionados y siguiendo los lineamientos expuestos anteriormente, se obtuvo como resultado lo expuesto a continuación:

3.1.2. Cambio a escala de grises.

Una vez capturada la imagen del nevus a estudiar se procede a realizar el cambio a escala de grises, en la Figura 2 se muestra un ejemplo de esta transformación en un lunar tipo compuesto.

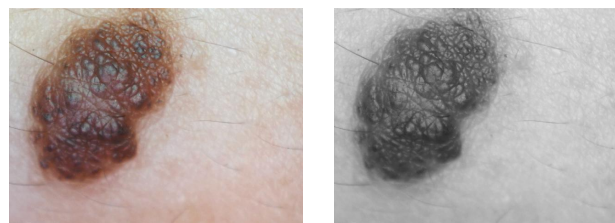


Imagen RGB.

Imagen en escala de grises.

Figura 2: Cambio a escala de grises de un nevus compuesto. Fuente: Propia.

3.1.3. Aplicación de filtro

Se observó el histograma de los distintos filtros que están inmersos en la librería de OpenCV. Obteniendo como resultado que el más adecuado es el Gaussiano, dado a que este hace un mejor suavizado.

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se muestra el resultado obtenido luego de aplicar el filtro, es apreciable el suavizado de textura, estabilización de magnitud y la difuminación de vellos.

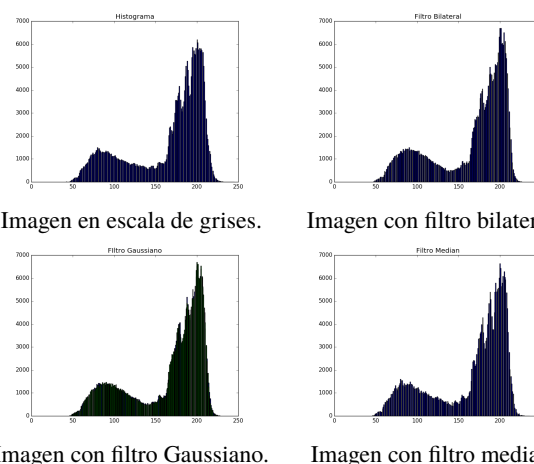


Figura 3: Histograma de un nevus compuesto. Fuente: Propia.

3.1.4. Binarización de imagen

Para la binarización, se emplea el método OTSU, se considera este el mejor método que aporta

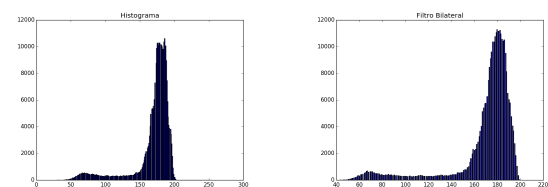


Imagen en escala de grises.

Imagen con filtro bilateral.

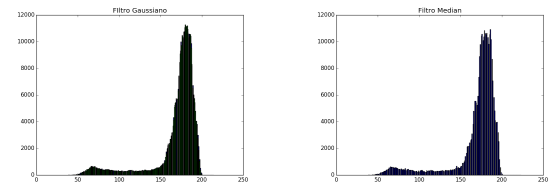


Imagen con filtro gaussiano.

Imagen con filtro median.

Figura 4: Histograma de un nevus displásico. Fuente: Propia.

OpenCV, debido a que se adapta a la imagen de entrada. Ubicando el punto de inflexión (también conocido como valor umbral), procede a establecer en uno (1) todos los valores mayores al punto de inflexión, y cero (0) a los valores menores a este. El resultado obtenido se observa en la Figura 11.

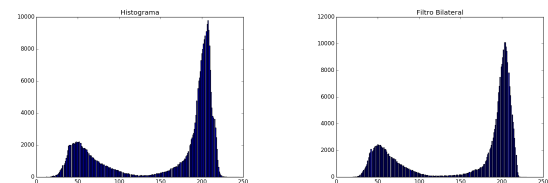


Imagen en escala de grises.

Imagen con filtro bilateral.

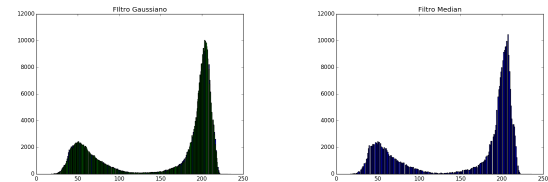


Imagen con filtro gaussiano.

Imagen con filtro median.

Figura 5: Histograma de un nevus intradérmico. Fuente: Propia.

Es apreciable que, aunque el método es adaptativo, en algunos casos se presencia dentro de la imagen, zonas negras con manchas blancas o zonas blancas con manchas negras. Para solventar esta situación, se procede a aplicar técnica de erosión y dilatación, las mismas son descritas a continuación.

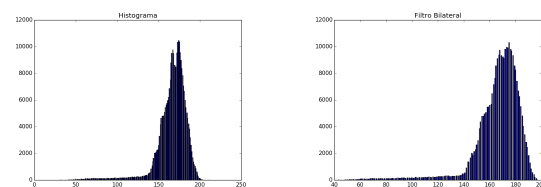


Imagen en escala de grises.

Imagen con filtro bilateral.

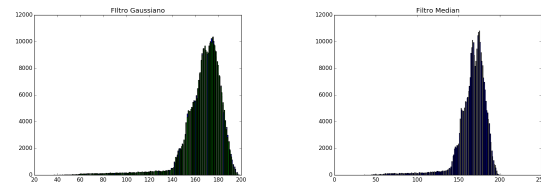


Imagen con filtro gaussiano.

Imagen con filtro median.

Figura 6: Histograma de un nevus unión. Fuente: Propia.



Imagen en escala de grises.

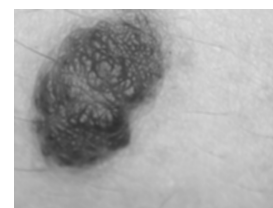


Imagen con filtro gaussiano.

Figura 7: Aplicación de filtro gaussiano a nevus compuesto. Fuente: Propia.

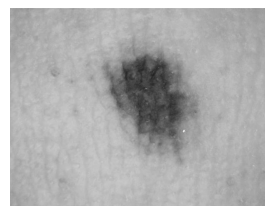


Imagen en escala de grises.

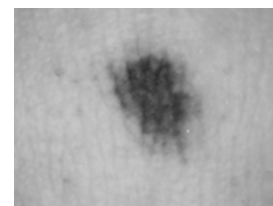


Imagen con filtro gaussiano.

Figura 8: Aplicación de filtro gaussiano a nevus displásico. Fuente: Propia.

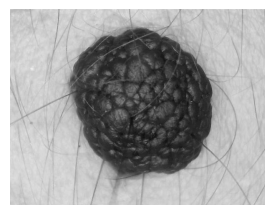


Imagen en escala de grises.

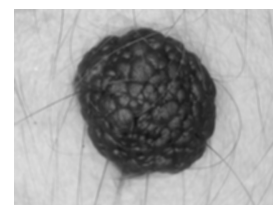


Imagen con filtro gaussiano.

Figura 9: Aplicación de filtro gaussiano a nevus intradérmico. Fuente: Propia.

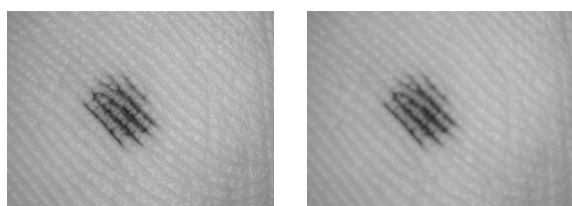


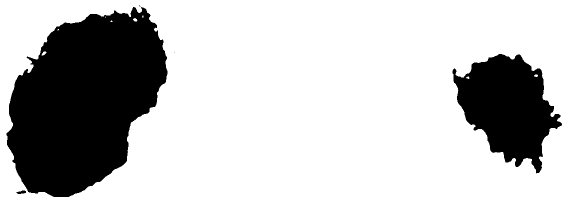
Imagen en escala de grises. Imagen con filtro gaussiano.

Figura 10: Aplicación de filtro gaussiano a nevus unión. Fuente: Propia.



Imagen erosionada. Imagen aperturada.

Figura 13: Aplicación de erosión y apertura sobre nevus displásico. Fuente: Propia.



Nevus compuesto. Nevus displásico.



Nevus intradérmico. Nevus unión.

Figura 11: Resultados obtenidos de binarización con OTSU. Fuente: Propia.



Imagen erosionada. Imagen aperturada.

Figura 12: Aplicación de erosión y apertura sobre nevus compuesto. Fuente: Propia.

3.1.5. Erosión y dilatación de imágenes binarias.

Dada la particularidad de algunas imágenes, luego de la binarización, quedan con manchas indeseadas. Entonces se procede a aplicar primeramente erosión y luego una apertura (erosión y luego dilatación). En la imagen del nevus de tipo *unión* es donde se puede apreciar de forma clara este efecto para definir el contorno, ver Figuras 12, 13, 14 y 15.



Imagen erosionada. Imagen aperturada.

Figura 14: Aplicación de erosión y apertura sobre nevus intradérmico. Fuente: Propia.

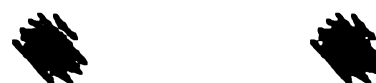
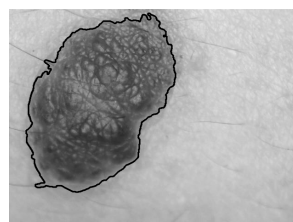
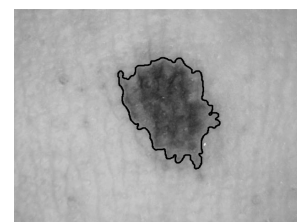


Imagen erosionada. Imagen aperturada.

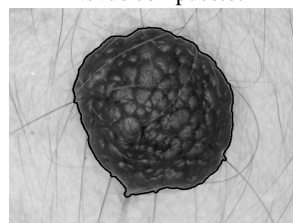
Figura 15: Aplicación de erosión y apertura sobre nevus unión. Fuente: Propia.



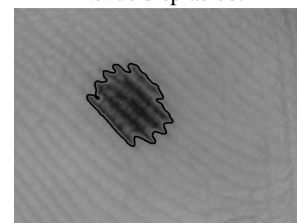
Nevus compuesto.



Nevus displásico.



Nevus intradérmico.



Nevus unión.

Figura 16: Muestra del contorno capturado. Fuente: Propia.

3.2. Cálculo de dimensión fractal.

Luego de obtenido todos los valores de $N(r)$ y r que aporó el método de *Box-Counting*, se procedió a realizar la regresión lineal de dichos valores, obteniendo así la dimensión fractal. En la Figura 17 se muestran los resultados.

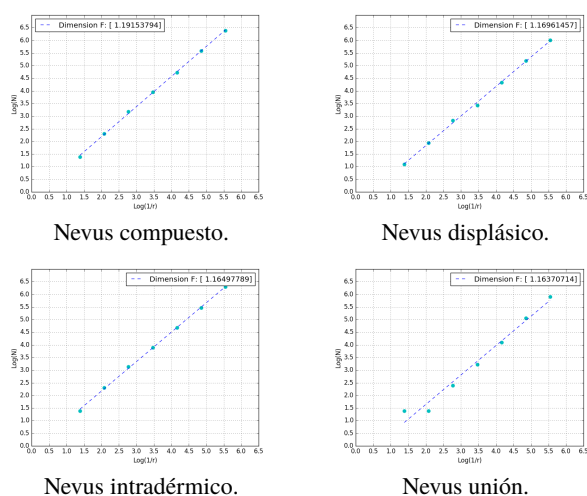


Figura 17: Regresión lineal para el cálculo de dimensión fractal. Fuente: Propia.

3.3. Cálculo de la magnitud de los coeficientes de Fourier

Para la determinación de los coeficientes de Fourier se empleo la FFT, el cual esta disponible en la biblioteca *NumPy* de *Python*. En la Figura 18 se muestra los resultados obtenidos, en los cuales se pudo observar que en todos los tipos de nevus el mayor contenido espectral esta en el primer y tercer armónico. A partir del tercer armónico la potencia disminuye de forma considerable. A pesar que la distribución espectral que representa la función del borde en todos los tipos de nevus sigue un mismo patrón, estos pueden ser caracterizados ya que la magnitud de potencia que contiene cada armónico es particular, por ende, en algunos casos se requiere de solo 5 armónicos para representar al nevus mientras que en otros se requieren 12 armónicos, al aplicar el test de validación se podrán identificar estas características con mayor precisión.

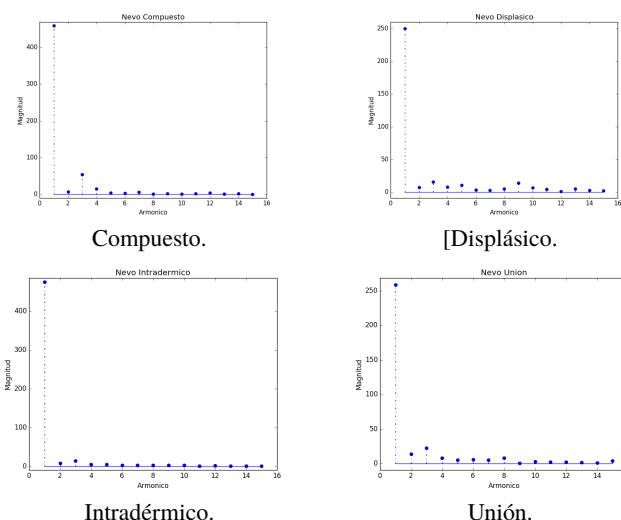


Figura 18: Gráfica de los coeficientes de Fourier. Fuente: Propia.

3.4. Validación de resultados

3.4.1. Análisis de la varianza

Un requisito para que el test se ejecute es que requiere de un mismo numero de datos de entrada para cada nevus, es decir, se necesitan la misma cantidad de valores de dimensión fractal por cada tipo de lunar a evaluar, para que se pueda realizar el cálculo y comparación entre varianzas.

En nuestro caso, seleccionamos 10 valores de dimensión fractal para ser estudiados, ya que es el mínimo valor en común con el cual se puede manejar, en el caso de los nevus que tienen 5 datos, se procede a repetir esos valores por segunda vez para llegar a la cantidad mínima requerida, de esta forma el valor de media (μ) no se ve afectada.

Este análisis se llevo a cabo con los valores de dimensión fractal de cada nevus en las diferentes bandas espectrales de estudio. Para estudiar estos resultados en una primera fase se muestra el valor promedio correspondiente a cada grupo en las diferentes frecuencias, de esta forma conocer el comportamiento fractal de cada nevus para su posterior clasificación. En en la Tabla 3 se reflejan los datos.

Basados en estos datos se aplica ANOVA con un nivel de significación $\alpha = 0,05$ el cual indica si los grupos son estadísticamente diferenciables, de esta forma concluir mediante la hipótesis nula y si esta se puede o no descartar.

Tipo de Nevus	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
RGB	1,1475939	1,2204466	1,1327832	1,2027709
Cyan	1,1495025	1,1838031	1,114196	1,1425386
Azul	1,161574	1,248642	1,1588039	1,1697369
Verde	1,1981606	1,238553	1,1601967	1,228025
Amarillo	1,1489223	1,168415	1,1544117	1,2199337
Magenta	1,142142	1,1856182	1,1137979	1,1680158
Rojo	1,1521432	1,2482395	1,1451053	

Tabla 3: Promedio de la dimensión fractal por banda espectral según cada tipo de nevus clasificado. Fuente: Propia

Tipo de Nevus	F_{value}	p_{value}	Decisión de la prueba
RGB	5.760916	0.00252068	Rechazar H_0
Cyan	4.251086	0.0113891	Rechazar H_0
Azul	4.192179	0.01210631	Rechazar H_0
Verde	6.190772	0.00167327	Rechazar H_0
Amarillo	2.910015	0.04765335	Rechazar H_0
Magenta	3.674496	0.02085629	Rechazar H_0
Rojo	10.852684	0.00034764	Rechazar H_0

Tabla 4: Valores de ANOVA, sobre las bandas espectrales de estudio. Fuente: Propia

Los resultados del ANOVA mostrados en la Tabla 4, nos muestran que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los cuatro tipos de nevus para las bandas espectrales de estudio. Analizando el p_{value} , notamos que el mismo es menor al nivel "alpha" ($\alpha < 0,05$), descartando así la hipótesis nula en todos los casos.

La representación de la distribución de valores de dimensión fractal para cada tipo de nevus en las bandas espectrales estudiadas se refleja en la Figura 19. Se observa que en ninguna de las bandas espectrales se cumple uno de los requisitos de estudio para ANOVA, el cual es la distribución normal, sin embargo este análisis tolera las violaciones a su supuesto de normalidad, siempre que no sea demasiada. Por ende, es permisible dicho análisis, en el cual se realizaron las siguientes observaciones:

En la banda RGB el nevus compuesto es quien más se aproxima a una distribución gaussiana, mientras que el intradérmico tiene una varianza bastante limitada demostrando así un comportamiento estable en cuanto al valor de dimensión fractal. Los nevus tipo unión e

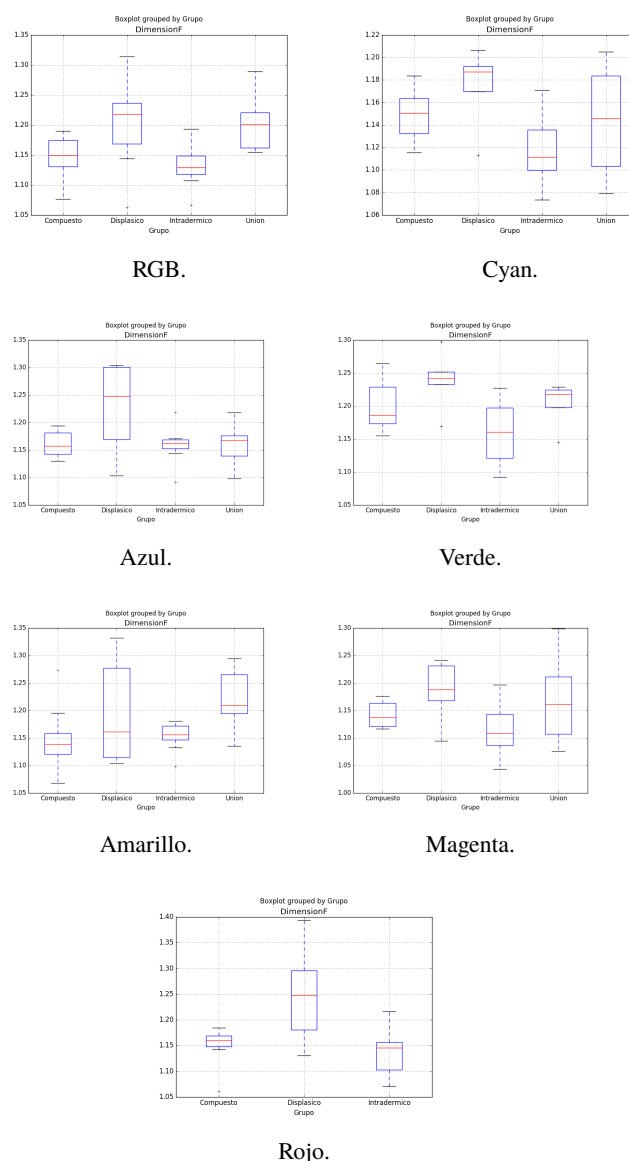


Figura 19: Distribución de la dimensión fractal en cada banda espectral. Fuente: Propia

intradérmico poseen una distribución aproximada a la normal en la frecuencia cyan.

Las bandas verde y azul son útiles para caracterizar los nevus tipo displásico e intradérmico ya que en dichos espectros los valores de dimensión fractal tienen una aproximación cercana a la normal. En el espectro magenta destaca el nevus tipo unión, ya que sus valores de sigue el mismo patrón que el caso anterior. El nevus tipo compuesto vuelve a tener un comportamiento similar en las frecuencias de estudio amarillo y rojo, en este ultimo espectro notamos que no se puede realizar una caracterización del lunar tipo unión, generando

así un carácter limitante en la clasificación de lunares en dicha frecuencia, ya que los mismos deben ser excluidos en el color rojo.

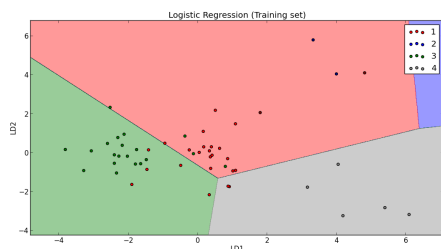


Figura 20: Gráfica LDA en la frecuencia: RGB.
Fuente: Propia

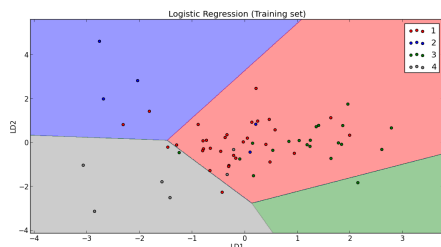


Figura 21: Gráfica LDA en la frecuencia cyan.
Fuente: Propia

3.5. Análisis discriminante Lineal

Dicho análisis realiza un cambio de dimensión de los coeficientes de Fourier, los cuales son plasmados y agrupados en *regiones* que permiten la caracterización de los nevus según su tipo. Los resultados de este análisis se observan en las Figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 26.

En las gráficas mostradas se evidencia como a través del aprendizaje de máquina, el algoritmo desarrollado es capaz de reconocer los cuatro tipos de nevus estudiados mediante el análisis armónico de su contorno. En general, este análisis realiza la división en el plano en cuatro zonas definidas por los valores de los coeficientes de Fourier, cada punto en la gráfica representa un *conjunto* de los 15 armónicos estudiados en cada lunar. En cada banda espectral pueden realizar las siguientes observaciones:

- RGB: Los nevus tipo compuesto e intradérmico poseen mas datos de estudio y tienen

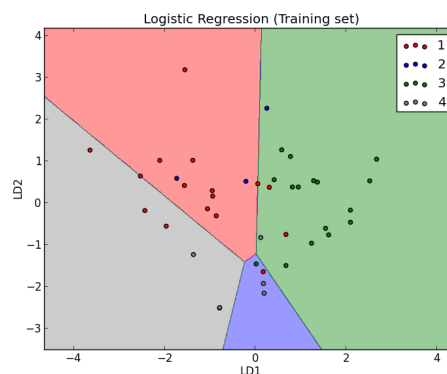


Figura 22: Gráfica LDA en la frecuencia azul.
Fuente: Propia

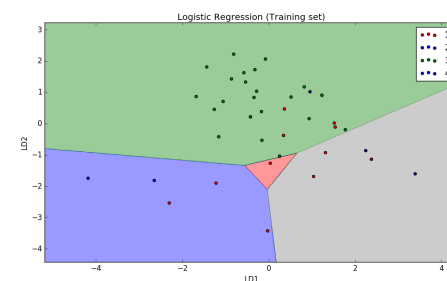


Figura 23: Gráfica LDA en la frecuencia verde.
Fuente: Propia

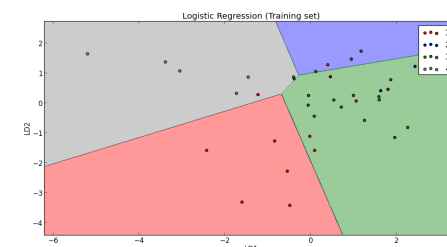


Figura 24: Gráfica LDA en la frecuencia amarillo.
Fuente: Propia

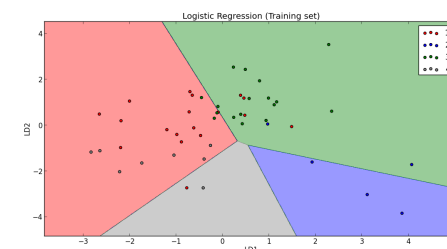


Figura 25: Gráfica LDA en la frecuencia magenta.
Fuente: Propia

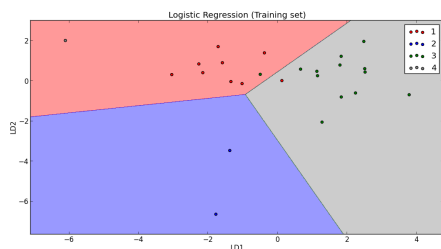


Figura 26: Gráfica LDA en la frecuencia rojo.
Fuente: Propia

una mejor definición ya que abarcan la mayor cantidad de valores correspondientes, sin embargo, debido a su proximidad los mismos se solapan, generando así que exista una tasa de error con estos lunares. El nevus tipo unión posee pocos valores, sin embargo, los mismos se encuentran en una zona específica en el que no interviene con ninguna otra zona, en el caso de los displásicos son los que peor se definen en esta banda ya que poseen pocos datos de entrada y los mismos están dispersos y solapados con otras áreas.

- **Cyan:** El lunar tipo compuesto es quien mas datos de entrada posee en esta banda, su zona abarca casi la totalidad dichos valores, los nevus tipo displásico e intradérmico se solapan en gran parte con los de tipo compuesto, y las zonas definidas no son muy precisos para estas dos muestras. Los nevus de tipo unión poseen un comportamiento similar al que tienen en la banda RGB.
- **Azul:** En esta banda el nevus tipo displásico presenta un comportamiento que le vale poca fiabilidad en la caracterización, esto va ligado a la poca entrada de datos para su clasificación mediante el aprendizaje de máquina. Los tres tipos de lunares restantes si tienen una zona definida aceptable, en la cual contienen a la mayoría de los valores de entrada respectivamente.
- **Verde:** En este caso el nevus tipo intradérmico es quien mejor se define ya que sus valores se encuentran contenidos casi en su totalidad en la zona de clasificación (2 = verde). Los

displásicos e intradérmicos a pesar de tener pocos valores de entrada, se definen de forma aceptable por la relación datos de entrada - zona. Por último los nevus tipo compuesto son los que peor se definen en este caso.

- **Amarillo:** Los nevus tipo compuesto, intradérmico y unión se precisan de forma aceptable ya que la relación entre los valores de los coeficientes y zona de clasificación son correspondientes y los mismos están contenidos casi en un 100 % en una misma zona respectivamente. Displásico tiene definida una zona de clasificación los valores entrada no están contenidos en su totalidad en la misma.
- **Magenta:** Los nevus tipo intradérmico son los que mejor pueden ser caracterizados en esta banda espectral, en contraste a los de tipo unión en el cual la relación valores de entrada-zona de clasificación no se cumple a cabalidad. Los dos modelos restantes de lunares presentan una zona de caracterización definida en la cual se agrupan la mayoría de los datos de entrada.
- **Rojo:** Para esta banda espectral solo se plasman 3 zonas de clasificación, esto debido a que para los nevus tipo unión no se logra obtener una captura fiable de su contorno, y por ende, los coeficientes de Fourier quienes representan los datos de entrada para este estudio. Por otro lado, el resto de los tipos de nevus si se definen de forma aceptable, como se puede observar en su gráfico.

En determinadas bandas espectrales resulta mas efectiva la clasificación de ciertos tipos de nevus, así como también se resulta poco fiable la clasificación de algunos modelos de nevus en otras frecuencias de estudio, además se puede observar que en todas las bandas existe una tasa de error presente ya que los datos de entrada (coeficientes de Fourier) para ejecutar LDA se solapan en las zonas adyacentes. Sin embargo, se logra apreciar como el algoritmo logra demarcar a los cuatro tipos de nevus analizados en distintos sitios del

plano de conversión, posibilitando de esta forma la clasificación mediante el análisis armónico del contorno.

3.6. Desarrollo de una interfaz de usuario mediante wxPython

Tal como se muestra en el apartado 2.3, todas las herramientas desarrolladas para la caracterización del nevus, desde la extracción del borde, aplicación de filtros, hasta la aplicación de ANOVA y LDA para clasificarlos, deben estar integrados en un solo elemento para que el usuario pueda manejar la herramienta de forma sencilla.

3.6.1. Creación del archivo ejecutable

Siguiendo los pasos detallados anteriormente, se obtiene el archivo en formato *.exe*, en cual esta contenido en la carpeta llamada: *build*, y dentro de esta se guardan todos los elementos que se usan para la ejecución del programa, tal como se muestra en la Figura 27.

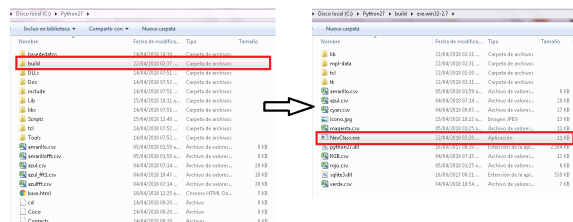


Figura 27: Ubicación del archivo *.exe*

Al ejecutar el archivo *NevClass.exe* se despliega una ventana principal la cual nos da la bienvenida a la herramienta, explica el funcionamiento básico de la misma y hace una recomendación, en la Figura 28 se muestra dicha ventana.

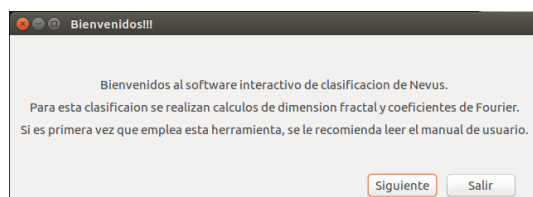


Figura 28: Ventana de bienvenida. Fuente: Propia

Al presionar la tecla *Siguiente* se despliega una segunda ventana en la cual se muestran 7 campos correspondientes a las frecuencias de

estudio de las imágenes de los nevus captadas por el dermatoscopio multiespectral. Al seleccionar cualquiera de los *checkbox* ubicados a la izquierda, se habilitara el botón *Examinar* correspondiente, con el cual se puede buscar y cargar la imagen en la banda espectral a estudiar, al seleccionar el archivo gráfico del lunar, la ruta se cargará en el campo de la frecuencia seleccionada, tal como se muestra en las Figuras 29 y 30.

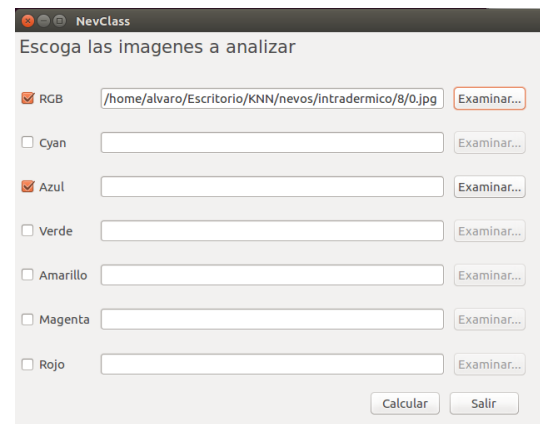


Figura 29: Ventana de selección de imágenes. Fuente: Propia

Por ultimo, la ventana de resultados en la cual se muestran los valores de clasificación del Nevus, se observa un cuadro principal en el cual esta contenida la imagen estudiada con el borde capturado. En la parte inferior izquierda se muestra el resultado de LDA el cual nos indica el tipo de nevus al cual pertenecen la imagen estudiada, y en la parte derecha se refleja el valor de dimensión

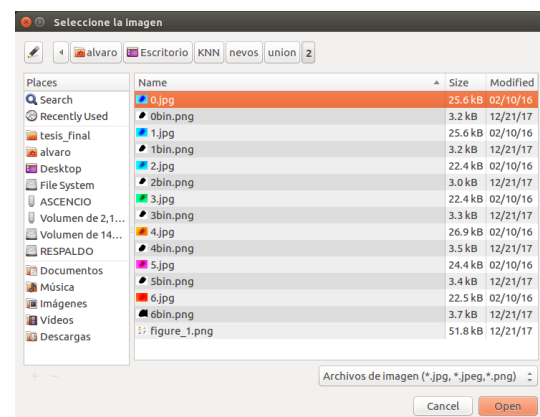


Figura 30: Ventana de dialogo para búsqueda de imagen. Fuente: Propia

fractal, el cual sirve como referencia, ya que dichos datos están comprendidos en un rango determinado.

Adicionalmente, en la parte derecha se encuentran 7 botones, cada uno correspondientes a las bandas espectrales de estudio, al presionar cada uno de ellos, si en la ventana de datos fue cargada una imagen, se mostraran los resultados correspondientes. En la Figura 31, se muestra lo descrito anteriormente.



Figura 31: Ventana de resultados

3.7. Medición de tiempo de ejecución.

Se midió el tiempo de ejecución de la herramienta en 20 nevus (5 compuestos, 5 displásicos, 5 intradérmicos y 5 unión) en distintos espectros. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Como es apreciable, el tiempo promedio es de una décima de segundo (datos obtenidos en un equipo con un procesador Intel Celeron de 1.1 GHz y 2 Gb de memoria RAM).

3.8. Porcentaje de acierto en la predicción

Para obtener una medida de referencia que refleje de forma cuantitativa la efectividad del caracterizador, mediante el porcentaje de aciertos que el mismo tiene al estudiar imágenes de nevus nuevas (no contenidas en la base de datos), se procedió a realizar la siguiente prueba:

- Reducir la base de datos: Se suprimieron valores de los coeficientes de Fourier que representan la función del borde para cada tipo

Tipo de Nevus	Tiempo obtenido[s]
Compuesto	0.0897688865662
Compuesto	0.116816043854
Compuesto	0.146898984909
Compuesto	0.108335018158
Compuesto	0.0960428714752
Displásico	0.122251987457
Displásico	0.122135162354
Displásico	0.111006975174
Displásico	0.112498044968
Displásico	0.0986249446869
Intradérmico	0.115082979202
Intradérmico	0.100229024887
Intradérmico	0.114835977554
Intradérmico	0.14009809494
Intradérmico	0.113065004349
Unión	0.139758825302
Unión	0.130352973938
Unión	0.106132984161
Unión	0.113340139389
Unión	0.0991129875183

Tabla 5: Tiempo de ejecución obtenido en diferentes nevus. Fuente: Propia

de nevus. En este caso se eliminó a la mitad de los valores por grupo, en las frecuencias *rgb* y *cyan*, quedando de la siguiente forma:

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
RGB	12	5	12	5
cyan	11	5	12	5

Tabla 6: Base de datos de prueba

- Analizar los nevus en el espectro *rgb* y *cyan* que no estén contenidos dentro de la base de datos de prueba, reflejados en la Tabla 1, cabe destacar que ciertos datos contenidos en dicha tabla no son aptos para caracterizar, el motivo principal de esto es la captura de contorno de forma errónea (bordes fuera de la imagen). Seguidamente se documenta la cantidad de aciertos que refleja el caracterizador, ver Tablas 7 y 8.

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
Aciertos	13	4	17	6
Fallido	12	0	8	0
Total	25	4	25	6

Tabla 7: Nevus analizados en la frecuencia RGB

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
Aciertos	16	1	24	3
Fallido	10	3	8	3
Total	26	4	32	6

Tabla 8: Nevus analizados en la frecuencia cyan

- Determinar el porcentaje de acierto que obtuvo el clasificador al analizar las imágenes nuevas (no contenidas en la base de datos).

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
Aciertos	52 %	100 %	68 %	100 %
Fallido	48 %	0 %	32 %	0 %

Tabla 9: Porcentaje de predicción de nevus en la frecuencia RGB

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
Aciertos	61.53 %	25 %	75 %	50 %
Fallido	38.47 %	75 %	25 %	50 %

Tabla 10: Porcentaje de predicción de nevus en la frecuencia cyan

Observando los valores reflejados en las Tablas 9 y 10, tenemos que para la banda espectral *rgb* de 60 nevus analizados se obtuvo una predicción correcta de 40 nevus eso es aproximadamente 66.666 % de acierto, mientras que en la banda *cyan* de 68 nevus analizados el clasificador pudo predecir 44 nevus de forma correcta, esto representa el 64.7 % contra un 35.3 % de lecturas resultados fallidos. El análisis en estas bandas espectrales representa de forma general la capacidad de predicción del clasificador de nevus, cabe destacar que en determinadas frecuencias el porcentaje de predicción de forma correcta sera mayor que en otras, el motivo de este comportamiento se debe a la captura del contorno ya que en algunas frecuencias este proceso no es efectivo como en otras.

3.9. Selección de los coeficientes de Fourier

Para establecer la representación espectral del contorno de cada nevus, se requiere trabajar con una cantidad determinada de coeficientes de

Fourier, en este caso se realizaron pruebas con: 5, 10 y 15 armónicos en la frecuencia *rgb* y se procedió a caracterizar los nevus, tomando en cuenta el porcentaje de acierto durante este proceso, tal como se muestra en las Tablas 11 y 12.

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
Aciertos	11	1	18	2
Fallido	14	3	10	4
Total	25	4	28	6

Tabla 11: Nevus caracterizados con 5 armónicos en la frecuencia *rgb*

	Compuesto	Displásico	Intradérmico	Unión
Aciertos	13	1	18	5
Fallido	12	3	10	1
Total	25	4	28	6

Tabla 12: Nevus caracterizados con 10 armónicos en la frecuencia *rgb*

Los resultados mostrados en la Tabla 11 se muestran de forma porcentual de la siguiente forma:

- Compuesto: 44 %
- Displasico: 25 %
- Intradérmico: 64 %
- Unión: 33 %

Mientras que en la Tabla 12 se representan de la siguiente forma:

- Compuesto: 52 %
- Displasico: 25 %
- Intradérmico: 64.28 %
- Unión: 83.33 %

Tal como se evidencia, al realizar la representación del contorno del nevus con 5 y 10 armónicos el porcentaje de severidad en la predicción

del caracterizador disminuye considerablemente en la mayoría de los tipos de nevus, ya que como se mencionó anteriormente el conjunto de los contornos estudiados requieren mas de 10 armónicos para que sean simbolizados de forma precisa. Sin embargo, se observa una precisión alta para los nevus de tipo: Intradermico y Unión esto se debe a que tienen un alto nivel de regularidad en su contorno, por ende, la mayor parte de potencia espectral esta contenida en los primero armónico y se puede obtener una representación fiable de estos nevus bajo estas condiciones. En nuestro caso se seleccionaron 15 armónicos los cuales permiten una representación bastante precisa de todos los tipos de lunares, sin aumentar la carga computacional.

3.10. Manual de Usuario

El desarrollo de un manual de usuario facilita el manejo de esta herramienta, además de fijar los pasos a seguir para evitar cometer errores al analizar las imágenes. En el mismo también se especifican ciertas sugerencias que minimizaran errores en el procesamiento y análisis de las imágenes de nevus.

4. Conclusiones

La clasificación realizada luego del proceso de análisis de las imágenes obtenidas del dermatoscopia multiespectral advierten un estrategia para reducir el tiempo de computo y esfuerzo asociado a esta tarea de la realización del diagnóstico dermatológico. En este sentido, se materializa una clasificación eficiente a través el análisis del contorno de los nevus considerando los valores de dimensión fractal y coeficientes de Fourier.

El valor de dimensión fractal que caracteriza el contorno de cada nevus estudiado se encuentra en un rango determinado para cada grupo, esta característica hizo posible la clasificación de los lunares usando este parámetro.

Otra característica destacada de los coeficientes de Fourier, es que los mismos revelan información en cuanto al grado de regularidad del contorno. Por ultimo, si las armónicos no siguen un patrón en la distribución espectral de la potencia tal como

se describió, es muy posible que existan errores en la captura del borde de los nevus, ya que en determinadas frecuencias de estudio se presentan *sombras*, que distorsionan la forma del contorno.

El análisis de varianza permite la caracterización de los nevus mediante la comparación entre medias de los valores de dimensión fractal, este estudio solo nos demuestra la posibilidad de poder realizar una caracterización basados en este parámetro. Otro aspecto destacado es que este análisis resulta más eficiente en determinadas frecuencias mientras que en otras no es aplicable en su totalidad. Tal es el caso de la banda espectral *rojo*, en el que los nevus de tipo unión no pueden ser clasificados debido a que en esta frecuencia la penetración en la piel de la imagen captada es mayor. Caso contrario se presenta en las bandas *azul*, *cyan* y *magenta*, en el que la caracterización de todos los tipos de nevus es posible y se obtiene una mejor calidad de los datos a clasificar.

El uso de las librería *sklearn* (aprendizaje de máquina), permitió entrenar el algoritmo con los valores de coeficientes de Fourier previamente obtenidos, permitiendo la puesta en marcha del análisis discriminante lineal, el cual basado en los datos de aprendizaje realiza una comparación del análisis armónico del nevus estudiado con su base de datos, para la clasificación del mismo.

Al aplicar la caracterización de nevus mediante LDA se puede resaltar las bandas espectrales donde la cantidad de datos de entrenamiento es mayor, las zonas de clasificación son más distinguibles, ya que contienen casi en su totalidad los valores representativos de cada grupo, permitiendo esto que la caracterización sea mas precisa.

Cabe destacar que el haber obtenido un tiempo de análisis de aproximadamente una décima de segundo, permite acelerar y dar mejor uso al tiempo invertido en realizar un diagnóstico. Se puede incluso considerar que este nuevo método de análisis es la antesala al diagnóstico en tiempo real.

El porcentaje de acierto en la predicción del clasificador en la frecuencia *rgb* será mayor al 66.666 %, ya que este valor se obtuvo con tan solo la mitad de los valores de la base de datos, y como se ha mencionado anteriormente al aumentar

la base de datos la eficiencia del clasificador al predecir los tipos de nevus aumentará. En la banda espectral *cyan* el porcentaje de predicción será mayor al 64.7 %. Estas cifras reflejan la efectividad del algoritmo al procesar nuevas imágenes multiespectrales de nevus, se realizó el estudio en la banda *rgb* ya que en todos los centros no se cuenta con el dermatoscopio multiespectral, y de ser así el análisis solo se puede ejecutar en dicha frecuencia, mientras que en la frecuencia *cyan* se encuentra contenida el comportamiento del resto de la banda de estudio.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2018.

5. Referencias

- [1] Benoît Mandelbrot. *La Geometría Fractal de la Naturaleza*. Tusquets Editores, 1997.
- [2] Dimitrios Kapsokalyvas, Nicola Bruscolo, Domenico Alfieri, Vincenzo de Giorgi, Giovanni Cannarozzo, Riccardo Cicchi, Daniela Massi, Nicola Pimpinelli, and Francesco S Pavone. Spectral morphological analysis of skin lesions with a polarization multispectral dermoscope. *Optics express*, 21(4):4826–4840, 2013.
- [3] Cristian Felipe Ocampo Blandón. Herramienta soporte al diagnóstico del melanoma usando imágenes dermatoscópicas. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011.
- [4] Mani Abedini, Adrian Bowling, Rajib Chakravorty, Sergey Demyanov, and Rahil Garnavi. Detection of outlier lesions based on extracted features from skin images, 2018. US Patent US 2018/0122065 A1.
- [5] Hsiang-Chen Wang, Shin-Hua Chen, Shih-Wei Huang, Lai Chiu-Jung, and Chu-Chi Ting. Cancerous lesion identifying method via hyper-spectral imaging technique, February 20 2016. US Patent 9,895,112.
- [6] G. Bradski and A. Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.
- [7] Irene Paredes. Determinación de la organización de los melanocitos en nevus melanocíticos adquiridos mediante el análisis fractal en imágenes multiespectrales. Trabajo Especial de Grado, Programa de Especialización en Dermatología, Dirección de Postgrado, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2017.
- [8] Ravishankar Chityala and Sridevi Pudipeddi. *Image processing and acquisition using Python*. CRC Press, 2014.
- [9] Alan V. Oppenheim; Roland W. Schaffer. *Tratamiento de señales en tiempo discreto*. Pearson, 2 edition, 1998.
- [10] Humberto Gutierrez Pulido; Roman de la Vara Salazar. *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill, segunda edition, 2008.
- [11] Roberto Hernandez Sampieri. *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill, sexta edition, 2014.
- [12] Yunfeng Liang, Lei Sun, Wee Ser, Feng Lin, Steven Tien Guan Thng, Qiping Chen, and Zhiping Lin. Classification of non-tumorous skin pigmentation disorders using voting based probabilistic linear discriminant analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 2018.

A liposoluble colorant from Annatto seeds (Bixa Orellana L.) as an input for food industry

José Camacaro^a, José Gómez^a, Milagros Jiménez^b, Cristóbal Vega^c y Lisbeth Manganiello^{*b}

^aEscuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bCentro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^cInstituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- In the present work, it was proposed to obtain a liposoluble dye for the food industry from the Bixa Orellana L. or commonly known as annatto through an extraction with the use of a solvent. The soil characteristics of the onoto plants of the community El Pernal, Tinaquillo, Cojedes state, selected for the present investigation, were studied. Solvents such as ethanol, n-hexane, ethyl acetate and potassium hydroxide were evaluated as leaching agents of bixin, with the help of a standard sample facilitated by the food industry, and with the use of UV-visible equipment it was found that 2 % KOH was the best extractive solvent due to its low cost, low levels of toxicity and high yield. Extraction tests were performed on onoto seeds at a laboratory scale where variables such as solute and solvent quantity ratio, soaking time, agitation and in turn subsequent steps as bixin neutralization and precipitation, vacuum filtering, drying were studied. to the oven and storage, where the extraction performance was determined.

Keywords: Bixa Orellana L.; onoto; bixina; natural dyes; leaching; food.

Un colorante liposoluble de semillas de Onoto (Bixa Orellana L.) como insumo para la industria alimentaria

Resumen.- En el presente trabajo se planteó la obtención de un colorante liposoluble para la industria de alimentos a partir de la Bixa Orellana L. o conocido comúnmente como onoto a través de una extracción con el uso de un solvente. Se estudiaron las características del suelo de las plantas de onoto de la comunidad El Pernal, Tinaquillo, estado Cojedes, seleccionada para la presente investigación. Se evaluaron solventes como el etanol, n-hexano, acetato de etilo e hidróxido de potasio como agentes lixiviantes de la bixina, con la ayuda de una muestra patrón facilitado por la industria alimenticia, y con el empleo del equipo UV-visible se comprobó que el KOH al 2 % resultó mejor solvente extractor por su bajo costo, bajos niveles de toxicidad y alto rendimiento. Se realizaron ensayos de extracción a las semillas de onoto a escala de laboratorio donde se estudiaron variables como relación de cantidad de soluto y solvente, tiempo de remojo, agitación y a su vez pasos posteriores como neutralización y precipitación de la bixina, filtrado al vacío, secado al horno a y almacenamiento, donde se determinó el rendimiento en la extracción.

Palabras claves: Bixa Orellana L.; onoto; bixina; colorantes naturales; lixiviación; alimentos.

Recibido: marzo 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

La naturaleza está caracterizada en gran medida debido a la rica diversidad que poseen, distintas especies de animales y plantas. El ser humano se ha provisto de esa diversidad con el fin de mejorar

la calidad de vida y con el pasar de la historia el desarrollo de la humanidad ha ido de la mano con el aprovechamiento de recursos naturales y su transformación. Los alimentos son un punto sensible para la sociedad, tanto en tiempos antiguos como en la actualidad, y es un área importante para la investigación y elaboración de proyectos que satisfagan demandas y necesidades.

Actualmente existe una tendencia mundial a la utilización de alimentos sin el uso de herbicidas, pesticidas y fertilizantes artificiales, conocidos como alimentos orgánicos o naturales. Debido a

*Autor para correspondencia: Lisbeth Manganiello
lmanganiello@uc.edu.ve

este requerimiento, la industria intenta incorporar estas exigencias a sus productos, generando como resultado alimentos saludables, atractivos y de mejor calidad.

Uno de estos insumos importantes para la industria alimenticia es la incorporación de colorantes, estos juegan un papel importante debido a que representan a través del contacto visual, el primer acercamiento entre el consumidor y el producto, lo que puede hacer que este último sea más atractivo entre una gran cantidad de productos existentes en el mercado nacional, donde compiten alimentos nacionales e importados. Los pigmentos naturales son aquellos obtenidos de fuentes presentes en la naturaleza, usados para impartir color a algunos productos. Son sujetos a las mismas pruebas de calidad y seguridad toxicológica que los sintéticos, pero la Administración de Alimentos y Fármacos de Estados Unidos (F. D. A.) por sus siglas en inglés y otras agencias gubernamentales, no requieren que se certifique su pureza química y por tanto se refiere a ellos como aditivos de color no certificados; sin embargo, algunos de estos pigmentos sí están sujetos a restricciones en su uso, como el nivel máximo permitido o el uso en animales y/o humanos (ver [1]).

El onoto se ha utilizado desde tiempos pre-coloniales en Venezuela con diferentes usos: medicinal, colorante corporal y como condimento en alimentos, por tanto, el onoto es conocido como fuente natural histórica proveedora de color, es una planta arbustiva que científicamente lleva el nombre de *Bixa Orellana* L. Este arbusto puede medir entre 3 y 10 metros de altura, sus hojas son simples, grandes, de forma acorazonada y dispuesta de manera alterna, de bordes lisos y con largos pecíolos. Las flores son hermafroditas y están dispuestas en ramilletes terminales, de colores blanco a rosado, según las variedades. El fruto es una cápsula ovoide u ovoide - globosa, pardo - rojiza, que mide de 2 a 5 centímetros de diámetro, puede tener espínulas sedosas (escasas o abundantes) o carecer de ellas. Puede ser de color naranja, verde, amarillo, rojo o poseer diferentes tonalidades entre éstos. En su interior se encuentran de 10 a 50 semillas rojas, casi triangulares y

pequeñas, rodeadas con una sustancia viscosa de color rojo vivo que contiene la bixina. El onoto, conocido de esta forma coloquialmente a la *Bixa Orellana* L., prospera en zonas tropicales y se adapta a distintos tipos de clima y suelos. Crece en altitudes desde 100 hasta 1 000 m.s.n.m., aunque prospera mejor en zonas relativamente bajas (100 a 500 m) y planas. Soporta temperaturas desde 24 hasta 35° C, y precipitaciones anuales de 1.000 a 1.200 mm. Es posible reproducirla por semillas, estacas o injertos. Los arbustos de onoto comienzan su producción comercial entre los 3 y 4 años de edad. En promedio, una plantación resulta redituable por un periodo de 12 años, aunque varía de acuerdo con las condiciones del suelo, el clima y el manejo (ver [2]).

El método que se utilice para extraer el colorante de las semillas redundará en la calidad del producto final. Existe una forma tradicional y antigua para la extracción del colorante, practicado en miles de hogares, el cual consiste en colocar las semillas de onoto en aceite caliente, agitando constantemente y así se obtiene un aceite, que se usa para darle color a las comidas. Esta técnica muy empleada en casas presenta bajos rendimientos, con pérdidas elevadas en el contenido de bixina. Otro procedimiento para la extracción de bixina es el método industrial, este consiste en la utilización de solventes orgánicos y se evita el uso de altas temperaturas. Con este método se obtienen altos rendimientos, ya que la molécula de bixina es afín a estos solventes y permite obtener extractos puros del pigmento (ver [2]). El método industrial resulta mucho más costoso debido a la cantidad disolvente y equipo necesarios para el proceso de extracción. La bixina tiene varias formas de presentación comercial, cada una con diferentes concentraciones como colorante soluble en aceite, colorante en solución acuosa o colorante en pasta.

La meta de este trabajo es desarrollar un colorante natural liposoluble a partir de la semilla de onoto (*Bixa Orellana* L.) utilizable en la industria de alimentos con carácter de exportación.

Los aditivos alimentarios forman parte principal en muchos de los productos alimenticios de consumo humano, debido a que ayudan a la conservación de alimentos, benefician en el

procesamiento de los mismos e inclusive pueden modificar sus características sensoriales como lo son el olor, sabor y el color; este último de gran importancia debido a que forma parte de la apariencia del producto y puede representar “el primer acercamiento del consumidor al alimento” (ver [1]). Los colorantes como aditivos alimentarios pueden ser clasificados en sintéticos y naturales, sin embargo el uso de colorantes naturales es más cotizado debido a que su presencia en alimentos no representa peligro para la vida humana, no tiene restricciones en su uso y esto influye directamente en la calidad del producto. La bixina compuesto liposoluble proveniente de la especie *Bixa Orellana* L., es usada ampliamente en la industria de alimentos y cosméticos. Adicionalmente en su composición química, la bixina tiene presencia de vitamina A y minerales que aportan al alimento adicionado, nutrientes. Además de sus propiedades pigmentantes tiene propiedades farmacológicas, entre las más importantes se pueden mencionar: antiinflamatoria, antioxidante, cicatrizante y se ha indicado incluso en el tratamiento de heridas y quemaduras por su acción antibacteriana. La extracción de un colorante liposoluble por lixiviación de la semilla, conduce a la generación de un producto de elaboración a nivel industrial que permita disminuir considerablemente los costos por sustitución de importación, seleccionando un solvente económico, que permita obtener alto rendimiento de extracción en bixina y que su toxicidad no represente un problema para la salud del consumidor, que satisfaga parte de la demanda de la industria de alimentos a nivel nacional.

2. Aspectos Teóricos

A continuación serán presentados algunos antecedentes de colorantes naturales.

Narváez [3] describe un método de extracción del colorante natural del fruto de *Evilán* (*Monnina* spp) para su uso como colorante en yogurt; para lo cual, toma como solvente una solución (etanol 90 % y ácido cítrico al 0,03 %). La materia prima fue sometida al proceso de liofilización, en forma de pulpa, optimizando de esta manera tiempo y cantidad de fruta a procesar.

Obtenido el colorante se realizaron pruebas, entre ellas diferentes concentraciones de colorante en yogurt de mora, análisis sensoriales, análisis de degustación. Se pudo establecer una efectividad de tinción utilizando una dosis de 4 % de colorante de *Evilán*, el cual se le comparó con una muestra de yogurt comercial tomada esta como patrón de análisis. Se realizaron análisis bromatológico y microbiológico a las muestras almacenadas. Se obtuvieron resultados como por ejemplo un rendimiento de: 149,2 g de colorante, a partir de 980 g de fruta, es decir un 15,22 % de rendimiento, se obtuvo una tonalidad de color en el yogurt de mora apta para la comercialización y teniendo una vida útil del producto de 4 semanas para su consumo. Dentro de las principales diferencias de esta investigación con la que se plantea realizar esta en la materia prima o fruto a utilizar para la obtención del colorante, en este caso parte del *Evilán*, que además lo emplean en forma de pulpa para la extracción, caso contrario a la *Bixa Orellana* L. la cual se hará de manera entera por contener gran cantidad de bixina en la corteza de la semilla y se perdería parte de esa bixina en un proceso de trituración.

El trabajo de Beltrán [4] está dirigido al diseño de un sistema de costos para una empresa agroindustrial dedicada a la producción de colorantes naturales, utilizando como fuente natural la semilla de onoto, *Bixa Orellana* L., utilizando como metodología el estudio de la estructura de costos de una empresa productora de colorantes en Perú. Persigue establecer el diseño de sistema de costos tomando en cuenta variables de estudio como estacionalidad de la materia prima, capacidad instalada en la planta, exigencia de los clientes de llevar la trazabilidad del producto. Se reflejan estadísticas mundiales en la producción de la materia de *Bixa Orellana* L., situando como principal productor a Brasil con 33 % del aporte mundial y Venezuela con 2 % ubicándose entre el sexto y séptimo lugar. Se describe brevemente la técnica industrial de extracción de bixina usando metanol como solvente. Concluye estableciendo que la producción de la planta cumple con criterios de trazabilidad del producto y que el costo por órdenes de producción en las

empresas tiene incidencia sobre la determinación del costo de producción. Este trabajo anterior se analiza el sistema de costos en una empresa de colorantes naturales, además como sus unidades de proceso y métodos de extracción usando metanol como solvente, referencias importantes para esta investigación, pero que no aborda el estudio de otros solventes para la extracción de la bixina así como el análisis con materia prima de Perú y no de Venezuela la cual será objeto de estudio.

La investigación de Rey [5] está dirigida a la extracción de tocotrienoles a partir de la semilla de la *Bixa Orellana* L. como antioxidante natural usando CO₂ súper crítico como solvente de extracción. El CO₂ supercrítico es el fluido adecuado para la extracción de tocotrienoles provenientes del achiote, ya que gracias a su punto crítico (34°C y 78.2 atm) permite trabajar en condiciones de operación fáciles de alcanzar, evitando así la degradación de compuestos que son sensibles a las altas temperaturas, además el CO₂ es un solvente inodoro, no tóxico y no inflamable. Los objetivos fueron establecer las condiciones adecuadas de presión y temperatura en el proceso de extracción, caracterizar las fracciones obtenidas, encontrar los rendimientos que presenta el proceso de extracción de tocotrienoles contenidos en la semilla del achiote. Se pudo confirmar la presencia de tocotrienoles y tocoferoles en la *Bixa Orellana* L., Se demostró que los extractos obtenidos en el proceso presentan una capacidad antioxidante relevante, el extracto soluble que se puede obtener es de 8.34 % del peso de las semillas del onoto. Se utiliza un método de extracción de componentes presentes en la especie *Bixa Orellana* L. como lo son los tocotricerolos como elementos antioxidantes, básicamente dirigidos a la salud, aunque usan la misma materia prima de estudio, difieren en solvente utilizado, y componente principal a extraer, sirve de utilidad a esta investigación debido a el aprovechamiento de subproductos que pueda tener la *Bixa Orellana* L. despues de retirar la bixina.

2.1. Onoto

El onoto es un colorante natural extraído del pericarpio de las semillas de *Bixa Orellana* L.; la

Bixa Orellana L es una valiosa planta medicinal conocida popularmente como “sinduri” o “árbol de lápiz labial”. La cubierta de la semilla de onoto produce comercialmente tinte, un pigmento naranja rojo conocido como *bixina*, así como la “norbixina” que se usa principalmente en la industria láctea, la industria de la medicina y la industria textil y para la alimentación animal. Esta especie se utiliza en la producción de fitoquímicos como flavonoides, esteroides, taninos, bisulfato y aceites esenciales. Se ha informado que el sinduri se usa para tratar problemas de la piel, enfermedades hepáticas, hepatitis, trastorno de la próstata, como diurético y como antioxidante. Das *et al* [6] en una revisión de la germinación de la *Bixa orellana* L. afirman que se propaga comúnmente a través de semillas para el cultivo a gran escala. Pero la cubierta de la semilla se caracteriza por una testa impermeable al agua. Por lo tanto, es muy difícil germinar y también contiene menos del 40 % de humedad, que es la causa principal de la germinación lenta. La germinación se puede aumentar mediante el uso de varios pretratamientos con agua, hormonas, reguladores de crecimiento, estiércol, ácidos, etc.

El onoto (*Bixa orellana*) es un colorante importante domesticado en el neotrópico, aunque no está claro dónde o de qué poblaciones silvestres. Ambrósio Moreira *et al* [7] revisaron la información biológica, arqueológica y etnográfica disponible sobre el onoto, y la integraron con recientes observaciones etnobotánicas de poblaciones cultivadas y no cultivadas para evaluar la hipótesis de que lo que se clasifica como *Bixa urucurana* es el ancestro silvestre del onoto cultivado. La mayoría de las poblaciones de *Bixa urucurana* de la Amazonía ocurrieron en bosques abiertos o paisajes antropogénicos, aunque nunca se cultivaron, y siempre se asociaron con ambientes ribereños. Mientras que el onoto cultivado siempre produce abundante pigmento, las poblaciones de *Bixa urucurana* contenían cantidades variables de pigmento, desde muy poco hasta casi la cantidad en onoto cultivado, lo que sugiere un flujo de genes desde cultivados hasta no cultivados. *Bixa urucurana* tiene frutos indehiscentes, que indican cambios en la dehiscencia durante la domesticación

del onoto, una característica notable que rara vez se encuentra en otras especies arbóreas.

Los residentes locales identificaron las poblaciones no cultivadas como onoto silvestre, y destacaron sus frutos más pequeños con menos pigmento, su regeneración espontánea, su uso, y que se hibridizan con achiote cultivado. La etnografía identificó la importancia simbólica del onoto, pero una mención explícita del origen solo proviene del sur de la Amazonia. Aunque el registro arqueológico más antiguo del onoto provino del Caribe, la domesticación se produjo en el norte de América del Sur, ya que *Bixa urucurana* no ocurre en el Caribe. El conocimiento y la morfología ecológicos tradicionales identificaron la estrecha relación entre *Bixa urucurana* (nunca cultivada) y *Bixa orellana* (siempre cultivada). La evidencia reportada por Ambrósio Moreira *et al* [7] apoya fuertemente la sugerencia de que *Bixa urucurana* Willd es una variedad de *Bixa orellana* L. lo que identifica al ancestro silvestre del achiote cultivado.

El estudio de Gallardo-Cabrera y and Rojas-Barahona [8] evalúa el efecto de la luz y la temperatura sobre la estabilidad de una formulación acuosa de norbixina. Sus resultados de los estudios de fotoestabilidad forzada mostraron que las muestras con una concentración alta de norbixina (5,58 %) no sufrieron descomposición. La descomposición de la norbixina promovida por la temperatura se ajustó a un modelo lineal y se observó un cambio significativo de color a los 12 meses cuando la concentración de norbixina restante fue del 4,42 %. Los hallazgos mostraron que las altas concentraciones son un factor protector contra la fotodegradación y la vida útil de norbixina en formulación acuosa fue de 12 meses a 30°C.

Este arbusto tiene follaje en todas las épocas del año (arbusto perenne), posee una altura de 2 a 6 m; tiene una copa baja y extendida, el tallo es pardo y se caracteriza por ramificarse a poca altura del terreno en donde ha sido cultivado. Sus hojas son simples y grandes, alrededor de 6×4 cm, y base redondeada, verdosas claras, con márgenes lisas; sus flores poseen forma de ramillete con pelos glandulares [5]. Se trata de un árbol hermafrodita cuyo fruto es una cápsula roja, de 2 a 6 cm

de largo, con pelos gruesos espinosos, de color morado (varía la tonalidad según su variedad), que al madurar pasa a pardo rojizo oscuro. En cada valva o cápsula hay entre 10 y 50 semillas

Tabla 1: Composición química de la semilla de onoto

Compuesto	Concentración (% peso)
Carbohidratos Totales	47,90
Fibra Cruda	13,85
Almidón	13,17
Proteínas	12,82
Humedad	11,92
Pentosanos	11,35
Azúcares Totales	9,76
Extractos	5,22
Carotenoides totales	1,48
Pectina	0,35
Ceniza	6,92

Fuente: Rey [5]

La Tabla 1 muestra la composición de las semillas de onoto donde se destacan carotenoides (bixina y norbixina), además que contiene saponinas, compuestos fenólicos, aceites fijos terpenoides y tocotrienoles.

2.2. Colorantes

El color es un personaje sensorial a menudo pasado por alto que sin duda influye en la percepción del sabor. Los pigmentos que colorean los alimentos generalmente son inestables y se modifican durante el procesamiento. Para mantener o restablecer la uniformidad del color del producto, los colorantes, considerados en todo el mundo como aditivos alimentarios, se agregan intencionalmente a los productos alimenticios. El mercado de aditivos alimentarios naturales ha estado creciendo de manera extensa desde el siglo pasado debido a los peligros potenciales de los aditivos alimentarios artificiales y los beneficios potenciales de los compuestos biológicamente activos. El trabajo de Solymosi *et al* [9] proporciona una descripción de los colorantes más importantes de origen natural, así como información sobre las moléculas de coloración menos comunes y/o prometedoras.

El color es una propiedad del material relacionada directamente con el espectro de la luz y que, por lo tanto puede medirse físicamente en términos de energía radiante o intensidad, y por su longitud de onda. El color también puede definirse como “la parte de la energía radiante que el humano percibe mediante sensaciones visuales que se generan por la estimulación de la retina del ojo”. La calidad de un alimento, sin tomar en cuenta los aspectos sanitarios, toxicológicos y nutricionales, se basa en los siguientes parámetros: color, sabor, olor, y textura. Sin embargo, el primer acercamiento del consumidor es por su color, ya que relaciona lo adecuado con la aceptación o rechazo [1]. Los colores de los alimentos se deben a diferentes compuestos, principalmente orgánicos, algunos de los cuales se producen durante su manejo y procesamiento, sin embargo, la mayoría de los alimentos deben su color a las sustancias pigmentantes que contienen o se añaden. Muchos pigmentos también se extraen de su fuente natural y se emplean como colorantes en la elaboración de un gran número de alimentos.

Los pigmentos según la F.D.A. es cualquier material que imparte color a otra sustancia obtenida por síntesis o artificio similar, extraída o derivada, con o sin intermediarios del cambio final de identidad, a partir de un vegetal, animal, mineral u otra fuente y que cuando es añadido o aplicado a alimentos, medicamentos o cosméticos, es capaz de impartir color por sí mismo. Los pigmentos se pueden dividir en sintéticos y naturales.

2.2.1. Colorantes sintéticos

Los pigmentos sintéticos requieren de una certificación; incluyen sustancias químicas sintetizadas con alto grado de pureza. Los principales son

- **Azoicos:** Su estructura es de mono, di o triazo. Producen casi todos los colores, se caracterizan por tener un grupo cromóforo ($-N=N-$);
- **Antraquinonas:** Su estructura tiene uno o más grupos carboxilo en un sistema de anillos conjugados, con al menos tres anillos condensados.

Debido a la preocupación por la seguridad en el uso de pigmentos sintéticos, estos se han estudiado exhaustivamente con respecto a su efecto sobre la salud. En general, en alimentos sólo se aceptan nueve pigmentos sintéticos, con severas restricciones de uso [1]. Estos son

- **Tartracina:** Autorizado para usarse en más de 70 países. Es ampliamente usado en repostería, productos cárnicos, sopas instantáneas de vegetales en conserva, helados, caramelos, bebidas no alcohólicas. Puede producir alergia en el 10 % de los consumidores;
- **Amarillo anaranjado S:** se utiliza para bebidas no alcohólicas, helados, caramelos y postres entre otros. No autorizado en Norteamérica pero si en Europa;
- **Azorrubina:** No autorizado en Norteamérica pero si en Europa, se emplea principalmente en caramelos;
- **Rojo Ponceau:** se emplea para producir el color fresa de caramelos y productos de repostería, así como en productos cárnicos en lugar del pimentón;
- **Negro brillante:** en Europa se emplea para productos de imitación en caviar, no se autoriza su uso en Estados Unidos, Canadá ni Japón;
- **Amarillo de quinoleína:** se autoriza su uso en Europa para aplicación en bebidas de naranja, bebidas alcohólicas, repostería, conservas vegetales, helados y productos cárnicos;
- **Eritrosina:** muy usado en productos lácteos con sabor a fresa, en mermeladas, caramelos y productos cárnicos. Debido a su alto contenido de yodo puede ser nocivo por su acción sobre la tiroides, por lo que en Europa no está autorizado en alimentos dirigidos a niños;
- **Indigotina:** autorizado a nivel mundial, se emplea en bebidas no alcohólicas, caramelos, confitería y helados;

- **Azul V:** se utiliza en conservas vegetales, mermeladas, repostería, caramelos y bebidas para lograr tonos verdes al combinar con colorantes amarillos (Badui, 2006).

2.2.2. Colorantes naturales

Son generados por microorganismos, vegetales, animales, o minerales. Representa 940 millones de dólares en ventas en el mercado mundial de colorantes al año, y debido a la precaución del consumidor por el consumo de productos que no alteren o ayuden a su salud, crece alrededor de 4 % al año. Los pigmentos naturales son aquellos obtenidos de fuentes presentes en la naturaleza, usados para impartir color en algunos productos. Son sujetos a las mismas pruebas de calidad y seguridad toxicológica que los sintéticos, pero la FDA y otras agencias gubernamentales no requieren que se certifique su pureza química, y por tanto se refiere a ellos como aditivos de color no certificados.

La demanda de onoto y otros colorantes naturales en Europa viene en notable crecimiento, esto debido a que el consumidor promedio europeo prefiere los productos naturales en oposición a los sintéticos o artificiales, esto motivado por la tendencia mundial respecto al medio ambiente, la pérdida de biodiversidad y problemas relacionados con la salud del consumidor [4].

Tabla 2: Producción mundial de semilla de onoto, año 2010

País	Toneladas métricas
Brasil	7.500
Perú	4.800
África Central	4.000
Kenya	3.500
Otros	1.200
República Dominicana	1.000
Guatemala	500
Venezuela	400
Total	22.900

Fuente: Beltrán [4]

La Tabla 2 muestra la producción mundial de este rubro, onoto (*Bixa Orellana* L.) siendo América y

África las principales fuentes generadoras de esta materia prima.

2.3. Bixinia

La Bixinia es un ácido carboxílico carotenoides y tiene sabor insípido, por lo que es adecuado para dar color a las comidas, arroz, margarina, quesos y bebidas en general. Además se usa en productos cosméticos con el mismo fin, es de estructura amorfa y fácilmente soluble en alcohol caliente. La fórmula química de la bixina es $C_{25}H_{30}O_4$.

La bixina tiene una masa molar de 393,96 gramos por mol y su concentración se lee a una longitud de onda de 480 nm [10].

El pigmento está localizado en la superficie de la semilla. Como una cubierta resinosa y aceitosa, está formado fundamentalmente por bixina (cis y trans), con trazas de norbixina, éster de dimetil bixina y otros pigmentos carotenoides [4].

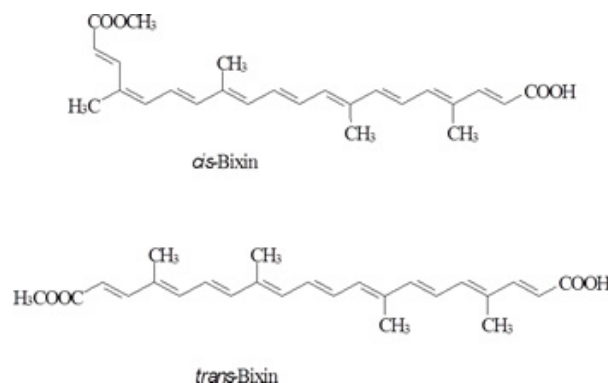


Figura 1: Estructura química de la bixina

La Figura 1 muestra la estructura química de la bixina en sus posiciones Cis y Trans, posee una cadena carbonada de 20 átomos de carbono y se aprecia que el grupo funcional principal es un ácido carboxílico, correspondiendo a su naturaleza de compuesto orgánico.

La bixina es un colorante natural que es usado actualmente como sustituto de algunos colorantes de origen sintético, como la eritrosina y la geranina, por lo que su uso en alimentos es permitido por su comprobada y total inocuidad [10]. Los usos más comunes son: En la industria alimentaria, para coloración de mantequillas y margarina, en la coloración de quesos y derivados, coloración de

aceites, helados y harinas, coloración de galletas, tortas, y panetones; coloración de salchichas, sopas instantáneas, embutidos, bocaditos y chorizos. En la industria cosmética, para colorear esmaltes de uñas, lacas, bronceadores, lápices de labios, etc. En la industria textil, se emplea para teñir fibras naturales como el algodón, lana, seda, lográndose distintas tonalidades. Otras industrias: en coloración de cueros, betunes, cera para pisos, barnices para muebles, jabones, y como colorante para maderas.

2.3.1. Nor-Bixina

El extracto primario de la Bixa Orellana L. contiene a su vez la Nor-bixina, una sal sódica o dipotásica. Como sal disódica posee una masa molar de 423,94 gramos por mol y como sal dipotásica 456,2 gramos por mol [10].

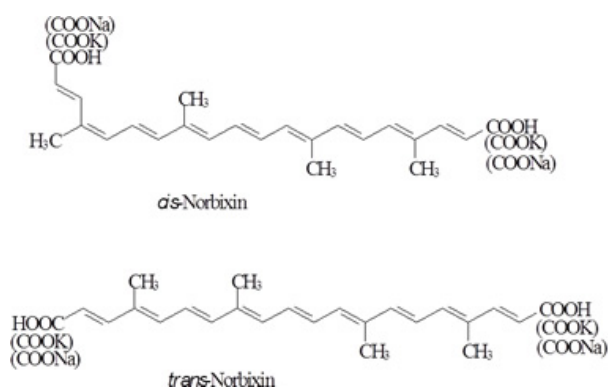


Figura 2: Estructura química de la Nor-bixina

La Figura 2 muestra la estructura química de la nor-bixina en sus posiciones Cis y Trans, donde presenta una cadena carbonada de 20 átomos de carbono y donde el principal grupo funcional es un ácido carboxílico, que también corresponde por su naturaleza a un compuesto orgánico.

2.3.2. Carotenoide

Son un grupo numeroso de pigmentos muy difundidos en los reinos vegetal y animal, producen colores que van desde el amarillo hasta el rojo intenso. Se han identificado en la naturaleza más de 600 de estos compuestos, y se estima que anualmente se sintetizan 100.000 toneladas de carotenoides de fuentes naturales [1]. Debido

a que los carotenoides son solubles en lípidos o en solventes como el hexano o el éter de petróleo se obtienen por métodos de extracción. Casi todos son estables a los álcalis, por tanto pueden purificarse por saponificación para liberar la fracción pigmentante de otras fracciones como proteínas y carbohidratos.

2.3.3. Estracción de bixinia

En la actualidad, una alta proporción de carotenoides se obtienen sintéticamente, ya que resulta más factible desde el punto de vista económico; sin embargo, debido a las restricciones legislativas, cada vez se emplean más los de origen vegetal [1].

Esta tendencia de uso de colorantes de origen natural, lleva a este trabajo de investigación a perfilar un método de extracción y proceso productivo en el cual permita enmarcar el colorante a obtener como un producto natural, tolerable con la F.D.A. y amigable con el medio ambiente. El onoto es una de las principales materias primas para la producción de colorantes naturales. Su industrialización requiere conocimiento tecnológico para permitir la obtención de colorantes a bajo costo, con los mayores rendimientos y con una calidad aceptable que permita competir en los mercados nacional e internacional. Se conocen diversas formas de extraer el colorante de las semillas de achiote, desde técnicas artesanales hasta técnicas industriales [4].

Los colorantes se encuentran entre los aditivos más comunes utilizados principalmente para intensificar, compensar o agregar color a los productos manufacturados. El principal color detectado en las semillas de onoto proviene de los carotenoides bixina y norbixina, según el método de extracción. el trabajo de Santos *et al* [11] presenta caracterizaciones espectroscópicas de absorción y fluorescencia de onoto extraídos en soluciones acuosas a partir de semillas del arbusto tropical Bixa orellana L. Santos *et al* [11] realizaron las extracciones utilizando una solución acuosa (a 98°C) con diferente potencial de valores de hidrógeno (pH 6.5–11.2), y compararon los resultados con los obtenidos con métodos de extracción química usando otros solventes;

determinaron los parámetros termoópticos, como el coeficiente de temperatura del índice de refracción (dn/dT), la difusividad térmica (D), la carga térmica de la fracción (ϕ) y el rendimiento cuántico (η) para las soluciones de onoto.

Giridhar *et al* [12] justifican los desarrollos en la extracción de tintura de onoto, los esfuerzos para mejorar el rendimiento del extracto, aspectos de estabilidad del color de onoto en los productos alimenticios, métodos potenciales viables para ser empleados con mejores perspectivas económicas, que serán útiles para los posibles emprendedores.

Se conocen diferentes métodos para la obtención de colorante bixina a partir del onoto, según Beltrán Ramírez establece los siguientes procesos a nivel industrial, los cuales resultan ser los más empleados por las ventajas que ofrece. “Los métodos de extracción utilizados para la producción de colorantes de achiote a partir de la semilla pueden envolver la producción de bixina, a través de la hidrólisis acuosa, la extracción simultánea de norbixina. En escala comercial, tres métodos básicos son usados para extraer el pigmento de las semillas: a) extracción alcalina, que resulta de la conversión del carotenoide encontrado en la semilla del achiote, en una forma de éstermonometílico liposoluble a hidrosoluble, o sea, sal de norbixina; b) extracción en óleo (aceite), que resulta en la remoción de la bixina de las semillas además de pequeñas cantidades de otros materiales coloridos; c) extracción con solvente, que resulta en la forma más pura del pigmento de bixina” [4].

Solventes en estudio. En el presente trabajo de investigación se empleará el tercer método mencionado anteriormente, una extracción de bixina a partir de la semilla de onoto empleando un solvente adecuado a los requerimientos de toxicidad, rendimiento, costo e impacto con el medio ambiente. Dentro de los solventes a estudiar para el proceso de extracción se tienen N-hexano, Hidróxido de potasio, Etanol y Acetato de etilo.

Extracción. Es una operación unitaria de transferencia de masa basada en la disolución, de uno o de varios de los componentes de una mezcla (líquida o que forme parte de un sólido) en un

disolvente selectivo. Se hace la distinción entre la extracción sólido-líquido y la extracción líquido-líquido según la materia a extraer este en un sólido o un líquido, respectivamente. En este caso, obviamente, el disolvente ha de ser inmiscible con la fase líquida que contiene el soluto [13].

Lixiviación. Es un proceso de separación, esta técnica se utiliza para disolver materia soluble a partir de su mezcla con un sólido insoluble. El material soluble separado generalmente es mayor que el lavado por filtración. En el proceso de lixiviación las propiedades del sólido pueden variar, si se alimentan sólidos del tipo gruesos, duros o granulados, se desintegran para formar una pulpa cuando el contenido del material soluble es retirado. Con sólidos impermeables o materiales que se desintegran durante la lixiviación los sólidos se dispersan en el solvente y después se separan de éste [14]. Este proceso involucra una operación de transferencia de masa por lo que es indispensable que exista un contacto íntimo entre el solvente y el soluto contenido en el sólido. La lixiviación es empleada para la mezclas de sustancias biológicas, compuestos orgánicos y compuestos orgánicos en forma sólida, para extraer componentes o purificar, para realizar lavados en procesos con agua, entre otros. También es conocido con otras denominaciones como extracción o infusión. Es empleada en la industria de alimentos entre otras cosas, para la obtención de azúcar a partir de la de remolacha empleando agua caliente como solvente extractor; en la extracción de aceites vegetales mediante el uso de hexano, acetona, éter; café instantáneo (15 a 30 %; 60 %; partículas de 300 μm y 0,2 kg/m^3); té instantáneo (de 5 a 20 %, 40 %).

La Figura 3 muestra un esquema básico de un proceso de lixiviación en la industria en donde se aprecia una entrada para la carga de sólidos, una entrada para el solvente extractor y un diseño cóncavo de tanque para la facilidad en la extracción.

3. Metodología

3.1. Reactivos, materiales y equipos utilizados

Reactivos:

N-Hexano (C_6H_{14}) al 96 % marca Merck;

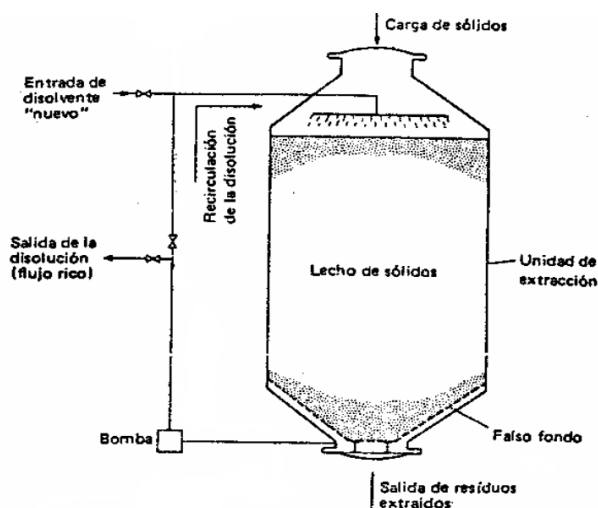


Figura 3: Esquema de un proceso de lixiviación por batch

Etanol (C_2H_6O) al 37 % marca Merck;
Hidróxido de potasio (KOH) al 99 % marca Merck;
Acetato de etilo ($C_4H_8O_2$);
Agua destilada (H_2O);
Ácido clorhídrico (HCl) al 37 % marca Merck.

Equipo:

Espectrofotómetro UV- Visible. Marca HP.
Modelo 8452^a.

Muestra. La materia prima utilizada Bixa Orellana L. (Onoto), en cápsula o vaina, del tipo conocido como onoto criollo, es proveniente de la comunidad del Pernal, municipio Falcón, Tinaquillo, Estado Cojedes el cual posee una superficie geográfica de 15884,41 km², con coordenadas de latitud 9°41'08" y longitud 68°20'50"; limita al NORTE con la Quebrada La Guabina, al SUR con el río Tinapun, el ESTE con el sector la Guamita y al OESTE con el sector Sabaneta. El onoto fue previamente cosechado y expuesto al sol dentro de su cápsula.

3.2. Diseño de la investigación

A continuación se plantean las fases para llevar a cabo el desarrollo sistemático de la investigación.

Fase 1 Análisis de parámetros como pH y textura del suelo en estudio donde se encuentra

la planta de Bixa Orellana L. en el sector del Pernal, Tinaquillo, municipio Falcón del Estado Cojedes;

Fase 2 Selección del solvente a utilizar para la extracción de la bixina a partir de la semilla de onoto (Bixa Orellana L.) basado en criterios de solubilidad y toxicidad;

Fase 3 Caracterización del extracto de bixina obtenido mediante el (los) solvente(s) seleccionado(s);

Los análisis de pH han sido reportados en los apendices del trabajo de Camacaro y Gómez [15]. Estos resultados serán comparados con las referencias bibliográficas recomendadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, INIA, en Maracay, Estado Aragua, Venezuela (ver Manual [16]). Para la selección del solvente se usaron los resultados en [17].

4. Resultados

4.1. Análisis de parámetros de pH y textura del suelo

De las mediciones de pH realizadas en el laboratorio de cada una de las muestras de suelo, siguiendo el método Boyoucus, el rango obtenido fue de 5,36 a 6,143; con un valor promedio de $(5,653 \pm 0,010)$ adim. (Ver Apéndices A y B en [15]); manteniendo un pH ácido en todo momento.

Según los estudios realizados en el I.N.I.A. el resultado del análisis de pH a la muestra de suelo compuesta fue 5,7 (Adim.). De acuerdo a estos resultados de pH obtenidos, tanto en análisis propios de laboratorio como en análisis externos (I.N.I.A.) el suelo donde se cultivó la planta de Bixa Orellana L. se encuentra en un valor aceptable, esto de acuerdo a parámetros manejados por el manual técnico del achiote del CNTFA. Las mejores plantaciones de Bixa Orellana L. se encuentran normalmente en suelos con un pH comprendido entre 5 y 7,5; aunque esta planta es capaz de soportar suelos con pH entre 4,3 y 8,7.

4.2. Análisis y determinación del tipo de suelo

La tabla 3 presenta los porcentajes de granulometría obtenida en las muestras de suelo compuesto, donde crece la planta de Bixa Orellana L. en estudio, analizadaa en el I.N.I.A., Aragua.

Tabla 3: Análisis % de tipo de textura de suelo de la muestra compuesta realizado por el I.N.I.A.

Análisis mecánico	
Arena	60
Arcilla	14
Limo	26

En materia del tipo de suelo se puede afirmar que, de manera general la planta de onoto se adapta bien a las diferentes clases de suelos siempre que tengan buen drenaje, que sean profundos, franco arenosos y de textura liviana. La planta de Onoto como todo organismo vivo responde a las buenas condiciones donde se desarrolla. Si se cultiva en suelos profundos, fértiles y con buen drenaje interno y externo, sin compactación que afecte el crecimiento y desarrollo radicular, se tendrá buenos rendimientos; pero si se cultiva en terrenos pobres, erosionados, con poca fertilidad los rendimientos son menores.

4.3. Determinación de cantidad de semillas contenidas por cápsula de Bixa Orellana L.

Las plantas cosechadas y utilizadas para el procedimiento de extracción de la bixina arrojaron un promedio en masa de $M = (2,9922 \pm 0,0005)$ g,

Es importante la cantidad de masa contenida en las cápsulas pues arroja datos importantes sobre rendimiento del cultivo en el campo y de la cantidad estimada de colorante que se puede obtener a partir de una cosecha, a su vez permite el establecimiento de criterios o parámetros de control de calidad en la recepción de materia prima y de adquisición de la misma por parte del industrial hacia el productor agrícola.

Uno de los criterios que pudiese establecerse es el rendimiento de semillas por cápsula cosechada, y establecer parámetros de rechazo u aprobación de esa cápsula para ser adquirida por parte del

industrial que elabora el colorante. Con una muestra apreciable y compuesta de cápsulas de una cosecha a adquirir, la masa de semilla debería estar alrededor de $(2,9922 \pm 0,0005)$ g para poder así ser adquirida.

Es importante la adquisición de la materia prima en cápsula, pues es necesario garantizar el máximo aprovechamiento de bixina contenida en las semillas de Bixa Orellana L.; al estar la bixina en la superficie de la semilla, puede fácilmente perderse parte de la misma sino se le da un trato apropiado al momento de ser cosechada, por ende la vital importancia de controlar la masa encapsulada, y así darle un trato adecuado en el proceso de recolección y almacenamiento de la materia prima.

4.4. Selección de solventes

La selección del solvente a utilizar para la extracción de la bixina a partir de la semilla de onoto (Bixa Orellana L.) está basada en criterios de solubilidad y toxicidad. Al estudio realizado de las muestras patrón en remojo con cada uno de los solventes en estudio respectivamente (KOH al 2 %, n-hexano, acetato de etilo y etanol) se le hizo un primer descarte visual a aquellos viales donde no hubo mayor extracción durante el remojo de una hora, quedando para un segundo estudio de absorbancia vs longitud de onda mediante el equipo UV-visible, las muestras en presencia de n-hexano y KOH por tener una mayor extracción.

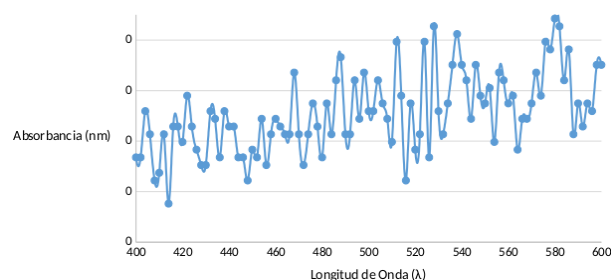


Figura 4: Absorbancia en función de la longitud de onda del N-Hexano al 96 % p/v

La Figura 4 presenta el comportamiento de la muestra n-hexano blanco, cuya composición es n-hexano al 96 % y es empleado como referencia para la futura lectura de la solución muestra patrón en n-hexano. Esta grafica guarda concordancia

con las señaladas de n-hexano en bibliografías y referencias, correspondiéndose exitosamente la obtenida experimentalmente con la teórica.

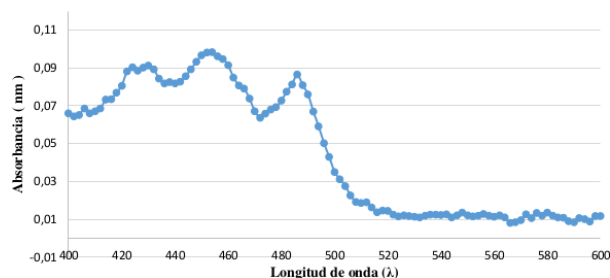


Figura 5: Absorbancia en función de la longitud de onda del N-Hexano al 0,1040 % p/v (N-Hexano muestra patrón)

La Figura 5 da el comportamiento de la muestra patrón en n-hexano, detallando su absorbancia en función de la longitud de onda. En dicho barrido se puede observar que para una longitud de onda de 454 λ , presenta una absorbancia de 0,0098 nm a una concentración de $(0,1040 \pm 0,0004) \% p/v$.

La bixina es un ácido carboxílico que, al agregarle un álcali acuoso, forma sales del álcali solubles en agua, lo cual hace posible extraer fácilmente el colorante, por ende el KOH (al 2 %) por ser un agente alcalino en medio acuoso presenta grandes potencialidades para esta extracción.

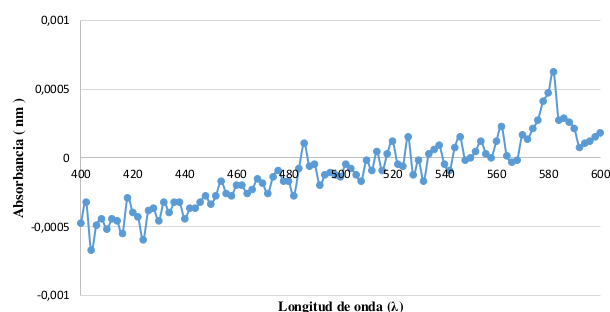


Figura 6: Absorbancia en función de la longitud de onda del Hidróxido de potasio al $(2,0000 \pm 0,0006) \% p/v$

La Figura 6 muestra la absorbancia en función de la longitud de la muestra patrón de KOH al 2 % utilizado como blanco referencial para la evaluación en el UV-visible antes de correr la

solución formada por la muestra patrón disuelta en KOH al 2 %.

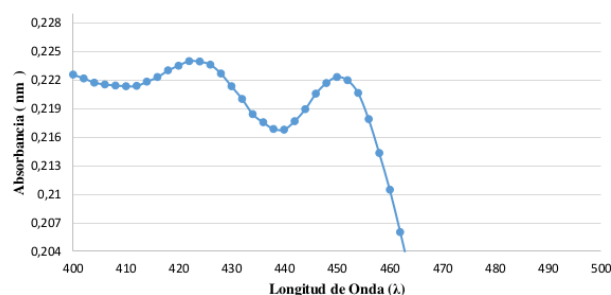


Figura 7: Absorbancia en función de la longitud de onda de la muestra patrón disuelta en hidróxido de potasio al $(0,0684 \pm 0,0002) \% p/v$.

En la Figura 7 se puede observar gráficamente como se manifiestan dos picos importantes de absorbancia, uno a 422 λ y el siguiente a los 450 λ , este último correspondiente al compuesto deseado (bixina) teniendo una mayor absorbancia según la referencia teórica en una longitud de onda entre 450 λ y 460 λ . Para una longitud de onda de 450 λ presentó una absorbancia de 0,2223 nm.

De esta manera claramente se puede tener mayor absorbancia en uso de KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$ y con una concentración $(0,0684 \pm 0,0002) \% p/v$ que en empleo de N-hexano al 96 % y concentración $(0,1040 \pm 0,0004) \% p/v$.

Quedando definido el KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$ como buen solvente extractor de bixina según el estudio realizado y sus incidencias toxicológicas mínimas, además de ser más económico que n-hexano y su empleo en menos cantidades que el acetato de etilo y etanol para una extracción adecuada.

4.5. Caracterización del extracto de bixina obtenido mediante el (los) solvente(s) seleccionado(s)

Una vez seleccionado el solvente más adecuado, hidróxido de potasio, por sus capacidades de extracción en ácidos carboxílicos, su baja toxicidad, su buen comportamiento con la bixina patrón (muestra) utilizada en la industria y su bajo costo en comparación con otros solventes y definida la metodología de procesamiento de la Bixa Orellana

L. (onoto) a través de un ensayo a escala de laboratorio para la obtención de la bixina, se caracteriza el mismo extracto.

4.6. *Análisis de variables en proceso de extracción de la bixina a escala de laboratorio*

Al analizar la incidencia del solvente durante el remojo de la semilla de onoto en el mismo, se pudo constatar que la extracción se realizaba de manera exitosa, sin embargo era necesario un segundo lavado con más solvente para el aprovechamiento máximo de la bixina presente, además de la ayuda de un agente mecánico (agitación) para facilitar la separación que se desarrolló.

Las extracciones se realizaron a diferentes relaciones de soluto solvente (1:1; 1:2; 1:3) respectivamente; a su vez se combinaron diferentes tiempos de remojo para analizar el tiempo de retención óptimo del proceso a escala de laboratorio.

La neutralización ocupa una etapa fundamental del proceso, gracias a ella se lleva a una condición de pH neutro el producto a obtener, y además se forma un precipitado que debería ser la bixina presente en la reacción. Al tener una solución alcalina (bixina disuelta en KOH al 2 %), que se hace reaccionar con un ácido fuerte (HCl al 5 %) se generan dos fases, una sólida la cual corresponde a la precipitación de la bixina y parte de la sal soluble de cloruro de potasio (KCl) que se forma y una fase acuosa donde debería estar presente la Nor-bixina (componente presente en la Bixa Orellana L. soluble en agua).

Este proceso de neutralización y generación de las fases sólida y acuosa se lleva a cabo exitosamente en cada una de las relaciones de extracción en estudio. En el proceso de separación de esta mezcla bifásica se utilizó un mecanismo de succión al vacío con filtrado microporoso, con la finalidad de atrapar la bixina y retirar la mayor humedad posible en esta etapa.

Es necesario resaltar que el producto sólido fue retenido por el material filtrante y la fase acuosa fue contenida en un quitasato, dicho lixiviado era de color naranja o rojizo, lo que nos indica presencia aun de agentes pigmentantes pero solubles en agua,

posiblemente corresponda a la nor-bixina obtenida como subproducto en el proceso de extracción.

Una vez obtenida la fase sólida del producto se dispuso en un horno a 50 °C durante 90 min con la finalidad de retirar la mayor cantidad de humedad restante en la muestra sólida obtenida, y alcanzar así un mayor grado de pureza de soluto extraído. La temperatura fue definida a 50 °C ya que con esa temperatura se garantizaba retiro del agua presente en la muestra y así no degradar las propiedades naturales y pigmentantes del producto.

Tabla 4: Masa final (M_f) del producto obtenido y rendimiento (R) de cada una de las relaciones de extracción en estudio

Muestra	M_f g	R (%)
A11	0,06670 ± 0,00004	4,4428 ± 0,0003
A21	0,06620 ± 0,00004	4,4036 ± 0,0003
A31	0,04070 ± 0,00003	2,7325 ± 0,0002
A12	0,09000 ± 0,00006	6,0092 ± 0,0005
A22	0,04940 ± 0,00004	3,2968 ± 0,0003
A32	0,01820 ± 0,00004	1,2054 ± 0,0003
A13	0,01920 ± 0,00001	1,2707 ± 0,0001
A23	0,06350 ± 0,00004	4,2210 ± 0,0003
A33	0,06320 ± 0,00004	4,2254 ± 0,0003
B11	0,04780 ± 0,00003	3,1769 ± 0,0002
B21	0,15800 ± 0,00009	10,4900 ± 0,0008
B31	0,16370 ± 0,00009	10,8497 ± 0,0008
B12	0,11340 ± 0,00008	7,5752 ± 0,0006
B22	0,11180 ± 0,00003	7,3873 ± 0,0005
B32	0,10460 ± 0,00007	6,9442 ± 0,0005
B13	0,09270 ± 0,00006	6,1542 ± 0,0005
B23	0,10370 ± 0,00006	6,8995 ± 0,0005
B33	0,1787 ± 0,00001	11,8415 ± 0,0009
C11	0,07730 ± 0,00005	5,1178 ± 0,0004
C21	0,11930 ± 0,00008	7,9486 ± 0,0006
C31	0,2459 ± 0,00001	16,3139 ± 0,0012
C12	0,13460 ± 0,00008	8,9110 ± 0,0007
C22	0,15460 ± 0,00009	10,2269 ± 0,0008
C32	0,11960 ± 0,00008	7,9813 ± 0,0006
C13	0,07390 ± 0,00005	4,9136 ± 0,0004
C23	0,08250 ± 0,00006	5,4941 ± 0,0004
C33	0,14880 ± 0,00009	9,9286 ± 0,0008

La Tabla 4 refleja el valor de rendimiento de colorante obtenido luego del secado para cada una de las relaciones de extracción en estudio. En el trabajo [15] se puede constatar los valores de las masas de la celulosa (material filtrante)

antes y después del filtrado, datos de partida para la determinación de la masa final de la muestra obtenida y rendimiento de la relación de extracción.

Una vez finalizado el proceso de extracción, filtrado, secado y obtención de rendimiento, se evalúa cual relación de variables es la más favorable para el proceso de producción de bixina a escala piloto.

Entre esas podemos observar que experimentalmente las extracciones que obtuvieron mayor rendimiento fueron B21, B31, B33, C31, C22.

Las muestras en estudio de la serie C utilizaron 25 % más solvente que la serie B, lo que se traduce en mayor gasto en consumo de solvente para la obtención del producto y con un rendimiento máximo de $(10,2269 \pm 0,0008) \%$; en el caso de la muestra C22 es menor a rendimientos de la serie B por lo que podemos descartar esta muestra C22. Por otra parte la muestra C31 da resultados fuera de los límites de confianza por lo cual este valor estadísticamente no es confiable y se descarta.

Quedando para seleccionar entre B21, B31, B33, se selecciona la relación de extracción B31 ya que tiene mayor rendimiento que la B21 y a su vez la muestra B31 se obtienen en un tiempo menor que el requerido para la relación B33.

La relación de extracción B31 se obtiene a través de una relación soluto, solvente de 1:2; por una determinada cantidad de soluto se emplea el doble de solvente, con 60 min de remojo más 90 min de remojo con agitación.

5. Estudio de la absorbancia del producto obtenido en el equipo UV-visible

La Figura 8 muestra las diferentes soluciones preparadas a partir del producto obtenido disuelto en KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$ y que a su vez son conocidas como solución 1, solución 2, solución 3 y solución 4, cuyas concentraciones están detalladas bajo los cálculos típicos correspondientes.

La Figura 9 muestra el comportamiento de la absorbancia en función de longitud de onda de la solución 1, concentración de $(0,0171 \pm 0,0004) \%$ p/v en empleo de KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$ donde se reflejan pronunciados picos debido a la alta concentración de soluto por solvente utilizado,



Figura 8: De derecha a izquierda solución madre, solución 1, solución 2, solución 3 y solución 4

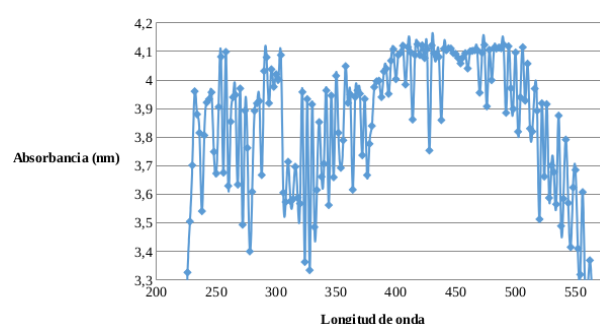


Figura 9: Absorbancia en función de longitud de onda de la solución 1, concentración de $(0,0171 \pm 0,0004) \%$ p/v

no se aprecia claramente la mayor absorbancia por longitud de onda (λ).

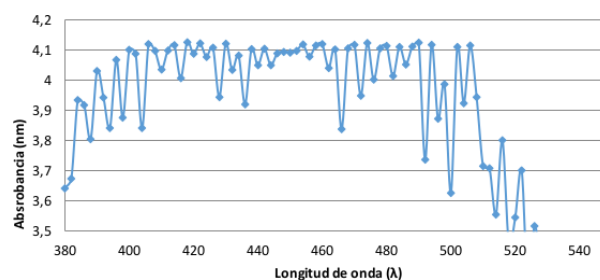


Figura 10: Absorbancia en función de longitud de onda de la solución 2, concentración de $(0,01129 \pm 0,0004) \%$ p/v

La Figura 10 refleja la absorbancia en función de longitud de onda de la solución 2, que tiene una concentración de $(0,01129 \pm 0,0004) \%$ p/v en empleo de KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$, se

puede apreciar menor cantidad de picos que en la Figura 9, debido a que se empleó una mayor dilución pero aun así resulta dificultoso apreciar la mayor absorbancia en función de la longitud de onda.

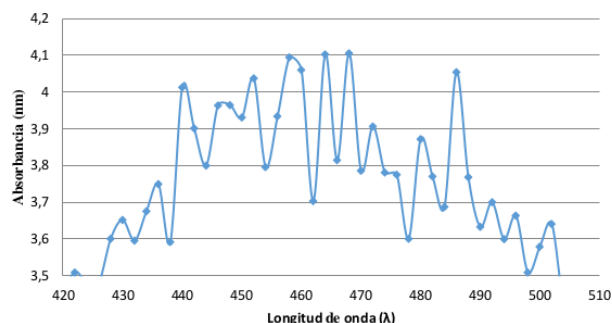


Figura 11: Absorbancia en función de longitud de onda de la solución 3, concentración de $(0,0099 \pm 0,0004) \% \text{ p/v}$

La Figura 11 establece la absorbancia en función de longitud de onda de la solución 3, cuya concentración es de $(0,0099 \pm 0,0004) \% \text{ p/v}$ en empleo de KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$, aunque se puede apreciar menos cantidad de picos debido al aumento de la dilución y curvas más suavizadas aun no refleja un valor claro de absorbancia por longitud de onda.

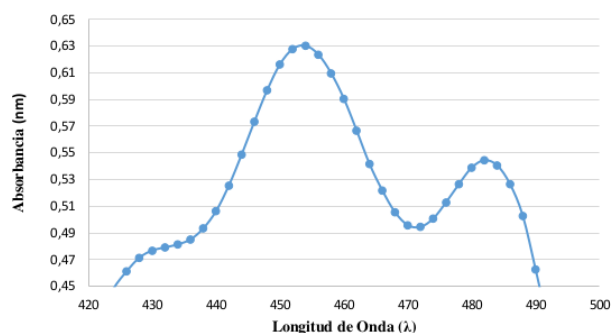


Figura 12: Absorbancia en función de longitud de onda de la solución 4, concentración de $(0,0086 \pm 0,0004) \% \text{ p/v}$

La Figura 12 muestra una relación de Absorbancia en función de longitud de onda correspondiente a la solución 4, cuya concentración es de $(0,0086 \pm 0,0004) \% \text{ p/v}$ en empleo de KOH al $(2,0000 \pm 0,0006) \%$.

A medida que se diluye el producto obtenido en mayor cantidad de KOH se puede observar una mejor representación gráfica, dejando en evidencia la alta pureza de lo obtenido.

En la Figura 12 se puede observar la mayor absorbancia en una longitud de onda de 454λ , ubicándose entre 450λ y 460λ , correspondiendo al valor teórico de longitud de onda de la bixina, pudiendo constar que el producto obtenido corresponde con el producto deseado además de tener un alto grado de pureza al presentar una absorbancia de $0,6302$ y con una concentración de producto en el solvente de $(0,0086 \pm 0,0004) \% \text{ p/v}$.

6. Conclusiones

El tipo de suelo estudiado es franco arenoso y con un pH ligeramente ácido aproximado de $5,7$ ambas condiciones de suelo óptimas para el cultivo de la planta Bixa Orellana L. La cantidad de materia en semillas contenidas por cápsula de Bixa Orellana L. es de $(2,9922 \pm 0,0005) \text{ g}$. El KOH al 2% es el solvente más adecuado para llevar a cabo la extracción de la Bixina a partir de la semilla de Bixa Orellana L. según criterios de afinidad química, rendimiento y toxicidad. Las mejores condiciones de operación para la extracción de la bixina son de 60 min de remojo y 90 min de agitación, además de una relación de $1:2$, soluto-solvente, obtiene así mayor rendimiento de extracción de $(10,8497 \pm 0,0008) \%$. El producto obtenido de la extracción a escala de laboratorio es bixina, debido a que a su mayor valor de absorbancia se presentó a una longitud de onda 454λ , correspondiéndose este valor con los referentes teóricos bibliográficos. La bixina es químicamente neutra, es decir con un pH de 7 ; es soluble en aceite y poco soluble en agua. La bixina aplicada en alimentos no desprende color adquirido una vez puesto el alimento en contacto con agua caliente; logra generar pigmentación en el alimento aplicado, generando así una variación de las características físicas del mismo. La ingesta de alimentos en cuya elaboración se utiliza el producto como colorante no genera efectos secundarios no deseados para la salud del consumidor. Con todo lo anterior, puede diseñarse una planta operativa, con

una meta de producción de 12000 kg de colorante al año.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Cooperativa Arepas y Maíz 062, R.L y en particular al Gerente José Camacaro Rondon por su valiosa colaboración en el desarrollo de este importante proyecto de investigación que contribuye con el desarrollo de nuestro país.

7. Referencias

- [1] S. Baudi. *Química de los alimentos*. Editorial Pearson, México, 4 edition, 2006.
- [2] S. Pérez, M. Cuen y R. Becerra. El achiote. *Revista Biodiversitas*, 46:7–11, 2003.
- [3] L. Narváez. Obtención del pigmento natural del fruto de evilán (*Monnina spp*) para su uso como colorante en yogurt. Trabajo especial de grado, Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Ecuador, 2015.
- [4] C. Beltrán. Diseño de un sistema de costos para una empresa agroindustrial de colorantes naturales – achiote. Trabajo de grado de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, 2014.
- [5] W. Rey. Extracción de tocotrienoles a partir de la semilla del achiote (*bixa orellana*), usando CO_2 supercrítico como solvente. Trabajo especial de grado, Universidad del Valle, Colombia, 2012.
- [6] Alokesh Das, Subrata Mandal, and Sudipa Nag. Seed germination of annatto (*Bixa Orellana L.*)- A review. *International Journal of Recent Scientific Research*, 9(4(j)):26257–26260, 2018.
- [7] Priscila Ambrósio Moreira, Juliana Lins, Gabriel Dequigiovanni, Elizabeth Ann Vease, and Charles R. Clement. The domestication of annatto (*bixa orellana*) from *bixa urucurana* in amazonia. *Economic Botany*, 69(2):127–135, 2015.
- [8] C. Gallardo-Cabrera and A. Rojas-Barahona. Stability study of an aqueous formulation of the annatto dye. *International Food Research Journal*, 22(5):2149–2154, 2015.
- [9] K. Solymosi, N. Latruffe, A. Morant-Manceau, and B. Schoefs. Food colour additives of natural origin. In *Colour Additives for Foods and Beverages*, Food Science, Technology and Nutrition, chapter 1, pages 3–34. WoodHead Publishing, 2015.
- [10] R. Erazo y M. Caso. Diseño de una planta de producción carmín y annato. *Revista Periódica Química, Ingeniería Química*, 3(1):48–56, 2001.
- [11] Letícia F. Santos, Vanessa M. Dias, Viviane Pilla, Acácio A. Andrade, Leandro P. Alves, Egberto Munin, Viviane S. Monteiro, and Sérgio C. Zilio. Spectroscopic and photothermal characterization of annatto: Applications in functional foods. *Dyes and Pigments*, 110:72–79, 2014.
- [12] P. Giridhar, Akshatha Venugopalan, and R. Parimalan. A review on annatto dye extraction, analysis and processing – a food technology perspective. *Journal of Scientific Research & Reports*, 3(2):327–348, 2014.
- [13] J. Costa, C. March, C. García, M. Teixido y A. Mata. *Introducción a los procesos, operaciones unitarias y los fenómenos de transporte*. Editorial Reverte, S.A., España, 2004.
- [14] W. McCabe, J. Smith y H. Peter. *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. Editorial McGraw Hill/Interamericana Editores S. A. de C.V., México, 7a edition, 2002.
- [15] José L. Camacaro F. y José G. Gómez C. Desarrollo de un colorante liposuble a partir de la semilla de onoto (*bixa orellana L.*) como insumo para la industria de alimentos. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2018. Tutor: Lisbeth Manganiello.
- [16] Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, El Salvador. *El Cultivo del Achiote, Bixa Orellana L.*, 2016. Manual Técnico.
- [17] J. Devia y L. Saldarriaga. Planta piloto para obtener colorante de la semilla del achiote (*bixa orellana*). *Revista Universidad EAFI*, 39(131):8–22, 2003.

Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenarios

Isidro A. Pilares Hualpa^{a,b,c}, Néstor Montalvo^c, Abel Mejía M^c, Edilberto Guevara-Pérez^d,
G. Fano M.^c, R. Alfaro A^a

^aFacultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú

^bUniversidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Juliaca, Perú

^cUniversidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

^dInstituto Hidrología Aplicada y Medio Ambiente (IHAMA), Lima, Perú

Abstract.- The objective of the research is to establish a model to evaluate the water availability of the hydrographic unit of the Cabanillas River (2,845 km²) belonging to Lake Titicaca in the Peruvian Altiplano for different scenarios of regionalized climate change. For the hydrological modeling of the regulated water availability of the Cabanillas river basin, the WEAP model was used to evaluate the behavior of the availability for the Lagunillas integral system considering the effects of climate change of the current and future scenario on the storage system and water demands. The regionalized climate scenarios of three (3) global models were used: CANESM2, CNRM-CM5 and MPI-ESM-MR; and two (2) emission scenarios: an intermediate scenario, RCP 4.5; and a pessimistic scenario, RCP 8.5. The model was constructed based on a future scenario projected for the year 2099. The results indicate that only 80 % of the demand of the studied hydrographic unit is satisfied; however, climate change has a positive effect on water inputs, which is manifested in an increase of 15 % to 20 % in water availability for the Integral System of Lagunillas in all scenarios, notably those of CANESM2-RCP4. 5 and CANESM2-RCP8.5.

Keywords: water availability; climate change; WEAP; water demand.

Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano peruano bajo escenarios climáticos regionalizados

Resumen.- El objetivo de la investigación es el de establecer un modelo para evaluar la disponibilidad hídrica de la unidad hidrográfica del río Cabanillas (2,845 km²) perteneciente al Lago Titicaca en el Altiplano peruano para diferentes escenarios de cambio climático regionalizado. En la modelación hidrológica de la disponibilidad hídrica regulada de la cuenca del río Cabanillas utilizando el modelo WEAP para evaluar el comportamiento de la mencionada disponibilidad para el sistema integral de Lagunillas considerando los efectos del cambio climático del escenario actual y futuro sobre el sistema de almacenamiento y demandas de agua. Se usaron los escenarios climáticos regionalizados de tres (3) modelos globales: CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR; y dos (2) escenarios de emisión: un escenario intermedio, RCP 4.5; y un escenario pesimista, RCP 8.5. El modelo se construyó en base a un escenario futuro proyectado para el año 2099. Los resultados indican que solo se satisface el 80 % de la demanda; sin embargo, el cambio climático ejerce un efecto positivo sobre los aportes hídricos, el cual se manifiesta en un incremento del 15 % a 20 % de la disponibilidad hídrica para el Sistema Integral de Lagunillas en todos los escenarios, destacándose los de CANESM2-RCP4.5 y CANESM2-RCP8.5.

Palabras claves: disponibilidad Hídrica; cambio climático; WEAP; demanda de agua.

Recibido: junio 2018

Aceptado: julio 2018

1. Introducción

El cambio climático y el uso de los recursos por las actividades humanas (irrigación, abaste-

cimiento de agua potable, industrias, minería), entre múltiples factores, son los más importantes que se deben considerar para la disponibilidad del recurso hídrico en una cuenca, debido a que el recurso hídrico en el Perú, como en muchas regiones del mundo es cada vez más escaso [1, 2]. El Perú es conocido como un país vulnerable a los efectos nocivos del cambio climático, posee

*Autor para correspondencia: Isidro A. Pilares Hualpa
isidro050854@hotmail.com

siete de las nueve características de vulnerabilidad definidos [3], lo cual refleja un alto grado de exposición a las amenazas dado, por ejemplo, en el desarrollo urbano y de la agricultura no se contemplan los riesgos climáticos a los cuales están expuestos. En cuanto al uso agrícola, el Proyecto Integral Lagunillas, cuya ubicación se muestra en la Figura 1, es uno de los proyectos hidráulicos más importantes del Sur del Perú, que posibilitará la incorporación al riego de 30,844 has distribuidos en diez (10) sectores de riego, con las aguas reguladas del río Ichocollo en el embalse Lagunillas y afluentes del río Cabanillas. El esquema hidráulico del Sistema Integral Lagunillas (SIL), ver Figura 2, el cual está conformado por una Presa de almacenamiento en la laguna de Lagunillas, ya construido y en operación, y diferentes sistemas de captación, conducción y distribución de agua en proceso de implementación, que permitan el riego de los distintos sectores [4].

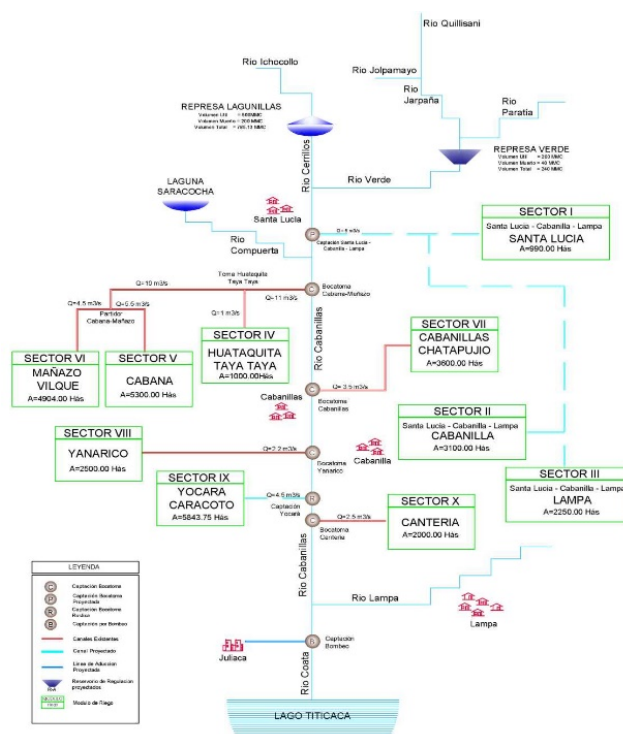


Figura 2: Esquema hidráulico del proyecto integral Lagunillas

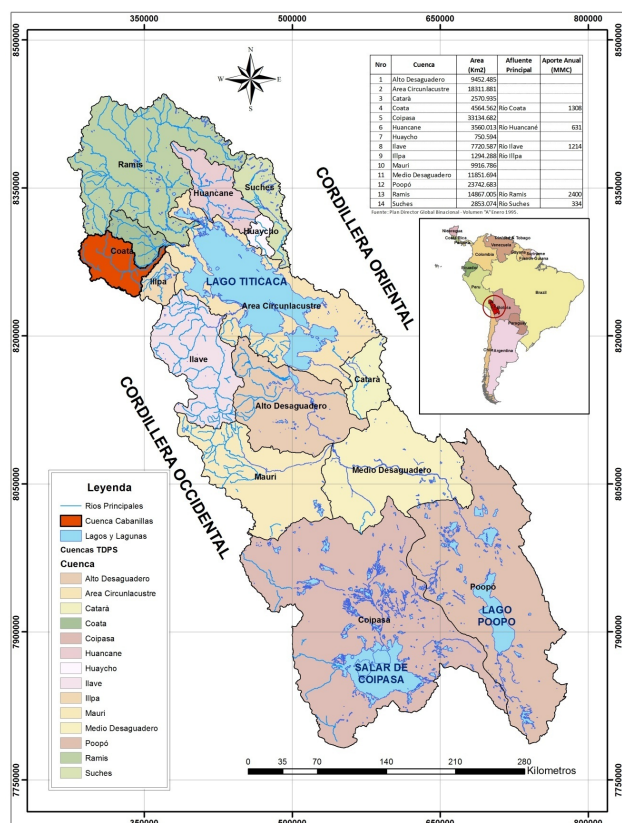


Figura 1: Ubicación geográfica de la Cuenca de Cabanillas

Una de las formas de demostrar los cambios climáticos en la disponibilidad del recurso hídrico es modelando las proyecciones climáticas bajo escenarios de emisiones de Modelos Climáticos Globales (MCG) [5] para acoplar a un modelamiento hidrológico con software para evaluación y planeación del uso del agua, por lo que en este trabajo se aplicó el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning) [6], que es un modelo capaz de realizar escenarios futuros a partir de un escenario actual de disponibilidad, con el ingreso de datos climáticos, caracterización de la cuenca, cobertura vegetal y validación y calibración del modelo entre otros de interés, como lo analizaron en aspectos agrícolas [7], relacionando la incertidumbre socioeconómica [8], impacto de la operación de reservorios [9], y la aplicación del downscaling [10].

La presente investigación tiene por objetivo validar y calibrar los parámetros del modelo hidrológico WEAP, para determinar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cabanillas; así como analizar el efecto de diferentes escenarios del

Cambio Climático sobre la disponibilidad hídrica para la producción agrícola y el abastecimiento de agua potable para la cuenca del río Cabanillas.

2. Antecedentes

En la región Rheraya, Marruecos, Rochdane, *et al.* [11] muestran un incremento en la temperatura de aproximadamente 2–3°C y una reducción en la precipitación del 40–60 % con respecto a la línea de base, concluye que existirá una mayor competencia por las aguas superficiales, y que las demandas domésticas, turísticas, ganaderas y agrícolas no se cumplirán para el año 2100, analizando estrategias de adaptabilidad. Asimismo, en el norte de China, se ha encontrado que la construcción de más embalses puede aliviar la escasez actual de agua y los problemas de agotamiento del agua subterránea [12]; sin embargo, esta opción no es necesariamente la medida más efectiva para resolver problemas de suministro de agua; en cambio, mejorar la eficiencia del riego y cambiar la estructura de cultivo puede ser más efectivo. Maliehe and Mulungu [13] evaluaron dos escenarios, primero para el escenario de referencia, las demandas industriales de Metolong de 1.46 Mm³ y las demandas ambientales de 2.29 Mm³ no se cumplieron; en segundo lugar, para el escenario de la expansión del riego, al aumentar la superficie de riego en 12.3 %, no se cumplieron las demandas de 4.44 Mm³ (irrigación representa el 65.65 % de la insatisfecha). Por lo tanto, el estudio recomienda un plan de riego para la cuenca.

López-García, *et al.* [14] realizaron una modelación con el programa WEAP para determinar el impacto de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en los recursos hídricos en el periodo 2015–2030 en el Valle de Galeana, Nuevo León, México, cuyos resultados muestran que la situación del acuífero con escenarios de cambio climático y con el uso actual del agua es crítica, pues en ambos escenarios analizados se tendrían afectaciones importantes en el acuífero a partir de 2015, ocurriendo un mínima recarga hacia el acuífero de 0.96 y 1.5 % con respecto a su capacidad total durante los meses de lluvia típicos (agosto y septiembre, respectivamente). Considerando el

escenario de adaptación de cambio en sistemas de riego, se espera una ligera recuperación a partir del año 2023, alcanzando un máximo de recarga de 3.11 Mm³ en temporada de lluvia.

Ahmadaali, *et al.* [7] mencionan que el lago Urmia como un lago hiper salino y muy poco profundo, ubicado en el noroeste de Irán, experimenta reducciones de nivel de agua de aproximadamente 40 cm cada año en las últimas dos décadas; los resultados muestran que los valores más altos de los índices de sostenibilidad ambiental y sostenibilidad agrícola están relacionados con el escenario de combinar el cambio del patrón de cultivo con la mejora de la eficiencia total de riego en el escenario de emisiones B1 (B1S4).

3. Materiales e información básica

Para simular la demanda de agua total futura con el modelo WEAP se utiliza la información cartográfica procesada por un Sistema de Información Geográfica (SIG), a fin de obtener las áreas de cuencas y otras características de las mismas. Se utiliza la información de siete (7) estaciones pluviométricas (Tabla 1) y la demanda Hídrica total proyectada del Sistema Integral Lagunillas, dada en la Tabla 2.

3.1. Ubicación

La cuenca del río Cabanillas, se ubica al sur del Perú, en el altiplano de la Región de Puno, ver Figura 1; y tiene una extensión de aproximadamente 2,845 km², unos 338 km de perímetro, y altitudes máxima y mínima de 4,750 y 3,950 msnm, respectivamente.

El río Cabanillas se forma por la unión de los ríos Verde y Cerrillos (Figura 3), este último de régimen regulado por la presa Lagunillas. El río Cerrillos es el efluente del embalse Lagunillas y el río Ichocollo el principal afluente, inicialmente este río toma los nombres de Orduña y Borracho. El río Verde se conforma por la confluencia de los ríos Paratía y Jarpaña, este último inicialmente toma el nombre de Quillisani, tal como se muestra en el esquema hidráulico de la Figura 2.

Tabla 1: Estaciones pluviométricas utilizadas

Estación	Cuenca	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Crucero Alto	Coata	PLU	15°46'01.0	70°55'01.0	4470
Hacienda Colini	Tambo	PLU	15°39'00.0	70°53'00.0	4380
Jarpaña	Coata	PLU	15°34'00.0	70°43'00.0	4250
Lagunillas	Coata	CO	15°46'02.1	70°39'32.4	3970
Pampahuta	Coata	CO	15°29'00.7	70°40'32.8	4400
Paratia	Coata	PLU	15°27'00.0	70°36'00.0	4300
Santa Lucia	Coata	PLU	15°42'00.0	70°36'00.0	4050

Tabla 2: Demanda Hídrica total proyectada del Sistema Integral Lagunillas. Unidades: Q = Caudal m³/s, V = Volumen Hm³

Demanda	Poblacional: Puno, Juliaca y Lampa		Agrícola		Ecológica		Industrial, Minero		Total	
	Q	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q	V
Ene	1.500	4.018	14.012	47.022	2.263	6.060	0.395	1.058	18.170	58.158
Feb	1.500	3.629	7.896	23.934	2.505	6.060	0.395	0.956	12.296	34.578
Mar	1.500	4.018	7.959	26.709	2.263	6.060	0.395	1.058	12.117	37.845
Abr	1.500	3.888	12.634	41.030	2.338	6.060	0.395	1.024	16.867	52.001
May	1.500	4.018	11.764	39.478	2.263	6.060	0.395	1.058	15.922	50.613
Jun	1.500	3.888	11.310	36.729	2.338	6.060	0.395	1.024	15.543	47.701
Jul	1.500	4.018	10.717	35.965	2.263	6.060	0.395	1.058	14.875	47.101
Ago	1.500	4.018	8.918	29.927	2.263	6.060	0.395	1.058	13.076	41.063
Sep	1.500	3.888	11.123	36.122	2.338	6.060	0.395	1.024	15.356	47.094
Oct	1.500	4.018	17.110	57.422	2.263	6.060	0.395	1.058	21.268	68.557
Nov	1.500	3.888	20.889	67.838	2.338	6.060	0.395	1.024	25.122	78.810
Dic	1.500	4.018	20.567	69.018	2.263	6.060	0.395	1.058	24.725	80.154
Media Q	1.500		12.908		2.308		0.395		17.111	
Total	V	47.304		511.193		72.720		12.457		643.674
	%D	7.3		79.4		11.3		1.9		100.0

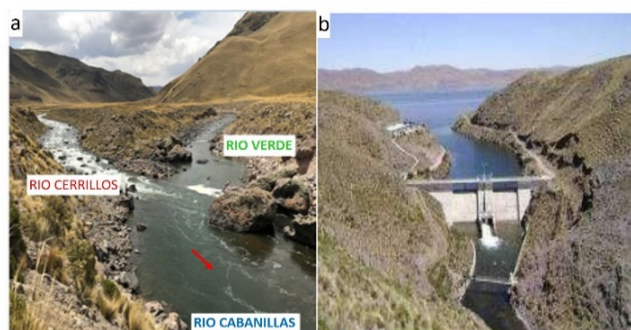


Figura 3: a) Origen del río Cabanillas, b) Presa Lagunillas, salida Río Cerrillos

La presa Lagunillas permite almacenar los recursos hídricos de un área aproximada de 650 km², volumen que se usa para atender las demandas hídricas de uso agrícola para los diez (10) sectores de riego existentes, así como las demandas de

uso poblacional, ecológica, industrial y minera. A todo el conjunto se denomina Sistema Integral de Lagunillas [4].

3.2. Estaciones pluviométricas

Las estaciones pluviométricas en la cuenca del Cabanillas, Tabla 1, se encuentran en zonas en las que se presentan precipitaciones entre las cotas del punto objetivo y las cotas más elevadas, [15].

3.3. Demanda hídrica

La demanda hídrica del Sistema Integral Lagunillas comprende: a) uso poblacional de las ciudades Puno, Juliaca y Lampa, b) ampliación de la frontera agrícola, c) desarrollo industrial - minero y d) demanda ecológica del Sistema Integral Lagunillas, el cual representa una demanda total de 643.674 hm³ año⁻¹, de los cuales el uso agrícola representa el 79.40 % de la demanda

hídrica total del sistema, información presentada en la Tabla 2 [4].

4. Metodología

Las técnicas y procedimientos de análisis en el estudio se pueden diferenciar tres grandes procesos realizados (Figura 4)

- Proceso de modelamiento hidrológico usando el modelo WEAP.
- Proceso de proyecciones climáticas.
- Proceso de generación de escenarios de cambio climático.

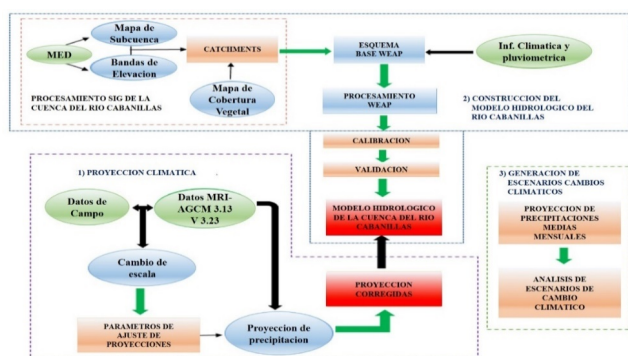


Figura 4: Esquema Metodológico usado en la Investigación

4.1. Modelamiento hidrológico WEAP

Se utilizó el sistema de modelamiento hidrológico Water Evaluation and Planning (WEAP), que posee una interfaz gráfica basada en SIG de la cuenca con el procesamiento:

Mapa de subcuencas. Los mapas de las subcuencas se obtuvieron a partir del Modelo de Elevación Digital (MED) ASTER GDEM 2 con resolución espacial de 30 m. Se agruparon en unidades más amplias, en torno a los principales ríos de la cuenca, a fin de simplificar su modelamiento hidrológico [16]. Se definieron 22 subcuencas, siendo la subcuenca del río Verde y la subcuenca del río Cerrillos las que constituyen el sistema Lagunillas.

Mapa de bandas de elevación. El mapa de bandas de elevación se obtuvo a partir del Modelo de Elevación Digital (MED) ASTER GDEM 2 con resolución espacial de 30 m. La cuenca fue dividida en bandas de elevación, reclasificando el MED de la cuenca.

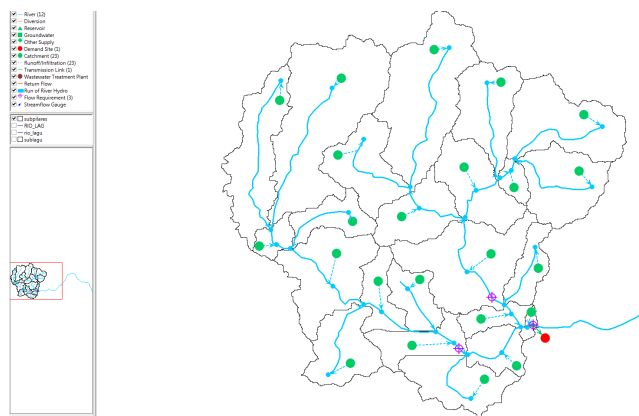


Figura 5: Las 22 subcuencas y red hídrica obtenido por WEAP

Mapa de vegetación y uso de la tierra. La información de la cobertura vegetal de la cuenca elaborada para el Proyecto Especial Lago Titicaca [17], fue agrupada de acuerdo con criterios de clasificación de tipos de cobertura más representativa, lo cual permitió simplificar el desarrollo del modelo [16]. Intersectando los mapas de subcuencas y de bandas de elevación, la cuenca quedó dividida en 22 áreas (porciones), como se aprecia en la Figura 5. Las áreas y perímetros de cada una de estas porciones están dadas en la Tabla 3.

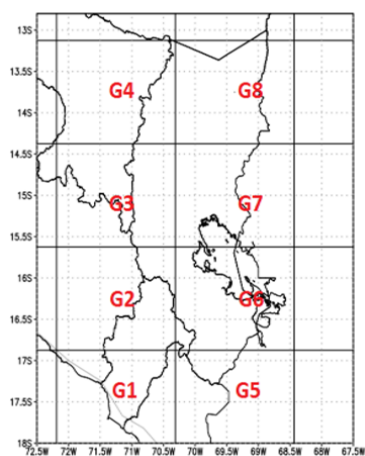
Luego se calcularon las áreas de cada porción y se creó el esquema base dentro de modelo WEAP.

4.2. Proyecciones climáticas

Se utilizó las proyecciones climáticas como punto de partida para definir escenarios climáticos. De la información sobre los modelos de escenarios obtenida para Puno [18], se utilizó el modelo de mejor comportamiento; es decir el HadGEM-ES de precipitación para la región Puno; obteniéndose de ese modo información con las coordenadas para cada una de las grillas para el periodo 2005–2099, como se muestra en la Figura 6 [15].

Tabla 3: Áreas y perímetros de subcuencas del modelo dadas en la Figura 5

Subcuenca	GridID	Área	Perímetro
SC0	1696	185.823	89.134
SC1	1710	233.195	112.854
SC2	1729	116.748	90.988
SC3	1731	123.418	69.306
SC4	1735	87.765	60.967
SC5	1754	17.299	23.349
SC6	1757	85.266	59.855
SC7	1763	86.803	58.558
SC8	1765	94.16	54.481
SC9	1776	70.929	51.516
SC10	1785	149.997	83.760
SC11	1793	45.75	50.219
SC12	1804	20.93	28.353
SC13	1821	115.975	71.345
SC14	1822	38.736	43.733
SC15	1824	43.097	54.481
SC16	1828	75.127	53.184
SC17	1829	26.416	36.877
SC18	1833	6.473	16.122
SC19	1837	41.569	38.359
SC20	1838	44.762	41.510
SC21	1841	52.163	50.590
SC22	1854	79.901	58.373
		1842.3	



G1:	lon.1 = -71;	lat.1 = -17.5
G2:	lon.1 = -71;	lat.1 = -16.5
G3:	lon.1 = -71;	lat.1 = -15.0
G4:	lon.1 = -71;	lat.1 = -13.5
G5:	lon.1 = -70;	lat.1 = -17.5
G6:	lon.1 = -70;	lat.1 = -16.5
G7:	lon.1 = -70;	lat.1 = -15.0
G8:	lon.1 = -70;	lat.1 = -13.5

Figura 6: Coordenadas para cada punto de grillas

Como se ha mencionado, los modelos utilizados para los escenarios son de Circulación General (MCG) regionalizados provenientes de tres (3)

modelos globales (CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y 2 escenarios de emisión (un escenario intermedio: RCP 4.5; y un escenario pesimista: RCP 8.5), con un total de seis (6) escenarios posibles, basados en lo indicado en la referencia [19]. En la Tabla 4 se dan los escenarios climáticos para los periodos presente, histórico y futuro.

Tabla 4: Escenarios climáticos para los periodos presente, histórico y futuro

Escenarios Climáticos	Periodo	Codigo
Data presente (observada)	Histórico 1956 - 2016	DP
MPI-ESM-MR - RCP4.5	Futuro Cercano y Lejano 2011 - 2099	MPI 4.5
MPI-ESM-MR - RCP8.5		MPI 8.5
CANESM2 - RCP4.5		CAN 4.5
CANESM2 - RCP8.5		CAN 8.5
CN RM-CM5 - RCP4.5		CNR 4.5
CN RM-CM5 - RCP8.5		CNR 8.5

La evaluación del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Cerrillos y río Verde se realiza comparando los resultados calculados de los escenarios futuros con el escenario histórico por medio del modelo WEAP.

4.3. Proceso de generación de escenarios

Para el modelamiento del sistema se consideraron las siguientes variaciones

- Bajo condiciones reales con información histórica y
- Bajo influencia del cambio climático.

Se asumieron, además, tres (3) escenarios de operación del almacenamiento y demandas

- Funcionando solo con almacenamiento de la Presa Lagunillas;
- Funcionando con trasvasamiento de las aguas del río Verde a la Presa de Lagunillas; y

- Funcionando con almacenamiento de la Presa de Lagunillas; y almacenamiento en la Presa del río Verde.

En la Figura 4 se presenta un resumen del esquema metodológico usado en la investigación, diferenciándose los tres grandes procesos realizados.

5. Resultados

Los resultados se centran en la evaluación de la información histórica y de los seis escenarios hidrológicos con efecto de Cambio Climático, proyectados en las estaciones pluviométricas para dos periodos de tiempo continuos: para información histórica desde enero de 1956 a diciembre de 2016; y futuro desde enero de 2005 a diciembre de 2099.

5.1. Calibración del modelo hidrológico

La calibración y validación del modelo hidrológico se llevó a cabo comparando los caudales simulados y/o generados por el modelo WEAP con la serie de caudales mensuales observados, correspondientes a un registro de 25 años entre 1969 y 1993. El ajuste entre datos simulados y observados es muy bueno, con una adecuada representación de la estacionalidad de los datos de precipitaciones de la Cuenca del río Cabanillas. Los resultados de los ajustes de la calibración se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Valores de índices estadísticos de la calibración

Indice	Valor
Nash	0.998562
Pearson correlation coeff	0.8619
Kling-gupta Efficiency	0.466195
Bias Score	0.979
RRMSE	0.758395
Relative Volumen Bias	0.0123
Normalized Peak Error	0.145

La curva de los caudales generados se aproxima y tienden a presentar el mismo comportamiento de la curva de caudales observados, en lo cual se realiza la aceptación de esta evaluación grafico

visual. Utilizando el método de error cuadrático se tiene como resultado de 0.758395, en porcentaje 75.8 %, que lo ubica como insatisfactorio en el rango $0.70 > RSR$. El valor obtenido por el método de Nash es de 0.998562, por lo que es una calibración válida con un rendimiento de “Muy Bueno” porque este se encuentra entre los valores de $0.75 < E \leq 1$.

El valor obtenido por el método de Bias normalizado es de 0.979, indicando un resultado de sobrestimación. El valor obtenido en el coeficiente de Error en Volumen es de 0.012 es decir de 1.2 % que se ubica con un rendimiento de Muy Bueno de $< 10 \%$. Los resultados anteriores indican que el modelo WEAP podría modelar el flujo mensual razonablemente bien y podría usarse para propósitos de proyección futura [12].

5.2. Escenarios de modelamiento bajo condiciones reales con información histórica

Los resultados de los escenarios de modelamiento bajo condiciones reales con información histórica se detallan en la Tabla 5 y las Figuras 7 y 8 representan al primer escenario, las Figuras 9 y 10 al segundo escenario y las Figuras 11 y 12 al tercer escenario.

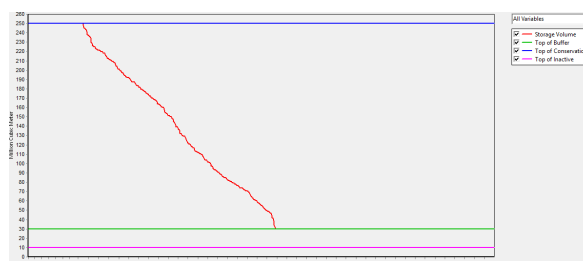


Figura 7: Volúmenes Almacenados operando solo Lagunillas

De la Tabla 6 se desprende en cuanto a los:

Volúmenes almacenados

En el primer escenario el embalse de Lagunillas presenta hasta un 11 % de tiempo de exceso o rebose en el almacenamiento, el almacenamiento entre los 30 y 250 Mm^3 va variando linealmente de 13 a 53 % y de 53 % a 100 % el almacenamiento esta en 30 Mm^3 , ver Figura 7 y Tabla 6.

Tabla 6: Resumen de resultados bajo condiciones reales

Modelamiento del sistema	Bajo condiciones reales y con informacion historica (1956-2016)		
	1er Escenario	2do Escenario	3er Escenario
1. Solo con almacenamiento de embalse lagunillas	Demanda Satisfecha en un 30 %		
2. Con tranvasamiento de las aguas del rio verde al embalse presa lagunillas	Demanda Satisfecha en un 52 %		
3. Con almacenamiento de la presa lagunillas y almacenamiento de embalse rio verde	Demanda Satisfecha en un 60 %		
4. Volúmenes almacenados			
- Con exceso o rebose	11 %	13 %	15 %
- Volumen util	13 % - 53 %	13 % - 72 %	15 % - 78 %
- Almacenamiento minimo (30 Mm ³)	53 % - 100 %	72 % - 100 %	75 % - 100 %

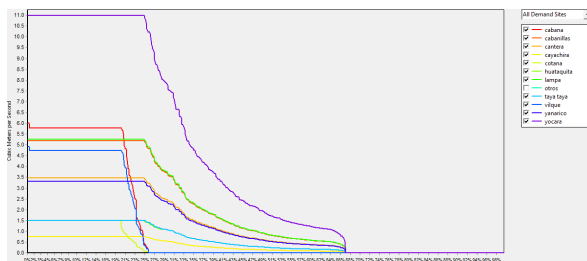


Figura 8: Demandas entregadas operando solo Lagunillas y demandas planteadas (100 %)

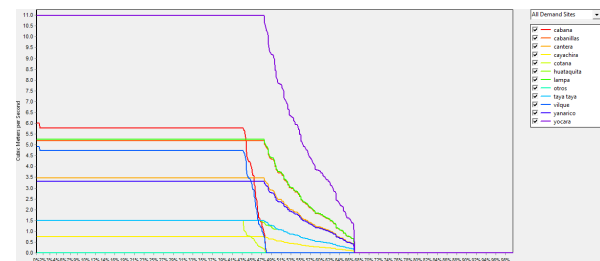


Figura 10: Demandas entregadas satisfechas Operando solo Lagunillas y trasvase de las aguas del rio Verde a Lagunillas y con las demandas planteadas (100 %)



Figura 9: Volúmenes Almacenados operando y trasvasando del rio Verde a Lagunillas y con las demandas planteadas (100 %)

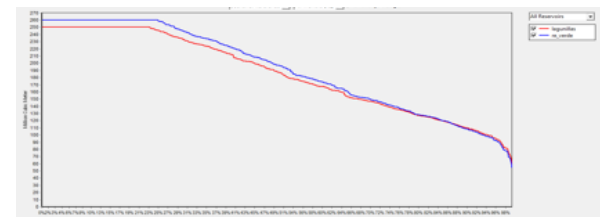


Figura 11: Volúmenes Almacenados en Lagunillas, Operando Lagunillas, y reservorio Verde y con las demandas planteadas (100 %)

En el segundo escenario el embalse de Lagunillas presenta hasta un 13 % del tiempo de exceso o rebose en el almacenamiento, el almacenamiento entre los 30 y 250 Mm³ va variando linealmente de 13 a 72 % y de 72 % a 100 %, el almacenamiento esta en 30 Mm³, ver Figura 9 y Tabla 6.

En el tercer escenario el embalse de Lagunillas

presenta hasta un 15 % del tiempo de exceso o rebose en el almacenamiento, el almacenamiento entre los 30 y 250 Mm³ va variando linealmente de 13 a 72 % y de 72 % a 100 % el almacenamiento esta en 30 Mm³, ver Figura 11 y Tabla 6.

Se concluye que el tiempo de rebose se incrementa a partir del primer escenario en un

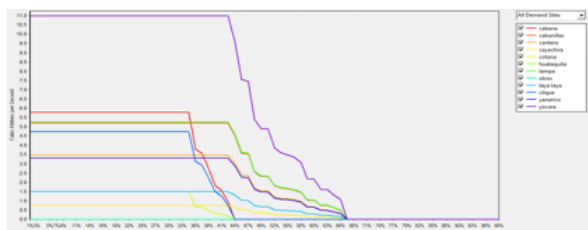


Figura 12: Demandas entregadas satisfechas Operando Lagunillas, y reservorio Verde y con las demandas planteadas (100 %)

2 % y el almacenamiento o volumen útil vario linealmente en el primer escenario hasta el 53 % y 72 % y el almacenamiento mínimo (30Mm³) alcanzan de manera progresiva al 100 % del 53 %, 72 % y 75 %

Escenarios de funcionamiento

La demanda hídrica proyectada del Sistema Integral de Lagunillas el cual representa una demanda total de 643.674 hm³, (ver 2), de acuerdo a los escenarios de funcionamiento se presenta de la siguiente manera.

En el primer escenario las demandas planteadas no son satisfechas completamente, se da solo en un 30 % mostrado en la Figura 8 y Tabla 6.

En el segundo escenario, las demandas planteadas son satisfechas en un 52 %, ver Figura 10 y Tabla 6.

En el tercer escenario, las demandas planteadas son satisfechas solo en un 60 %, ver Figura 12 y Tabla 6.

A manera de conclusión se puede decir que con solo funcionando la Presa de Lagunillas solo abastecería la tercera parte (30 %) de la demanda planteada y con el almacenamiento de la Presa de Lagunillas y la futura Presa del Rio Verde abastecería las dos terceras partes (60 %) de la demanda total del Sistema Integral de Lagunillas.

Primer escenario. sistema con regulación en Lagunillas y rio Verde no regulado con las demandas al 100 %. En este caso los resultados están en las Figuras 7 y 8.

Segundo escenario. trasvasamiento de aguas del rio Verde y almacenado en Lagunillas con

demandas al 100 %. En este caso los resultados están en las Figuras 9 y 10.

Tercer escenario. con regulación en Lagunillas y rio Verde almacenado en un nuevo reservorio con las demandas al 100 %. En este caso los resultados están en las Figuras 11 y 12.

5.3. Modelado del sistema para tres (3) escenarios de funcionamiento de almacenamiento y de demandas planteadas al 100 % con influencia del cambio climático: CANESM2-RCP4.5, CANESM2-RCP8.5, CNRM_CMI4.5, CNRM_CMI8.5.

El resumen de los resultados de la Tabla 7 y de las Figuras 13, 13, 15, 16, 17, 18 y 19 representan la influencia del Cambio Climático en la demanda hídrica total proyectada del Sistema Integral de Lagunillas.

A continuación de la Tabla 7 se desprende lo siguiente:

5.3.1. Volúmenes almacenados por escenario

. En el primer escenario con los escenarios con cambio climático con CANESM2-RCP 4.5 tiene un rebose del 8 % y una variación del volumen mayor variando linealmente a un 85 % llegando al 100 % con almacenamiento de 30MM³. Ver Figuras 13 y 14 y Tabla 7.

En el segundo escenario se observa que, en el escenario con efecto de Cambio Climático, la proyección CANESM2 - RCP4.5, se tiene un 15 % de rebose y de un almacenamiento o volumen útil de 30 a 540 Mm³ varia de 15 % a 92 % y de 92 a 100 % el almacenamiento mínimo queda en 30 Mm³. Ver Figuras 15 y 16 y Tabla 7.

En el tercer escenario el embalse de Lagunillas y el embalse de rio Verde presentan hasta un 15 % del tiempo rebose en el almacenamiento, el almacenamiento entre los 30 y 250 Mm³ va variando linealmente de 15 % a 75 % y de 75 % a 100 % el almacenamiento esta en 30 Mm³, de los escenarios con cambio climático y el más resaltante es el de CANES4.5 y CANES8.5, con un rebose de 13 % y el almacenamiento vario linealmente de 13 % a 98 % y con un almacenamiento al 100 % en 30Mm³. Figuras 17 y 18. Figuras 12-a, 12-b.

Tabla 7: Resumen de resultados bajo influencia del cambio climático

MODELAMIENTO DEL SISTEMA ESCENARIO DE FUNCIONAMIENTO	BAJO INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO Y DEMANDAS HIDRICAS PLANTEADAS AL 100 %		
	1er ESCENARIO	2do ESCENARIO	3er ESCENARIO
1. SOLO CON ALMACENAMIENTO DE EMBALSE LAGUNILLAS	Satisfecha en Promedio 60 %, CANES M2-RCP4.5 en 75 %		
2. CON TRANVASAMIENTO DE LAS AGUAS DEL RIO VERDE AL EMBALSE PRESA LAGUNILLAS	Satisfechas en promedio un 75 %, CANES M2-RCP4.5 85 %		
3. CON ALMACENAMIENTO DE LA PRESA LAGUNILLAS Y ALMACENAMIENTO DE EMBALSE RIO VERDE	Satisfechas en promedio un 80 %, CANES M2-RCP4.5 y CANES M2-RCP8.5 95 %		
4. VOLUMENES ALMACENADOS			
- CON EXCESO O REBOSE	8 %	15 %	15 %
- VOLUMEN UTIL	8 % - 85 %	15 % - 92 %	15 % - 98 %
- ALMACENAMIENTO MÍNIMO (30 Mm3)	85 % - 100 %	92 % - 100 %	98 % - 100 %

A manera de conclusión se puede decir que el tiempo de rebose se incrementa a partir del primer escenario de 8 % a 15 % y el almacenamiento o volumen útil vario linealmente en el primer escenario hasta el 75 % y el almacenamiento mínimo (30MM3) alcanzan el 98 % para las proyecciones de CANESM2 - RCP4.5 y CANESM2- RCP8.5

5.3.2. Demanda hídrica según escenarios

La demanda hídrica proyectada del Sistema Integral de Lagunillas el cual representa una demanda total de 643.674 hm³, (ver Tabla 2), de acuerdo a los tres escenarios de funcionamiento.

Primer escenario. El sistema con regulación en Lagunillas y rio Verde no regulado con las demandas al 100 %.

En el primer escenario se observa además que, bajo escenarios de cambio climático, estas solo cubren en más del 60 % de las demandas planteadas, de los cuales resalta en mayor medida el escenario CANESM2-RCP4.5 con un 75 %. Ver Figuras 13 y 14.

Segundo escenario. Con trasvasamiento del rio Verde y almacenado en Lagunillas con las demandas al 100 %.

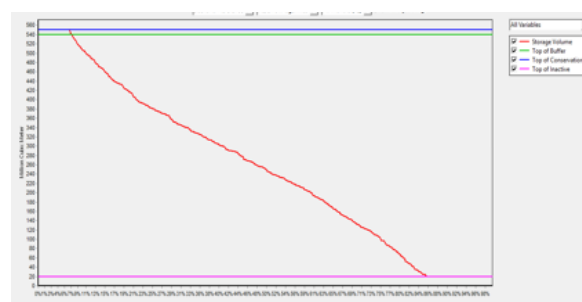


Figura 13: Volumen almacenado operando solo Lagunillas y con demandas planteadas al 100 %. CANESM2-RCP 4.5

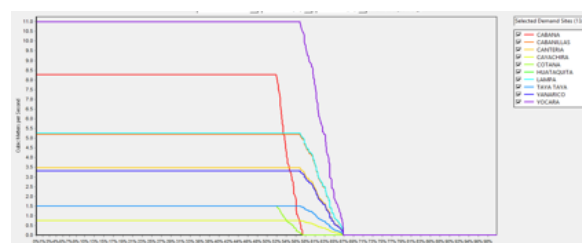


Figura 14: Demanda entregada operando solo Lagunillas y con las demandas planteadas (100 %) CANESM2-RCP 4.5

En el segundo escenario, para demandas entregadas son satisfechas en promedio de todos los escenarios en un 75 %, resaltando siempre

el escenario con cambio climático CANESM2-RCP4.5 como un ligero aumento del 85 %. Ver Figuras 15 y 18.

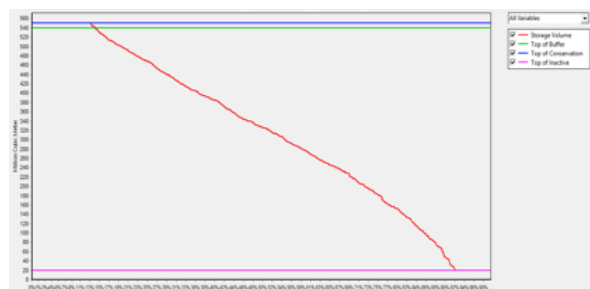


Figura 15: Volúmenes Almacenados operando solo Lagunillas y trasvase del río Verde a Lagunillas y con las demandas planteadas (100 %) CANESM2-RCP 4.5

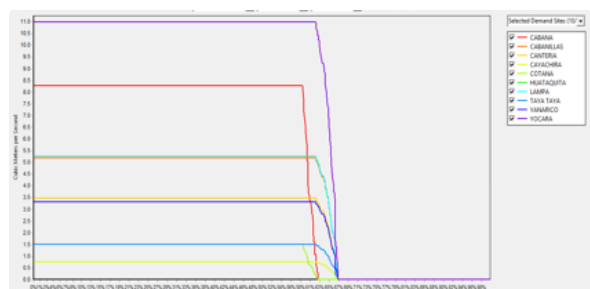


Figura 16: Demandas entregadas satisfechas operando solo Lagunillas y trasvase de las aguas del río Verde a Lagunillas y con las demandas planteadas al 100 %. CANESM2-RCP4.5

Tercer escenario. Con regulación en Lagunillas y regulación de las aguas del río Verde con las demandas al 100 %.

En el tercer escenario, para demandas entregadas, son satisfechas en todos los escenarios con cambio climático en un 80 %, resaltando los escenarios con cambio climático CANESM2-RCP4.5 y CANESM2-RCP8.5, con un 95 %, Ello es debido al represamiento de las aguas del río Verde y a la presa de Lagunillas. Ver Figuras 17, 18 y 19.

Como resultado principal de este estudio se puede decir que con solo funcionando la Presa de Lagunillas abastecería las dos terceras



Figura 17: Volúmenes Almacenados en Lagunillas, Operando Lagunillas, y reservorio Verde y con las demandas planteadas (100 %), con CANESM2-RCP4.5 LAGUNILLAS



Figura 18: Volúmenes Almacenados en Lagunillas, Operando Lagunillas, y reservorio Verde y con las demandas planteadas (100 %), con CANESM2-RCP4.5 reservorio VERDE

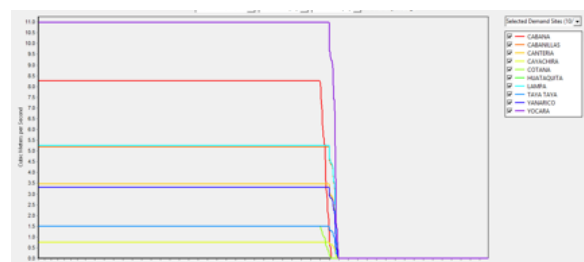


Figura 19: Demandas entregadas satisfechas Operando Lagunillas, y reservorio Verde y con las demandas planteadas (100 %), con Cambio Climático CANESM2-RCP4.5

partes (60 %) de la demanda planteada; con trasvasamiento de las aguas del río verde a la Presa de Lagunillas abastecería en promedio de las proyecciones un 75 % y con el almacenamiento de la Presa de Lagunillas y la futura Presa del Río Verde abastecería el promedio de las proyecciones en un 80 % destacando los escenarios

con cambio climático CANESM2-RCP4.5 y CANESM2-RCP8.5, con un 95 %, de la demanda total del Sistema Integral de Lagunillas.

6. Conclusiones

Con modelamiento bajo condiciones reales con información histórica para una demanda planteada al 100 %, se observa que el primer escenario de solo uso de la presa de Lagunillas se satisface el 30 % de la demanda hídrica; el segundo escenario de trasvasamiento de las aguas del río Verde a la presa de Lagunillas se satisface en un 52 % de la demanda hídrica; y el tercer escenario de (regulación de Lagunillas y del río Verde) se satisface en un 60 % del total de la demanda hídrica.

Considerando el modelado del sistema para 3 escenarios de funcionamiento de almacenamiento y de demandas planteadas al 100 % con influencia del cambio climático: CANESM2-RCP4.5, CANESM2-RCP8.5, CNRM_CMI4.5, CNRM_CMI8.5, se observa que en el primer escenario de funcionamiento, estas cubren en más del 60 %, de los cuales resalta en mayor medida el escenario CANES 4.5 satisface en un 75 % la demanda hídrica; Para el segundo escenario de funcionamiento las demandas son satisfechas en promedio de todos los escenarios en un 75 %, resaltando siempre el escenario con cambio climático CANES4.5 como un ligero aumento del 85 %; Para el tercer escenario de funcionamiento las demandas son satisfechas en todos los escenarios con cambio climático en un 80 %, resaltando los escenarios con cambio climático CANES4.5 y CANES8.5, con un 95 %. Por lo que, se puede concluir que el cambio climático tiene un efecto positivo sobre la demanda hídrica de un incremento del 15 a 20 % de aportación a la disponibilidad hídrica para el Sistema Integral de Lagunillas, en todos los escenarios, destacando el de CANESM24.5 y CANESM28.5.

Por lo tanto, la disponibilidad hídrica para las 30,000 Has de agua potable; para las ciudades de Juliaca, Lampa y Puno; y para el uso industrial minero y el caudal ecológico del sistema integral de

Lagunillas, se requiere el uso de presa de Lagunillas y el represamiento del río Verde.

La calibración y validación del modelo hidrológico requiere de comparaciones entre los caudales simulados y/o generados por la WEAP y la serie de caudales mensuales observados, correspondientes a un registro de 25 años entre 1969 y 1993, puede apreciarse que el ajuste entre datos simulados y observados es muy bueno, existiendo una representación adecuada de la estacionalidad de los datos de precipitaciones de la Cuenca del río Cabanillas.

Recomendaciones

De acuerdo con los posibles incrementos de la oferta hídrica que se puedan dar a futuro y considerando las características geográficas y fisiográficas de la cuenca del río Cabanillas, se deberá plantear una estrategia de adaptación al cambio climático coordinado entre los gobiernos regionales y locales.

Con el fin de mejorar el estudio, se recomienda la evaluación de la demanda futura en la cuenca del río Cabanillas para generar un contraste más claro referente a la disponibilidad hídrica de la cuenca a través de un proceso de comparación con la oferta proyectada.

7. Referencias

- [1] Yuliang Zhou, Chengguang Lai, Zhaoli Wang, Xiaohong Chen, Zhaoyang Zeng, Jiachao Chen, and Xiaoyan Bai. Quantitative evaluation of the impact of climate change and human activity on runoff change in the dongjiang river basin, china. *Water*, 19(2), 2018.
- [2] UNESCO–WWAP. Agua para todos agua para la vida: Informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Report, UNESCO, World Water Assessment Programme, 2003.
- [3] MINAM, Ministerio del Ambiente del Perú, Lima Perú. *Plan de acción de adaptación y mitigación frente al cambio climático*, 2010.
- [4] Puno: PLET Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca, Lima Perú. *Plan de operación, mantenimiento y desarrollo de infraestructura hidraulica del sistema integral Lagunillas*, 2017.
- [5] Efraín Lujano Laura, Liz S. Hidalgo Sanchez, Bernardino Tapia Aguilar, and Apolinario Lujano Laura. Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones rcp4.5 y 8.5 de modelos

- climáticos globales del cmip5 en el altiplano peruano. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 18(2):195–204, 2016.
- [6] Jack Sieber and David Purkey. Water evaluation and planning system. Technical report, Stockholm Enviroment Institute, 2015.
- [7] Jamal Ahmadaali, Gholam-Abbas Barani, Kourosh Qaderi, and Behzad Hessari. Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of urmia lake basin, iran. *Water*, 10(2), 2018.
- [8] Ajay Gajanan Bhawe, Declan Conway, Suraje Dessai, and David A. Stainforth. Water resource planning under future climate and socioeconomic uncertainty in the cauvery river basin in karnataka, india. *Water Resources Research*, pages 708–728, 2018.
- [9] Le An Ngo, Ilyas Masih, Ilyas Masih, Yong Jiang, Yong Jiang, and Wim Douven. Impact of reservoir operation and climate change on the hydrological regime of the sesan and srepek rivers in the lower mekong basin. *Climatic Change*, pages 1–13, 2016.
- [10] Taru Olsson, Matti Kämäräinen, Darwin Santos, Teija Seitola, Heikki Tuomenvirta, Riina Haavisto, and Waldo Lavado-Casimiro. Downscaling climate projections for the peruvian coastal chancay-huaral basin to support river discharge modeling with weap. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13:26–42, 2017.
- [11] Saloua Rochdane, Barbara Reichert, Mohammed Messouli, Abdelaziz Babqiqi, and Mohammed Yacoubi Khebiza. Climate change impacts on water supply and demand in rheraya watershed (morocco), with potential adaptation strategies. *Water*, 4(1):28–44, 2012.
- [12] Lu Hao, Ge Sun, Yongqiang Liu, and Hong Qian. Integrated modeling of water supply and demand under management options and climate change scenarios in chifeng city, china. *JAWRA Journal of the American Water Resources Associatio*, 51(3):655–671, 2015.
- [13] Motlatsi Maliehe and Deogratias M.M. Mulungu. Assessment of water availability for competing uses using swat and weap in south phuthiatsana catchment, lesotho. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100:305–316, 2017.
- [14] Thania G. López-García, Mario G. Manzano y Aldo I. Ramírez. Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el valle de galeana, nuevo león, méxico. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1):105–114, 2017.
- [15] SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Perú. *Datos Historicos de Clima del Perú, Lima: Senamhi*, 2018.
- [16] Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, Santiago, Chile. *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*, 2009.
- [17] Gobierno Regional de Puno. *Zonificación Ecológica Económica (Meso ZEE) Región Puno*, 2015.
- [18] MINAM, Ministerio del Ambiente del Perú, Lima, Perú. *El Perú y el Cambio Climático: Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, 2016.
- [19] SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Perú. *Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú*, 2014.

Volumen 25 Número 3

Editorial

La Revista Ingeniería UC en la edición de su número tres (3) correspondiente al período de septiembre a diciembre del año 2018 de su volumen 25, “reafirma su carácter institucional”. Despidiendo a su Editora-Jefe, Dra. Lisbeth Manganiello y dando la bienvenida a su nuevo Editor-Jefe, Dr. Ángel Almarza. La Dra. Manganiello fue responsable de la edición de diez (10) volúmenes comenzando desde el año 2009 hasta el año 2018. Este último número lo editan conjuntamente los Drs. Manganiello y Almarza, asegurando de esta manera la continuidad de todos los procesos administrativos que conlleva la jefatura editorial de la Revista Ingeniería UC, dando ejemplo con este procedimiento, que una Revista que representa a una Institución, en nuestro caso a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, debe ser manejada con rigurosidad académica. Dejando claro que este medio de divulgación científica representa el patrimonio de todos sus profesores, no obedece a ningún ente en particular y por lo tanto mantiene su continuidad en el tiempo. Cabe destacar que el Dr. Almarza es su cuarto Editor-Jefe, la Dra. Manganiello pasa a la distinguida posición de tercera Editora Honoraria en compañía de su primer Editor-Jefe, Dr. Edilberto Guevara y segundo Editor-Jefe, Dr. Francisco Arteaga, ambos en la prestigiosa posición de editores honorarios.

Abrimos la presente edición con un nuevo producto de publicación: “Estudios de Tendencia”, de alto interés para la comunidad científica, son estudios de prospectiva de I+D+i a medio y largo plazo y de amplia utilidad en el campo industrial; Tellería, Villanueva y Henríquez nos exponen las aplicaciones de la colofonia y sus derivados con la finalidad de impulsar el aprovechamiento integral del pino venezolano y la diversificación de productos de nuestra industria forestal mediante el análisis de patentes publicadas en el período comprendido desde el año 2013 hasta el primer cuatrimestre del año 2018. Sáenz y Patiño evaluaron la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF 2304, sometido a calentamiento comprendido entre 1100°C y 1300°C durante un tiempo de permanencia en el horno de 30 minutos; el estudio determinó una leve disminución de la tenacidad de impacto.

Calizaya y Mejía plantearon un modelo para la desglaciación de los nevados de la cuenca del río Santa (Perú) dada la importancia de su aporte a la obtención de agua dulce; la dinámica de su estudio se realizó mediante imágenes satelitales, el modelo propuesto se calibró para el año 2005 y se validó para el año 2007, comprobando tendencias positivas del aumento de las temperaturas y por ende el continuo retroceso de los glaciares desde el año 2000 al 2017. Sevilla y colaboradores presentan un interesante estudio sobre la reformulación de pintura látex semimate de uso interior, cumpliéndose los requerimientos de la pintura para los carbonatos en estudio y silicato de aluminio. Peñaloza y su grupo presentan un plan para el manejo adecuado de sustancias peligrosas en dos laboratorios de la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Carabobo; después de la evaluación de parámetros fisicoquímicos de interés a los efluentes de los laboratorios, se determinó que ningún parámetro se encontraba bajo norma, por lo tanto se debe aplicar el plan propuesto a fin de dar cumplimiento a la normativa ambiental.

Zozaya en su artículo recrea para fines didácticos un ejercicio clásico de adaptación de una línea de transmisión con stub en paralelo, acompañado de dos programas escritos en GNU octave, los cuales trazan una Carta de Smith ad hoc simplificada. Jorge y colaboradores presentan en su trabajo, la síntesis de emulsiones agua en aceite en diferentes proporciones a fin de determinar la permisividad eléctrica; la conductividad eléctrica en un rango de frecuencia entre 400 KHz y 4,7 MHz; los resultados muestran que los parámetros mencionados aumentan a medida que aumenta el contenido de agua. Acevedo y Sáenz

aportan con su investigación un modelo para el comportamiento mecánico de un acero inoxidable 304 H, expuesto a elevada temperatura; el modelo permitió predecir la tenacidad al impacto del acero 304 H degradado de manera de definir la aceptación o rechazo del componente para el servicio sin requerir realizar pruebas destructivas.

Paricaguán y colaboradores plantean en su trabajo la reformulación de una pintura látex, clase A mate, sustituyendo parcialmente el dióxido de titanio por otros exténderes, resultando el asociado al silicato de aluminio con mayores ventajas en cuanto a cubrimiento, porcentaje de blancura e índice de amarillez. Nuevamente Acevedo y Sáenz con sus investigaciones nos aportan la caracterización de un acero inoxidable 304 H, determinándose que las muestras evaluadas con la menor tenacidad de impacto tienen partículas alargadas, agrupadas y muy finas, evidenciando que estos parámetros afectan la tenacidad. Sidorovas, Francisco y Ramones estudiaron la vida útil de una herramienta de corte sometida a un tratamiento criogénico en el mecanizado de piezas de acero AISI 1045. Finalmente, cerramos la edición de este número con una extensa revisión sobre los Sensores Piezoeléctricos y sus aplicaciones en el ámbito alimenticio. El uso de este tipo de sensores permite determinaciones cualitativas y cuantitativas de contaminantes en alimentos con un mínimo tiempo de análisis y una menor cantidad de reactivos químicos empleados.

Nos despedimos deseándoles paz y prosperidad para este nuevo año 2019 a todos nuestros lectores y como es costumbre en nosotros invitando muy cordialmente 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 Luís Nazar*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesor *Angel Almarza*, PhD
Editor – Jefe (Actual)

Agradecida con mi Dios Todopoderoso por la oportunidad de servirle a través de nuestra Revista Ingeniería UC y agradecida con todos los colaboradores que me acompañaron a lo largo de estos años frente a la edición de nuestra Revista.

Prof.^a *Lisbeth Manganiello*, PhD
Editora – Jefe (2009 – 2018)

Reseña de Editores



Prof. *Ángel D. Almarza M.*, PhD. Editor - Jefe de la Revista Ingeniería UC a partir del 01 de octubre de 2018. Responsable de la edición del Volumen 25, Nro. 3, en conjunto con la Editora Honoraria, Dra. Lisbeth Manganiello. A la fecha impulsa el proceso de evaluación de los criterios que en términos de estructura, calidad y pertinencia científica, le permitirán a la revista conservar su posición en índices importantes y que servirán de plataforma para promover la entrada a otros índices internacionales. Así mismo, está comprometido con el establecimiento de alianzas con entes y centros de investigación a nivel nacional e internacional tendientes a garantizar el proceso de edición de la revista y su trascendencia como el principal órgano de divulgación científico y tecnológico de la Facultad de Ingeniería.

El Profesor Almarza es Ingeniero Químico egresado de la Universidad de Carabobo, Doctor en Didáctica y Organización de Instituciones Educativas, "sobresaliente cum laude" por la Universidad de Sevilla, España. Profesor Titular de la Cátedra de Computación Avanzada y de las asignaturas Análisis y Diseño de Algoritmos, Programación Estructurada y Tópicos Especiales de Programación del programa de Maestría en Matemática y Computación del cual es miembro de la comisión coordinadora, así como también Métodos Numéricos Avanzados referida al programa de Doctorado en Ingeniería, Área Cómputo Aplicado. Actualmente es el Director de Investigación y Producción Intelectual de la Facultad de Ingeniería.



Profª. *Lisbeth Manganiello de Vega*, Editora - Jefe de la Revista Ingeniería UC (2009 - 2018). Doctora en Ciencias Químicas, "sobresaliente cum laude" por la Universidad de Córdoba, España (2002). Egresada de la Facultad de Ingeniería de la Ilustre Universidad de Carabobo como Licenciada en Química. (1995). Directora de Investigación de la Facultad Ingeniería de la Universidad de Carabobo (Abril 2009 a Septiembre 2018). Entre sus aportes más sobresalientes en la Jefatura Editorial se cuentan: la implementación del Editor Profesional Latex (2009) para la transcripción

de los productos de investigación que se publican en la Revista Ingeniería UC; Procesos de cambios de formato adaptado a las más prestigiosas publicaciones a nivel internacional (journal) en presentación de portadas, cuerpo de la Revista y misceláneos (2009 - 2018). Proceso de Evaluación de la Revista por Parte del Fonacit (2010) dando como resultado la ubicación entre las tres más importantes Revistas con línea editorial en Ingeniería y Ciencias a fines, a nivel nacional. Indexación en la Web of Science de Thomson Reuters, como publicación emergente ISI (2016). Además de otros índices como: EBSCO (2016), Directory of Research Journal Indexing -DRJI (2016). Durante el año 2017 los Profesores Jesús Jiménez, Ahmad Osman y Cristóbal Vega diseñaron la plantilla para la automatización de los procesos editoriales de cada número que publica la Revista cuatrimestralmente para la conformación de su volumen anual. La Dra. Manganiello es Profesora jubilada e investigadora (activa) adscrita al Centro de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, en el área de Química Analítica y Desarrollo de análisis instrumental (ex - PPI Nivel II). Sus áreas de trabajo: Desarrollo de nuevas metodologías para la evaluación de la calidad alimentaria y de aguas destinadas al consumo humano, implementación de sistemas de calidad en los laboratorios de investigación y desarrollo de sensores. Ha sido Profesora de la Cátedra de Química II, profesora de las asignaturas Química Ambiental y Métodos de Caracterización Ambiental del Programa de la Maestría en Ing. Ambiental y profesora del Doctorado en Ingeniería, especialidad de Química de las asignaturas métodos de caracterización ambiental y análisis instrumental. Actualmente compagina su actividad de investigadora con la de Revisora de Productos de I+D+i en el Centro Nacional de Tecnología Química, institución adscrita al Ministerio del poder popular para educación Universitaria, Ciencia y Tecnología. En la fotografía de su reseña aparece

con su esposo, el Dr. Cristóbal Vega González, miembro permanente del cuerpo editorial de la Revista. Finalmente, la Dra. Manganiello reconoce la valiosa labor del Ingeniero Francisco Ponte de la Biblioteca Central de la Universidad de Carabobo como Webmaster de la Revista Ingeniería UC.



Prof. *Francisco Arteaga Bravo*, PhD. Editor Principal desde 2003 hasta el 21 de Marzo de 2009 y Editor Honorario a partir de 2009. Durante el año 2003, inicia un proceso de reestructuración del Comité Editorial, del Comité Técnico y de Revisores de la Revista. Este proceso trajo como frutos el cambio de la periodicidad de semestral a cuatrimestral, el rediseño del formato y portada, el rediseño de la hoja de evaluación de artículos y la inclusión de las Normas de Publicación en inglés. Luego de un trabajo continuo y perseverante se logra la tan anhelada acreditación en el índice venezolano de Revistas Científicas conocido como REVENCYT, válido a partir del

número de Agosto 2003. Para el último número de ese año, correspondiente al de Diciembre 2003, la Revista ya estaba indizada también en Actualidad Iberoamericana de Chile, en IEE/INSPEC del Reino Unido, e incluida en el ULRICH's International Periodical Directory, pasando a ser clasificada como Tipo B para el Programa de Promoción al Investigador. Además, para este mismo número, se incluye al final de la Revista el Índice de Autores (Author Index) y el Índice de Materias (Subject Index), para mejorar la calidad de la presentación y el formato de revista científica. En ese mismo año, el Comité Editorial y Comité Técnico se enriquecen con investigadores invitados de otras Universidades del País y de Universidades del exterior. En el año 2004, se logra la inclusión en el Directorio de LATINDEX (México), y en el 2007, se obtiene la inclusión en el Catálogo de LATINDEX, lo que acredita a la Revista como publicación Tipo A, según el reglamento del PPI vigente hasta el momento. También en el 2007, se obtiene la inclusión en el índice REDALYC y PERIODICA, ambos de México. Además, en cuanto al formato de presentación, se incluye la información sobre el naciente Doctorado de nuestra Facultad de Ingeniería y también las cartas de aprobación de parte de todos los índices obtenidos por la Revista. El Dr. Arteaga es Ingeniero Electricista egresado de La Universidad del Zulia (LUZ), tiene una Maestría de la Universidad de Vanderbilt - USA y un Doctorado de la Universidad George Mason - USA, ambos en Ingeniería Eléctrica. Fue jefe del Departamento de Sistemas y Automática, es director del Centro de Investigación y Tecnología en Automatización, Electrónica y Control (CITAEC).



Prof. *Edilberto Guevara Pérez*, PhD. Editor Principal desde 1992 hasta 2003 y Editor Honorario a partir de 2007. Editor fundador de "La Revista Ingeniería UC" en 1992. La cual fue editada con el aporte integro de PEQUIVEN para su primer volumen en Diciembre 1992. En 1998, elaboró conjuntamente con el Decano Elio Betancourt y el Director de Investigación Prof. César Seijas, el documento constitutivo donde nombra a La Revista Ingeniería UC como el principal Órgano de Divulgación Científica y tecnológica, de la Facultad de ingeniería de la UC. En este nuevo documento constitutivo, se le asigna la responsabilidad directa de la edición

de la revista a las Direcciones de Postgrado e Investigación, con el fin de Institucionalizar la Revista.

El Dr. Guevara es Ingeniero Agrícola en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú (UNALM). Maestría, Especialización y Doctorado en Alemania; Posdoctorado en Estados Unidos. Fue jefe del departamento de Ing. Hidráulica; Director de estudios para graduados de la Facultad de Ingeniería en dos oportunidades; Director Ejecutivo del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico; Director General de Postgrado de la UC; y actual Director del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la UC (CIHAM-UC) y miembro de las comisiones coordinadoras de la maestría y doctorado en Ingeniería Ambiental.

Trend study: Applications of Colophony (Rosin) and its Derivatives

Natasha Tellería Mata, Samuel Villanueva*, Magaly Henríquez

Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela

Abstract.- Venezuela has large areas of caribbean pine, which are a source of chemical specialties of natural origin. Rosin, residue from the distillation of pine resin, is a mixture of diterpenic isomers, whose functionalization gives it interesting properties in the formulation of a wide range of commonly used goods, polymerization intermediates and chemical products. In order to promote the integral use of Venezuelan pine and the diversification of products from our forestry industry, a study was conducted evaluating the global trend in the application of rosin and its derivatives, by analyzing published patent documents in the period from 2013 to the first quarter of 2018. To accomplish this, the patent search platform PatentInspiration was used, applying a systematic search methodology, consisting on the design of a search equation, the application of filters by the international patent classification code, followed by the generation and analysis of patentometric indicators, finding that during the evaluated period, the most outstanding applications are the manufacture of adhesives, coatings, inks, image developers, printed circuits, welding or cutting elements, gums and pharmacy.

Keywords: rosin; caribbean pine; colophony application; trend study.

Estudio de tendencia: Aplicaciones de la Colofonia y sus derivados

Resumen.- Venezuela cuenta con grandes extensiones de Pino Caribe, que constituyen una fuente de especialidades químicas de origen natural. La colofonia, residuo de la destilación de la resina del pino, es una mezcla de isómeros diterpénicos, cuya funcionalización le confiere propiedades interesantes en la formulación de una amplia gama de bienes de uso común, intermediarios de polimerización y productos químicos. Con la finalidad de impulsar el aprovechamiento integral del pino venezolano y la diversificación de productos de nuestra industria forestal, se realizó un estudio donde se evalúa la tendencia mundial en la aplicación de la colofonia y sus derivados, mediante el análisis de los documentos de patentes publicados en el período desde el año 2013 hasta el primer cuatrimestre del 2018. Para ello se utilizó la plataforma de búsqueda de patentes PatentInspiration, aplicando una metodología de búsqueda sistemática, constituida por el diseño de una ecuación de búsqueda, la aplicación de filtros por el código de clasificación internacional de patentes, seguida de la generación y análisis de indicadores patentométricos, encontrándose que durante el período evaluado, las aplicaciones más destacadas la manufactura de adhesivos, recubrimientos, tintas, reveladores de imagen, circuitos impresos, elementos de soldadura o corte, gomas y farmacia.

Palabras claves: rosin; aplicaciones de la colofonia; pino caribe; estudio de tendencia.

Recibido: octubre 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

La resina de pino es una fuente de compuestos terpénicos de gran importancia para el desarrollo de la industria de químicos y polímeros naturales. Químicamente se trata de una solución de colofonia (residuo no volátil) en trementina (fracción volátil). La utilización de la colofonia es muy antigua, una vez separada de la trementina, se utilizaba como

sellante e impermeabilizante, aplicación principal de este recurso para la construcción y conservación de navíos entre los siglos XIX y XX [1]. Ambas fracciones contienen moléculas que constituyen bloques de construcción para una variedad de compuestos derivados, poliméricos en su mayoría, involucrados en la producción de múltiples bienes de consumo masivo. La colofonia, componente mayoritario de la resina de pino (70 %), es una mezcla de ácidos carboxílicos tricíclicos de alto peso molecular, compuesta principalmente por los ácidos abiético y pimárico, en una variedad de isómeros [2].

*Autor para correspondencia: S. Villanueva publicacionesgpidi.cntq@gmail.com

La colofonia en su forma pura es posible utili-

zarla en una variedad de aplicaciones industriales, lo que actualmente tiene un mayor valor en la formulación de productos de consumo son sus derivados. Las características físico-químicas que le confieren la modificación química de sus centros reactivos, encuentran un registro más grande de aplicaciones en la optimización y mejoramiento del desempeño y funcionamiento de productos como pinturas y tintas de impresión, adhesivos, goma de mascar, estabilizantes de bebidas, recubrimientos de frutas, aditivos de alimentos, en la industria farmacéutica y cosmética, intermediarios y asistentes de polimerización, entre muchas otras [1, 2, 3]. A pesar de la competencia que representan sus contrapartes de origen petrolero, por su bajo costo de producción, la sustitución de productos sintéticos por productos naturales en industrias como la farmacéutica y cosmética, así como la preocupación de la industria química por la utilización de recursos renovables en un modo de producción sustentable y sostenible en el tiempo, ha incrementado la introducción de los derivados de la resina de pino en sus formulaciones. El avance en el desarrollo científico, asociado a la aplicación de los derivados de la colofonia en la industria en general no se detiene, más bien se ha visto impulsado por el desarrollo en los procesos de producción y purificación a través de la obtención de productos de mayor calidad, estabilidad y conservación de los centros reactivos para su modificación posterior [3].

El Centro Nacional de Tecnología Química ha venido impulsando el desarrollo de la industria de la resina de pino en nuestro país, a través de la gestión de proyectos de investigación orientados a la implementación de planes de resinación adecuados que permitan recolectar la resina del pino de una forma sustentable, obteniendo excelentes resultados en rendimiento y conservación de las características mecánicas y de ultra estructura de la madera del pino resinado, para su posterior uso en la manufactura de papel y madera de construcción [4, 5, 6]. La resina recolectada fue separada utilizando procesos de destilación, obteniendo colofonia como residuo del proceso, cuya incorporación en la formulación de lodos de perforación fue evaluada por PDVSA-

Intevep, arrojando resultados positivos [7]. Sin embargo, el desarrollo de la industria de la resina de pino puede tener un mayor alcance, incrementando su impacto a través del abastecimiento de resinas de colofonia modificadas a las empresas de manufactura de adhesivos, tintas de impresión, cosméticos, fármacos, entre otros. Es por esta razón, que se hace imperativa la evaluación del mercado de la colofonia y sus derivados, definiendo los requerimientos de la industria manufacturera. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo identificar la tendencia en la aplicación de la colofonia y sus derivados.

2. Aspectos teóricos y antecedentes

2.1. Obtención de la colofonia

Su fuente principal involucra la destilación de la resina del pino obtenida por procesos de exudación, inducidos por cortes a la corteza del tronco; sin embargo, también puede extraerse con solventes orgánicos de la madera virgen o por la destilación del licor negro producto del proceso Kraft de producción de pulpa de papel [1]–[3]. La metodología de obtención de la colofonia impactará en sus características físico-químicas y en consecuencia, en la calidad del producto final. La aplicación de altas temperaturas y la exposición al oxígeno atmosférico inducen reacciones de oxidación, formando compuestos indeseables que resultan en el oscurecimiento de la coloración y la disminución de la temperatura de ablandamiento, en detrimento de la calidad y en consecuencia, de su valor comercial. Esta metodología está mostrada en la Figura 1.

La colofonia es una mezcla de ácidos orgánicos de alto peso molecular y otros materiales neutros relacionados. Los constituyentes ácidos, conocidos como ácidos resínicos, se muestra en la Figura 2, estos componen el 90 % de la colofonia, son ácidos monocarboxílicos de núcleo fenantrénico alquilado [1].

La estructura molecular de los ácidos resínicos permite su modificación química a través de la funcionalización del sistema diolefínico o del grupo ácido carboxílico, llevando a la formación de diversos compuestos derivados como



(a)



(b)

Figura 1: Obtención de colofonia. (a) Recolección de la resina del Pino en las plantaciones de Uverito, Venezuela, (b) Residuo de la destilación de la Resina de Pino (colofonia).

se observa en la Figura 3. De esta forma, se obtiene un universo de productos distintos con múltiples aplicaciones industriales según su modificación, entre las que se destacan el encolado de papel, adhesivos, aglutinante de pigmentos, formadores de película, agentes estabilizantes de bebidas, recubrimientos de fármacos y frutas, emulsificantes, intermediarios de polimerización, etc. [1, 2].

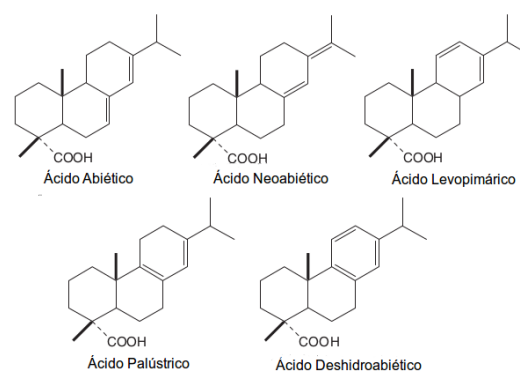


Figura 2: Ácidos resínicos presentes en la colofonia. Modificado de Silvestre y Gandini [1].

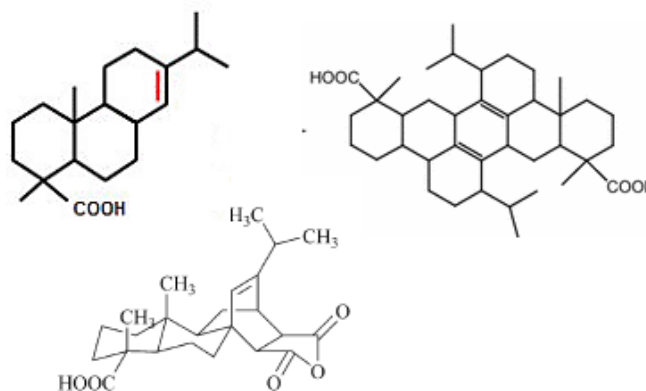


Figura 3: Algunos derivados de la colofonia [1].

2.2. Importancia de la colofonia en la industria manufacturera

La presencia del grupo ácido carboxílico en la estructura fenantrénica de los ácidos resínicos, le confiere características de solubilidad y compatibilidad, interesantes a la hora de la formulación de productos de manufactura. Es por esa razón que la colofonia y sus derivados son muy utilizados como agentes de enlace en la fabricación de adhesivos, barnices, pinturas, tintas y recubrimientos. Por otro lado, la presencia del sistema diolefínico le provee capacidades poliméricas, que pueden ser utilizadas directamente en la fabricación de compuestos formadores de película. Esta característica, combinado con la ventaja de ser un producto de origen natural, ha permitido la inclusión de algunos derivados de la colofonia en la producción de recubrimientos de fármacos y

alimentos frescos [8].

Esa estructura de doble funcionalidad polar, que se mantiene para los derivados, permite su aplicación en la fabricación de agentes impermeabilizantes para distintos sustratos, involucrando a los derivados de la colofonia en la manufactura de productos como papel encolado o circuitos eléctricos, pinturas antifouling y sellantes industriales. Esta misma característica es aprovechada en la producción de surfactantes utilizados en distintos procesos industriales, que van desde la producción de co-polímeros como el SBR, aditivos para mejorar la dispersión de pigmentos en la fabricación de tintas y pinturas, hasta agentes estabilizantes de bebidas [1, 2, 3, 8].

Por otro lado, es importante destacar la actividad biológica de los ácidos resínicos, campo que se ha venido desarrollando recientemente y que ha orientado la aplicación de estos compuestos en la fabricación principios activos de fármacos y cosméticos [1, 3, 8].

3. Metodología

Se realizó una búsqueda de publicación de patentes utilizando la plataforma *Patent Inspiration*, en su versión gratuita, la cual emplea la base de datos DOCDB® de la Oficina Europea de Patentes (EPO). La estrategia de búsqueda se desarrolló en cuatro etapas

1. construcción de la ecuación de búsqueda,
2. aplicación de filtros,
3. evaluación de la pertinencia de las patentes y
4. análisis patentométrico.

3.1. Diseño de la Ecuación de Búsqueda

Se diseñó una ecuación de búsqueda que permitiera ubicar palabras clave relacionadas con la colofonia y los ácidos abiéticos que la constituyen, que pueden ser modificados químicamente formando derivados, conectadas a través de operadores booleanos que garantizaran la ubicación de cualquiera de esos términos en el texto de las publicaciones.

3.2. Procedimiento de búsqueda de patentes otorgadas en el periodo de enero 2013 a abril 2018

Con la finalidad de ubicar las patentes en las que la colofonia se utilizaba como ingrediente en la formulación de otros productos, se diseñó una estrategia de búsqueda compuesta por distintos filtros

- a) se acotó la búsqueda al campo abstract;
- b) se excluyeron las patentes que incluyeran los códigos IPC C09F1/00, CPC C08L93/00 y CPC C08G63/00, cuya descripción se muestra en la Tabla 1;
- c) se acotó la búsqueda a 1 patente por familia y
- d) se determinó un rango temporal para solicitudes otorgadas desde 01/01/2013 hasta el 30/04/2018.

La búsqueda arrojó un total de 7.893 publicaciones de patentes, las cuales fueron analizadas por la misma plataforma para su evaluación patentométrica. De esta forma se generaron indicadores como cantidad de patentes publicadas en función del año de publicación, aplicante y código de clasificación de patente (ICP o CPC).

4. Resultados y discusión

Tendencia de patentamiento en el uso de la colofonia y sus derivados

Está definido como *patentamiento* al conjunto de actividades de solicitudes, publicación, registro y otorgamiento de varias patentes.

4.1. Actividad de publicación de patentes

La Figura 4 muestra la actividad en la publicación de patentes que involucran el uso de la colofonia o cualquiera de sus derivados, actividad que refleja una tendencia de crecimiento sostenido entre 2013 – 2017, producto del renovado interés que ha demostrado la industria por la utilización de materias primas provenientes de recursos naturales renovables, con una orientación hacia el aprovechamiento sostenible de los mismos.

Tabla 1: Descripción de los códigos de patentes utilizados en la estrategia de búsqueda

Clasificación de Patente	Código	Descripción
Clasificación Internacional de Patentes (International Patent Classification, IPC)	C09F1/00	Obtención, purificación o modificación química de resinas naturales, p. oleo-resinas
Clasificación Cooperativa de Patentes (Cooperative Patent Classification, CPC)	C08L93/00	Composiciones de resinas naturales; Composiciones de derivados de las mismas
Clasificación Cooperativa de Patentes (Cooperative Patente Classification, CPC)	C08G63/00	Compuestos macromoleculares obtenidos por reacciones que forman un enlace de éster carboxílico en la cadena principal de la macromolécula

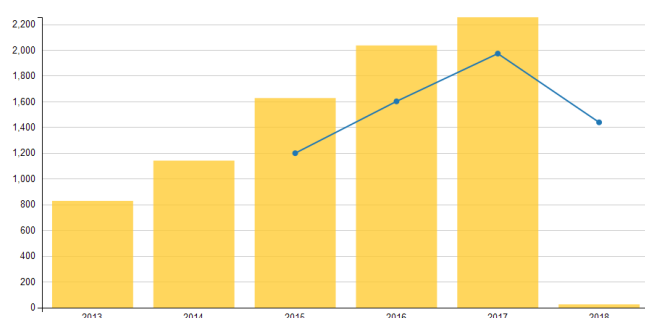


Figura 4: Actividad de publicación de patentes por año.

Por otro lado, el avance tecnológico que involucra el tratamiento de la resina de pino para la obtención de colofonia de mayor calidad y de sus subsecuentes modificaciones químicas, dando lugar a compuestos con un mejor desempeño industrial, le dio marcadas ventajas sobre sus competidores más cercanos y menos costosos, representado este hecho por las resinas hidrocarbúricas [1]. Esto le permitió superar la barrera de la ventaja económica, incrementando así su aplicación en la formulación de productos de alto rendimiento.

El crecimiento ha sido sostenido desde año 2013 hasta el 2017, registrándose un máximo de publicaciones de patentes en ese último período, el cual coincide con una disminución en los precios de la colofonia de goma sin modificar, la Figura 5 muestra esta tendencia.

En el año 2018 ocurrió una clara contracción en

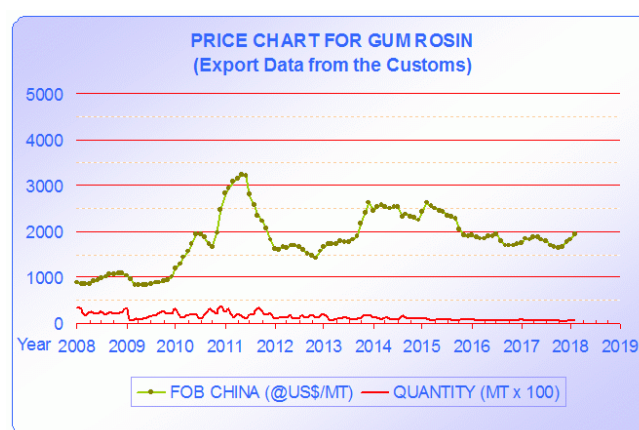


Figura 5: Variación del precio y volumen de exportación de la Colofonia

la tendencia que se venía registrando desde el año 2013. Para el primer cuatrimestre del año en curso, se esperaba la publicación de aproximadamente 328 patentes, donde se involucrara a la colofonia o sus derivados en la formulación de productos, sin embargo, sólo se registraron 25 publicaciones. A pesar de que se evidencia un aumento en el precio de exportación de la colofonia, este no es tan significativo como para impactar de forma importante en la actividad de publicación de patentes. Por otro lado, más adelante veremos el impacto del desarrollo de innovaciones general de las industrias que agrupan la aplicación de la colofonia y sus derivados, en la contracción registrada

4.2. Aplicaciones industriales de la colofonia y sus derivados

El análisis de patentes en función del Código Comercial de Patente (CPC, por sus siglas en inglés) permitió clasificar y agrupar las publicaciones según su utilización en la formulación de productos de consumo.



Figura 6: Tendencias de patentamiento en la utilización de la colofonia y sus derivados en la formulación de productos de diversas industrias de manufactura

Entre las principales aplicaciones de estos compuestos, resalta su utilización en la manufactura de adhesivos, recubrimientos, gomas, agentes reveladores y tintas, como mercados principales como se muestra en la Figura 6. El desempeño de los derivados de la colofonia en la formulación de estos productos se ha visto mejorado gracias a la obtención de compuestos cada vez más estables y con colores más claros, impartiendo una mejor adhesividad, capacidad de transferencia, humectación, entre otras.

Entre los adhesivos, resalta su aplicación como agente de pegajosidad en la manufactura de estos productos de características de curado termofusible y de presión [9]– [13]. En el área de manufactura de recubrimientos, destacan las formulaciones anti-incrustantes, importantes en la fabricación de barcos y pinturas para automóviles para su preservación en ambientes marinos [14]–[20].

El área de reveladores involucra la utilización de los derivados de la colofonia como agente aglu-

tinante en la manufactura de tóner y reveladores electrostático de imágenes [21]–[26]. Mientras que, en la industria de tintas se observa su aplicación en manufactura de tintas de impresión y de escritura directa con bolígrafo. El mayor desarrollo lo llevan las tintas de impresión, donde resaltan las utilizadas en la tecnología offset, inkjet y huecogrado [27]–[31].

El área de gomas, involucra la utilización de los derivados de la colofonia como asistente en la copolimerización del SBR para la manufactura de caucho sintético y como aditivo en la manufactura de la correa interior de neumáticos que tiene como función prevenir la difusión gradual de aire a través de la estructura del caucho. También han sido utilizados en la manufactura de gomas de cloropreno para la industria textil y de calzado, así como en la producción de otros tipos de goma con fines industriales como cintas transportadoras [32]–[36].

Además de estos mercados históricos para la colofonia, también se evidencian otras aplicaciones que reflejan las amplias propiedades de los químicos del pino y que proyectan favorablemente el aprovechamiento del recurso natural renovable en el futuro cercano.

Dentro de las Tecnologías para el manejo de desechos sólidos, la colofonia y sus derivados están involucrados en la utilización del fosfoyeso para la elaboración de materiales de construcción. Su capacidad para aumentar la adhesividad específica, además de formar una capa aislante e impermeable, son características interesantes para su inclusión en la formulación de materiales de construcción como bloques, vigas y morteros. Por otro lado, la estructura molecular de los ácidos resínicos, en los que coexisten un grupo orgánico polar como el ácido carboxílico, junto con un cuerpo apolar como el esqueleto fenantrénico, le confiere excelentes propiedades de compatibilidad con una amplia gama de polímeros y solventes, por lo que se ha venido utilizando en el procesos de extrusión para la recuperación de caucho y neumáticos usados [37]–[41].

En el área de cosméticos y productos farmacéuticos, los compuestos resínicos están siendo utilizados para la elaboración de parches medicinales y

dispositivos de dosificación transdérmica. Por otro lado, la investigación de la actividad biológica ha llevado al patentamiento de compuestos biocidas y anti-edad.

En la clasificación Varillas, electrodos y materiales para soldadura o corte, se incluyen los flujos o fundentes de soldadura para componentes electrónicos, productos que limpian y preparan las superficies para soldar al tiempo que evitan la oxidación durante el proceso de soldadura. El flujo de soldadura elimina el material que inhibe la adhesión uniéndose a las impurezas y levantándolas. Estas pastas pueden venir incluidas en el núcleo del alambre de soldadura, o como un producto aparte para su aplicación durante el proceso [42]–[46].

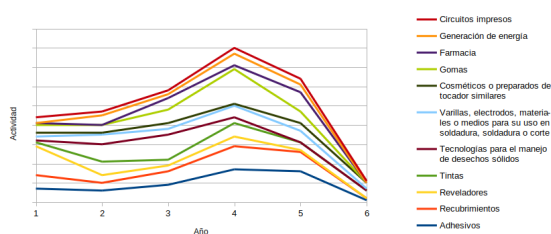


Figura 7: Actividad de publicación de patentes por año, en función del área de manufactura

Si evaluamos la actividad en publicación de patentes en cada área por año tal y como se presenta en la Figura 7, podemos observar que del año 2013 al 2015 la aplicación de los derivados de la colofonia presentaba un incremento lento. Sin embargo, entre los años 2016 y 2017, se evidencia un aumento más pronunciado como consecuencia de la disminución de los precios en los puertos del mayor exportador de colofonia sin modificar (China). Esto impactó favorablemente, llevando al desarrollo de nuevos compuestos con características de desempeño mejoradas y la inclusión de la colofonia y sus derivados en una mayor cantidad de formulaciones de bienes de consumo.

La actividad de publicación total de patentes en el área de adhesivos se muestra en la Figura 8, donde se evidencia un comportamiento estable

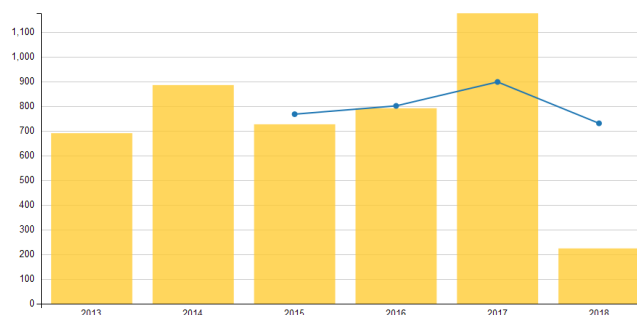


Figura 8: Actividad de patentamiento general para el área de adhesivos

en los primeros 4 años, hasta que se alcanza un incremento de casi el 50 % en el año 2017.

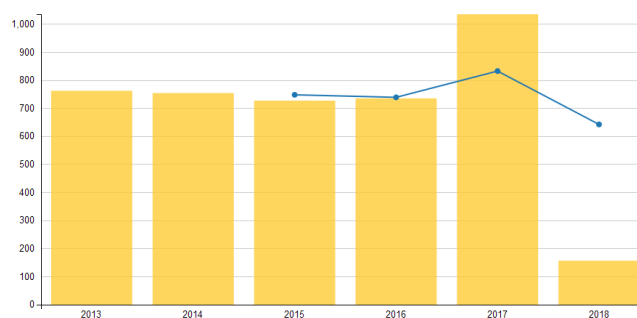


Figura 9: Actividad de patentamiento general para el área de gomas

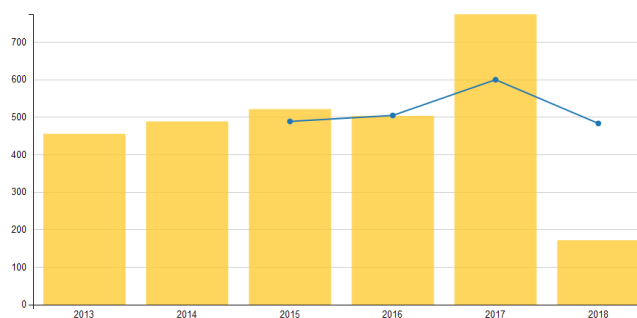


Figura 10: Actividad de patentamiento general para el área de tintas

El comportamiento patentario total se repite para las áreas de manufactura de gomas y tintas, como se evidencia en las Figuras 9 y 10, donde se

evidencia un detrimento en la publicación total de patentes con respecto al área de adhesivos. Específicamente, el área de tintas se ha visto impactada por la tendencia mundial de disminución de generación de documentos impresos en las industrias de publicidad, comunicacional, edición de libros, revistas, fotografías; motivado por la sustitución de estos productos por documentos digitales, que se traducen en una disminución importante en el costo y mayor disponibilidad.

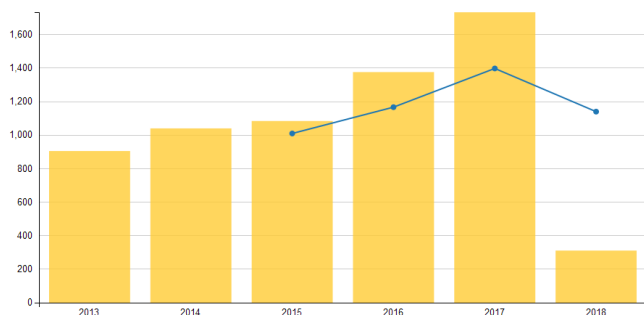


Figura 11: Actividad de patentamiento general para el área de recubrimientos

El área de recubrimientos, como se muestra en la Figura 11, registra un incremento sostenido desde el año 2014, alcanzando un pico mayor a los observados en las tres áreas de manufactura analizadas anteriormente, lo que se traduce en un mayor interés en esta aplicación de acuerdo a un incremento de aproximadamente 500 publicaciones de patentes.

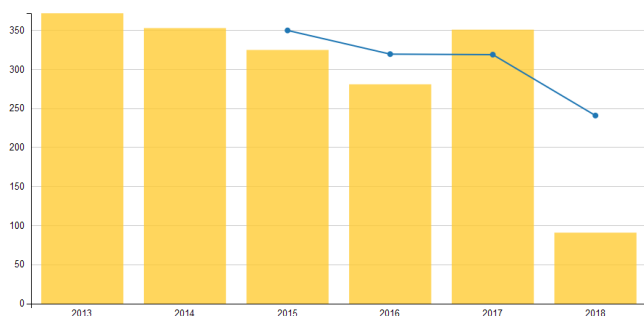


Figura 12: Actividad de patentamiento general para el área de reveladores

En contraste, la actividad de patentamiento del área de reveladores, mostrada en la Figura 12, registró una disminución continua desde el año 2013. Este comportamiento responde, al igual que el área de tintas, a un interés mundial en la reducción de productos impresos, motivados a las razones anteriormente expuestas.

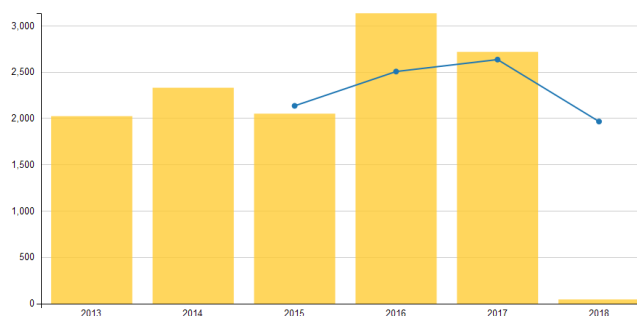


Figura 13: Actividad de patentamiento general para el área de manejo de desechos sólidos

El área de manejo de desechos sólidos es la de mayor impacto, en función de la cantidad de publicaciones de patentes, como se muestra en la Figura 13, superando por más del doble al área de recubrimientos, en un comportamiento neto de crecimiento. Esta tendencia responde al interés mundial en la recuperación de materiales residuales de diferentes procesos productivos, promoviendo la implementación de la economía circular mediante la valorización de residuos.

Cuando se evalúa la actividad anual de publicación de patentes total de las 6 áreas de manufactura, adhesivos, recubrimientos, gomas, reveladores, tintas y desechos sólidos, con mayor impacto en la aplicación de los compuestos de colofonia como lo presenta la Figura 7, se evidencia una contracción en todas ellas para el año 2018. Incluso, el análisis cuatrimestral evidencia que la publicación de patentes en el primer período del año en curso, estuvo por debajo de la tendencia esperada según el comportamiento en el año 2017, en todas las áreas de manufactura estudiadas. Este comportamiento tuvo un impacto directo en la publicación de patentes que incluyan a la colofonia o sus derivados para cada una de las industrias representadas por esas áreas, es decir,

el comportamiento presentado en la Figura 7 se debe al comportamiento en la actividad de patentamiento total de cada una de las áreas de manufactura, mostradas en las Figuras 8 – 13, donde la contracción e incremento en la publicación de patentes responde, no a un evento inherente a la utilización de la colofonia, sino más bien, a la tendencia general del área de manufactura. Esta tendencia explicaría de igual forma, la tendencia en la actividad de patentamiento general en la aplicación de la colofonia y sus derivados, presentada en la Figura 4.

4.3. Países líderes en la publicación de patentes

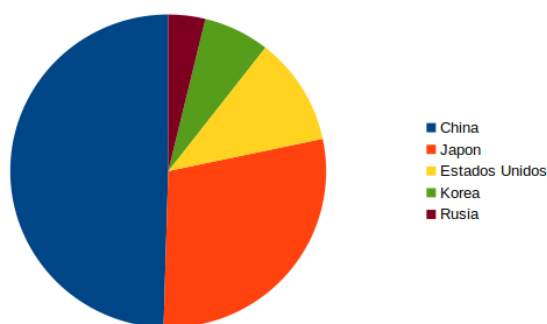


Figura 14: Actividad de publicación de patentes por país

La publicación de patentes se concentra principalmente en China, Japón y Estados Unidos, como se muestra en la Figura 14.

China es el principal país productor de resina de pino a nivel mundial, cuyas exportaciones de colofonia representan el 48 % de la totalidad del intercambio internacional [3]. Por lo tanto, es la sede un gran número de empresas manufactureras de colofonia y sus derivados, principales interesados en el desarrollo científico y generación de innovaciones en el área. Además, la disponibilidad de la materia prima sumado al avance tecnológico que caracteriza al parque industrial de ese país, constituyen en una gran ventaja para el desarrollo de resinas con diferentes aplicaciones en la industria.

Estados Unidos es otro país tradicionalmente productor de resina de pino y colofonia, registrando

un auge a mediados del siglo XIX y principios del siglo XX en la producción, así como en el desarrollo científico involucrado en la resinación, obtención y posterior modificación química de la trementina y colofonia de goma. Actualmente ha sido sustituida casi totalmente por la obtención de químicos del pino provenientes de la producción de papel, como lo son el Tall Oil Crudo, Ácidos grasos de Tall Oil (TOFA, por sus siglas en inglés), y la Trementina y Colofonia de Tall Oil [3]; debido principalmente a los altos costos de mano de obra involucrados en el proceso de resinación de los pinos en comparación con el proceso completamente industrializado para la separación de químicos del pino en la industria del papel. Sin embargo, los derivados de la colofonia de goma son ampliamente utilizados por las empresas manufactureras de adhesivos, tintas, pinturas y recubrimientos del país, debido a las características químicas y físicas únicas de estos compuestos, que los hacen tan atractivos para estas industrias que se encuentran en constante crecimiento. Por lo tanto, Estados Unidos alberga una cantidad importante de empresas dedicadas a la modificación de colofonia de goma de origen chino, para surtir a la industria local e internacional de estas materias primas, utilizadas en la formulación de productos de especialidades químicas con altos niveles de calidad y rendimiento.

Por otro lado, el gobierno Japonés ha venido impulsando la sustitución de materias primas sintéticas por sus contrapartes de origen natural, a través de la implementación de la “Estrategia Global de Biomasa de Nipón” [47]. En la que, entre otras cosas, se incentiva a las empresas manufactureras a la utilización de materias primas provenientes de recursos naturales renovables, en el diseño de productos con una filosofía de responsabilidad ambiental. La cercanía con China le permite disponer de la materia prima fácilmente, por lo que varias empresas japonesas se han especializado en la modificación de la colofonia para el diseño de resinas con características químicas interesantes y que pueden ser utilizados en la formulación de productos a partir de materias primas de biomasa, que encuentran gran interés en la industria manufacturera japonesa por el

incentivo mencionado.

Otros países que resaltan en la publicación de patentes son Rusia y Korea, cuyo rápido crecimiento industrial y la mejora de los estilos de vida de estos países han llevado a una creciente demanda de productos de calidad superior de las industrias de uso final, a saber, automoción y construcción. Esto ha derivado en el desarrollo de productos químicos especializados que encuentran en la colofonia, propiedades de desempeño importantes para estas industrias en constante crecimiento.

4.4. Compañías aplicantes líderes

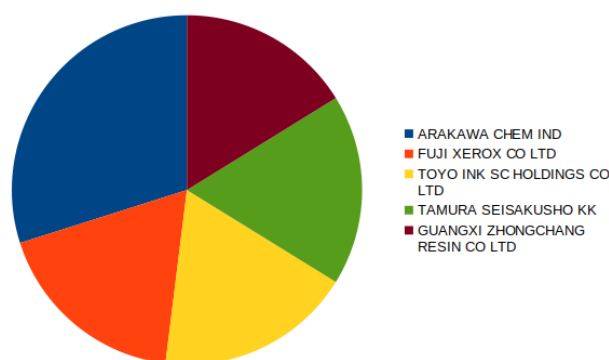


Figura 15: Compañías aplicantes líderes en la publicación de patentes

La Figura 15 muestra que las principales compañías aplicantes en el área en estudio son de origen asiático. A pesar de que China es el país con mayor número de patentes publicadas en el área, las compañías más importantes están ubicadas en Japón. Esto es como consecuencia del interés del gobierno japonés en la implementación de la “Estrategia Global de Biomasa de Nipón” [47].

La compañía con una mayor cantidad de publicaciones de patentes en los últimos 5 años, es ARAKAWA CHEMICAL INDUSTRIES, LTD. La sede principal está ubicada en Japón y cuenta con una trayectoria de procesamiento y modificación de colofonia desde su establecimiento en el año 1876. Ésta ha evolucionado hasta alcanzar el establecimiento de bases manufactureras en China, Taiwan, Tailandia, Alemania y Estados Unidos. Fabrican materiales intermedios para uso industrial

bajo cuatro líneas de producción: Químicos para producción de papel, Productos químicos de revestimiento y Materiales adhesivos (resinas para tintas, adhesivos de uso común y sensibles a la presión), y Materiales funcionales en el área de Materiales electrónicos (agentes de limpieza y sistemas para componentes electrónicos, soldadura aplicable a esos componentes y materiales de revestimiento para dispositivos). Trabaja con materia prima de origen Chino y controlan más de la mitad de la importación de colofonia en Japón. Arakawa Chemical desarrolló la primera colofonia casi incolora y transparente del mundo. Debido a que las cantidades de impurezas son muy pequeñas en comparación con la colofonia normal, ésta se usa como componente adherente en aplicaciones médicas.

La compañía de manufactura de dispositivos y consumibles para reproducción en papel FUJI XEROX CO., LTD, tuvo un aporte importante en la publicación de patentes que involucran derivados de la colofonia en la manufactura de tóner en el año 2013. A pesar de haber disminuido en los años posteriores, la actividad se mantuvo hasta el 2017, año en el que la gerencia general de la compañía fue reemplazada. Esto evidencia que la nueva administración no tiene como prioridad la utilización de materias primas renovables dentro de su política de investigación y desarrollo de nuevos productos. Sin embargo, es importante destacar cómo este comportamiento no es representativo de la industria de materiales reveladores de imagen en general (Figura 9), la tendencia de patentamiento en esta área disminuyó, pero se mantuvo en una cierta estabilidad.

La empresa TOYO INC SC HOLDINGS CO., LTD, se dedica a la manufactura de colorantes y materiales funcionales, polímeros y recubrimientos, impresión e información, y negocios relacionados con materiales de empaque en Japón e internacionalmente. Es una empresa comprometida con el desarrollo de productos ambientalmente conscientes, en atención a la “Estrategia Global de biomasa de Japón” impulsada por ese país a partir del año 2002. Para ello se basa en una filosofía de desarrollo de tres líneas

1. Libre de VOC, no fósil, bajo en VOC (desarrollo de tintas base acuosa);
2. Ahorro de energía y conservación de recursos (tintas libres de tolueno y recuperación de los solventes) y
3. Utilización de ingredientes naturales (tintas y adhesivos utilizando biomasa).

Así, se pueden encontrar en el portafolio de productos de biomasa certificados, resinas de derivados de colofonia con aplicación en la manufactura de adhesivos termofusibles sensibles a la presión, utilizados para el etiquetado envoltorio de botellas PET; y tintas para impresión Offset, Heat-Seat y de curación UV, implementadas en la impresión de revistas, folletos, catálogos, etc.

TAMURA SEISAKUSHO KK (Tamura Corp.) es una empresa que se dedica a la manufactura de componentes electrónicos, químicos para electrónicos y sistemas FA, y equipos de información. El Grupo Tamura tradicionalmente ha certificado productos que contribuyen a la reducción de la carga ambiental como “productos de diseño ecológico” (evaluados por los propios estándares de evaluación de la compañía). Luego se establecieron e introdujeron estándares de evaluación ambiental jerárquica para productos, y en octubre de 2010, comenzaron a aplicar estos nuevos estándares para certificar productos especialmente superiores como “productos de diseño ecológico de primer nivel”. Esta filosofía de desarrollo tecnológico favoreció la utilización de los derivados de colofonia en la formulación de flujos de soldadura adecuados para la manufactura de componentes y equipos electrónicos.

Guangxi Zhongchang Resin Co., Ltd, antiguamente conocida como Wuzhou Zhongchang Resin Co., Ltd, es una empresa especializada en el diseño, producción, procesamiento y comercialización de derivados de colofonia modificada (ésteres, resinas maleicas, resinas fenólicas, etc.), ampliamente utilizados para la producción de adhesivos, tinta, pintura y recubrimientos, fabricación de papel, plástico, flujo electrónico, pintura al óleo, EVA, caucho sintético, entre otros. Fue establecida en el año 2003 y está ubicada en la ciudad de Wuzhou, China. Esta ciudad se encuentra en la provincia de

Guangxi, la cual cuenta con grandes extensiones de plantaciones de pino y por lo tanto, es el centro productor de resina de pino del país.

5. Conclusiones

Durante el período 01/2013 – 04/2018, se registraron 7.839 innovaciones que involucran a la colofonia o cualquiera de sus derivados en la formulación de productos de consumo. Las industrias que destacan en la aplicación de estos compuestos son la de adhesivos, recubrimientos, tintas, reveladores de imagen, circuitos impresos, elementos de soldadura o corte, gomas, farmacia y circuitos impresos. La actividad de publicación de patentes mantuvo una tendencia en crecimiento hasta el 2017, como consecuencia de tres factores principales: disminución de los precios de la colofonia, aplicación de políticas hacia la utilización de biomasa en la manufactura de bienes de consumo y crecimiento de las industrias manufactureras consumidoras de los derivados de la colofonia.

En cuanto a la ubicación geográfica de los centros innovadores podemos identificar a China, Japón y Estados Unidos como los países líderes. Los aplicantes con mayor número de publicación de patentes son de origen asiático. Entre los 5 primeros se identifican cuatro (04) empresas japonesas (ARAKAWA CHEMICAL INDUSTRIES, LTD; XEROX CO., LTD; TOYO INC SC HOLDINGS CO., LTD y TAMURA SEISAKUSHO KK (Tamura Corp.)) y una (01) empresa radicada en China (Guangxi Zhongchang Resin Co., Ltd).

6. Referencias

- [1] Armando Silvestre and Alessandro Gandini. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Sources*, chapter Rosin: Major Sources, Properties and Applications, pages 67–88. Elsevier, Oxford, Reino Unido, 2008.
- [2] Sukumar Maiti, Sabyasachi Sinha Ray, and Achintya K. Kundu. Rosin: A renewable resource for polymers and polymer chemicals. *Progress in Polymer Science*, 14(3):297–338, 1989.
- [3] Smita Bhatia. Global impact of the modern pine chemical industry. Informe técnico, Lakshmikumaran & Sridharan, Pine Chemicals Association, Fernandina Beach, FL, USA, 2016.

- [4] Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Universidad de Los Andes. Propiedades físicas y mecánicas para la especie pinus caribbea var. hondurensis, de 25 años de edad provenientes de Maderas del Orinoco, Estado Monagas. Informe técnico, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Vernezucla, 2016.
- [5] Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Universidad de Los Andes. Trabajabilidad de madera de pino (Pinus caribaea Var. Hondurensis) resinado y no resinado proveniente de las plantaciones de 25 años de edad (Uverito, Monagas). Informe técnico, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Vernezucla, 2016.
- [6] Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Universidad de Los Andes. Anatomía comparativa de la madera de pino (Pinus caribaea var. Hondurensis), resinado y no resinado, proveniente de plantaciones de 25 años de edad (Uverito, Monagas). Informe técnico, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Vernezucla, 2016.
- [7] Intevp. Desarrollo de formulaciones óptimas de surfactantes provenientes de la resina cruda de pino caribe para aplicaciones de recuperación mejorada de crudos de la faja, reducción de la viscosidad de crudos pesados y extrapesados y lodos de perforación. Informe técnico, PDVSA, Caracas, Vernezucla, 2016.
- [8] H. Panda. *Handbook on Oleoresin and Pine Chemicals (Rosin, Terpene Derivatives, Tall Oil, Resin & Dimer Acids)*. Asia Pacific Business Press Inc., Delhi, India, 2008.
- [9] M. Kono, H. Abe, T. Tanatsugu, and K. Sasakura. WO2017094372A1, Tackifier resin and pressure-sensitive adhesive composition, 2017. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.
- [10] Y. Ishikawa, T. Toda, Y. Ishido, and A. Oguri. WO2017073722A1, Double-sided pressure-sensitive adhesive tape, 2017. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.
- [11] T. Pernecker, C. Holmes, and L. Quinlan. US2016122607A1, Rosin ester tackifiers for pressure-sensitive adhesives, 2016. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [12] N. Yamada and T. Uchida. US2016186015A1, Pressure-sensitive adhesive transfer tape and transferring implement, 2016. Oficina de Patentes de Japón.
- [13] K. Fujimaru and T. Nonaka. US2015315436A1, Adhesive agent, adhesive film, and semiconductor device and method for manufacturing same, 2015. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [14] H. Tanaka and J. Nimoto. WO2017094767A1, Antifouling composite coating film, antifouling substrate, and method for manufacturing antifouling substrate, 2017. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.
- [15] H. Tanaka and J. Nimoto. WO2017094768A1, Antifouling coating composition, antifouling coating film, antifouling base, and method of manufacturing antifouling base, 2017. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.
- [16] J. Nimoto and S. Harada. WO2017022661A1, Antifouling coating material composition, antifouling coating film, antifouling substrate, rosin compound for antifouling coating material composition, and method for manufacturing antifouling coating material composition, 2017. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.
- [17] A. Esmurziev and R. Helberg. EP3078715A1, Antifouling composition, 2016. Organización Europea de Patentes.
- [18] T. Miyamoto and N. Shinozawa. WO2015019750A1, Poly(lactic acid) resin, poly(lactic acid) resin composition, and ship bottom paint, 2015. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.
- [19] S. Olsen and D. Moller-Yebra. US2014242403A1, Self-polishing antifouling paint composition comprising solid particles of entrapped or encapsulated rosin constituents, 2014. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [20] J. Tofte and Henrik. US2013209389A1, Loaded gel particles for anti-fouling compositions, 2013. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [21] Sacripante G. and R. Vereguin. US2015315436A1, Toner compositions and processes, 2016. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [22] K. Zhou and G. Sacripante. US2016349642A1, Low fixing temperature sustainable toner, 2015. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [23] H. Ninuma and T. Kanamura. US2016179023A1, Film-forming toner, 2016. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [24] Y. Sato and N. Kamatani. US2015232604A1, Polymerized rosin compound and production method therefor, 2015. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [25] S. Chonan and S. Yamasaki. US2014106271A1, Polyester for toner, electrostatic-image developing toner, electrostatic-image developer, toner cartridge, process cartridge, image-forming apparatus, and image-forming method, 2015. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [26] K. Zhou and R. Carlini. US2013337377A1, Toners with improved dielectric loss, 2013. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
- [27] S. Sakurada and S. Tanaka. EP3300917A1, Image recording method, and transfer assisting liquid and liquid set used therefor, 2018. Organización Europea de Patentes.
- [28] Y. Ohashi and H. Hisada. EP3279276A1, Resin for ink, and ink, 2018. Organización Europea de Patentes.
- [29] H. Takemoto and K. Isobe. EP3263660A1, Inkjet ink, 2018. Organización Europea de Patentes.
- [30] T. Kitaguchi and T. Asou. WO2017043301A1, Metal-powder-pigment ink composition for oil-based marking pen, 2017. Organización Mundial de Propiedad Intelectual.

- Intellectual.
- [31] N. Nichimura. US2016369117A1, Aqueous inkjet pigment dispersion, method for producing same, and aqueous inkjet ink, 2016. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [32] L. Sun and M. Olechnowicz. US2018037729A1, Drag reducing composition, 2018. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [33] T. Kimura. US2016376426A1, Rubber composition and tire, 2016. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [34] J. Chenchy and G. Buisman. US2016251503A1, Additives for rubber compositions, 2016. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [35] T. Ogi and L. Zhou. US2016208074A1, Agglomerated silica, rubber composition, tire, producing method of agglomerated silica, and producing method of rubber composition, 2016. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [36] D. Sato. US2013030102A1, Tire rubber composition and pneumatic tire, 2013. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [37] J. Chang. WO2016052968A1, Environmentally friendly paper tube for packaging ammunition, 2016. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual.
 - [38] F. Wei. CN105314925A, Green energy-saving heat preservation material and preparing method thereof, 2016. Administración Nacional de Propiedad Intelectual de la República China.
 - [39] H. Wang. CN105036644A, Rosin-efficient water-reducing concrete pile, and preparation method therefor, 2015. Administración Nacional de Propiedad Intelectual de la República China.
 - [40] C. Wu. CN104987007A, Aerated bricks made of waste phosphorus slag, 2015. Administración Nacional de Propiedad Intelectual de la República China.
 - [41] E. Huang. CN104926228A, Compression-resistant and easily-demoulded plant fibers cement composite batten and manufacturing method thereof, 2015. Administración Nacional de Propiedad Intelectual de la República China.
 - [42] M. Morales and L. Radzilowski. US2018063967A1, Interconnections formed with conductive traces applied onto substrates having low softening temperatures, 2018. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [43] M. Kakuishi and K. Minegishi. US2017355042A1, Tire rubber composition and pneumatic tire, 2017. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [44] D. Ichikawa and R. Izumi. US2017282304A1, Solder composition and electronic board, 2017. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [45] R. Sidhu and M. Renavikar. US2014175160A1, Solder paste material technology for elimination of high warpage surface mount assembly defects, 2014. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [46] R. Sihdu and M. Dudek. US2014084461A1, Flux materials for heated solder placement and associated techniques and configurations, 2014. Oficina de Patentes de Estados Unidos.
 - [47] Christopher M. Dent. *Renewable Energy in East Asia: Towards a New developmentalism*. Taylor & Francis, Routledge, 2nd edition, 2016.

Impact toughness of the duplex stainless steel SAF 2304, with heating between 1100°C y 1300°C

Laura Sáenz^{*,a}, Edwin Patiño^b

^aUniversidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí- Ecuador.

^bEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- In the present investigation the impact toughness of a SAF 2304 duplex stainless steel, subjected to heating between 1100°C and 1300°C during a time of 30 minutes, was evaluated. The working conditions were, original condition, heating at 1100 °C, 1200 °C and 1300 °C for 30 min respectively. After the heat treatment to the tensile and impact specimens, the mechanical tests of tension, impact and hardness were carried out. The samples prepared metallographically were observed by the optical microscope (MO) and scanning electron microscope (SEM). It was observed the presence of inclusions with high proportion of aluminum, chromium, among others. From the Vickers microhardness test, an increase in microhardness was observed in the ferrite phase in the three conditions applied to the heat treatment compared to the original condition. For the austenite phase there is an increase of micro hardness Vickers for the conditions of 1100 °C and 1200 °C compared to the original condition while at 1300 °C it reduced with respect to the original condition. It was determined that there is a slight decrease in the impact toughness at 1100 °C and 1200 °C compared to the original condition while at 1300 °C a small recovery of its capacity to absorbed energy is carried out.

Keywords: duplex stainless steel SAF 2304; heating; impact toughness; microhardness; mechanical behavior.

Tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF-2304, con calentamientos entre 1100°C y 1300°C

Resumen.- En la presente investigación se evaluó la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF 2304, sometido a calentamientos comprendidos entre 1100°C y 1300°C durante un tiempo de permanencia en el horno de 30 min. Las condiciones de trabajo fueron, condición original, calentamientos a 1100°C, 1200°C y 1300°C por 30 min respectivamente. Luego de efectuado el tratamiento térmico a las probetas de tracción e impacto se realizaron los ensayos mecánicos de tracción, impacto y dureza. Las muestras preparadas metalográficamente se observaron mediante el microscopio óptico (MO) y microscopio electrónico de barrido (MEB). Se observó la presencia de inclusiones con alta proporción de aluminio, cromo, entre otras. Del ensayo de microdureza Vickers, se observó en la fase ferrita ocurre un incremento en la microdureza en las tres condiciones aplicadas el tratamiento térmico comparado con la condición original. Para la fase austenita hay un incremento de micro dureza Vickers para las condiciones de 1100°C y 1200°C comparados con la condición original mientras que en 1300°C decae respecto a la condición original. Se determinó que hay una leve disminución de la tenacidad de impacto a 1100°C y 1200°C comparándola con la condición original mientras que a 1300°C se efectúa una pequeña recuperación de su capacidad de absorber energía.

Palabras claves: acero inoxidable dúplex SAF 2304; calentamiento; tenacidad de impacto; microdureza; comportamiento mecánico.

Recibido: marzo 2018

Aceptado: octubre 2018

1. Introducción

Los aceros dúplex se han convertido en aleaciones de uso creciente en la industria química y del gas, así como las industrias derivadas del petróleo, y en general donde se trabajen con fluidos y ambientes corrosivos. Estos aceros se desarrollaron a fin de conseguir una mayor resistencia a la corrosión en medios ricos en

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lasaenz@espe.edu.ec (Laura Sáenz)

cloruros, como el agua de mar y en ambientes con altos contenidos de sulfuros, características que les confiere una gran aplicabilidad en la industria petrolera y química. Por este motivo y debido al acelerado crecimiento industrial, resulta de gran importancia e interés conocer los estudios realizados a estos aceros. Para de este modo tener una información detallada sobre su comportamiento y propiedades mecánicas en distintas condiciones de trabajo y de esta manera fomentar su aplicación en todos los campos de la industria en los que sus excelentes propiedades le confieren grandes beneficios respecto a otros aceros inoxidables [1, 2].

El acero inoxidable ha llegado a situarse dentro de la industria moderna como un material básico para los procesos productivos y aplicaciones industriales. Su alto grado de resistencia, durabilidad así como la excelente estabilidad lo han convertido en un elemento indispensable, pero es sin duda su resistencia a la corrosión lo que lo ha dotado de una situación privilegiada en los industrias química, petroquímica y gas, en las cuales ofrecen una elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento, también en las industria de alimentos, bebidas y en la industria farmacéutica, ya que proveen al producto excelentes condiciones de higiene y duración a largo plazo permaneciendo casi inalterables en el tiempo [1, 2].

Los aceros inoxidables se caracterizan principalmente por su resistencia a la corrosión, elevada resistencia y ductilidad, y elevado contenido de cromo. Se llaman inoxidables porque el Cr es un metal reactivo y se combina con el oxígeno (aire) o en cualquier otra condición oxidante para formar una película forman una película delgada y dura muy adherente de óxido de cromo (Cr_2O_3) u óxido de níquel (Ni_2O_3), que protege al metal contra el ataque de sustancias químicas y la corrosión (pasivación). Esta película protectora se vuelve a formar en caso de que se raye la superficie. Para que ocurra la pasivación, el contenido mínimo de cromo debe ser 10 a 12 % por peso [3].

Para aumentar la resistencia a la corrosión el cromo puede aumentarse y pueden añadirse otros elementos tales como níquel o molibdeno. El grado

de impenetrabilidad de la capa de óxido en ciertos ambientes depende no sólo de la composición de la aleación, sino también en el medio específico, de la temperatura de éste, y de la concentración del agente corrosivo.

Los aceros inoxidables no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, sino más bien estos ácidos facilitan la formación de la película protectora; por otra parte estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores como el ácido clorhídrico o fluorhídrico, y son atacados por las sales de ellos (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros) [3].

Debe recordarse que cuando los aceros inoxidables sufren corrosión esta no es uniforme como en el caso de los aceros al carbono, sino localizada, por picaduras (pitting) o fisuras por corrosión bajo tensión. Debido a ello no puede prevenirse por el agregado de sobre espesores sino que debe evitarse la corrosión misma por medio de un conocimiento profundo del medio corrosivo y el acero utilizado [3].

Según la estructura microscópica que presenten los granos, además de su composición química los aceros inoxidables se clasifican en cuatro grandes grupos como son: aceros inoxidables austeníticos, aceros inoxidables ferríticos, aceros inoxidables martensíticos y aceros inoxidables dúplex. La selección adecuada dependerá de los requerimientos como son: resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas, propiedades mecánicas del acero, características de los procesos de transformación a que será sometido, costo total (reposición y mantenimiento) y disponibilidad de acero [4].

La denominación dúplex se aplica a un tipo de acero inoxidable, cuya composición química ha sido cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta, esta microestructura bifásica está formada por fracciones de volumen similares de austenita (γ) que le brinda un grado de tenacidad mayor y ferrita (α) que confiere resistencia al acero. Este tipo de acero inoxidable se logra incorporando a un acero ferrítico, una cantidad pequeña y controlada de Ni (en ocasiones N) [4].

El empleo del N como elemento de aleación

revolucionó el desarrollo de los aceros inoxidables, lo cual dio cabida a los aceros inoxidables de segunda generación; estos aceros poseen propiedades físicas y mecánicas superiores, es como unir las mejores características de dos estados del acero en un solo material. Entre sus principales componentes químicos se encuentran el cromo (Cr) con un porcentaje mínimo de 11 % que le da gran resistencia a la corrosión, el níquel (Ni) (entre 4,5 y 6,5 %) que favorece a sus propiedades mecánicas. Estos materiales tienen la ventaja de poseer una elevada resistencia mecánica alcanzando valores de límite elástico entre 700-900 MPa [4].

En la actualidad los aceros inoxidables dúplex representan el tercer tipo de acero inoxidable con más demanda en el mercado. Su principal característica dentro de los aceros inoxidables radica en su comportamiento superior al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo o stress corrosión cracking (SCC), proceso en el cual los aceros inoxidables convencionales presentan muy baja resistencia.

Los aceros inoxidables dúplex son una excelente alternativa para sustituir a los aceros inoxidables ferríticos y austeníticos debido a que mejoran las debilidades de estos aceros; en caso de los primeros su fragilidad frente a la corrosión por fatiga causada por cloruros, y en los segundos sus complicaciones para fabricarlos y soldarlos [5, 6, 7].

El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas con condiciones extremas de trabajo, también se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. Debido a las características y su amplia utilización es indispensable el estudio del acero a situaciones críticas que permitan evaluar su comportamiento y por ende clasificar sus ventajas y desventajas al aplicar tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas, la microestructura y la composición química son características determinantes para poner de manifiesto el comportamiento mecánico y metalúrgico que tendrá un material frente a procesos posteriores a los cuales será sometido, debido a que en la actualidad se han hecho pocos estudios en cuanto a las propiedades mecánicas significativas para la optimización del uso de

este material, se llevará a cabo esta investigación, para evaluar la tenacidad de impacto del acero inoxidable dúplex SAF-2304 sometido a un tratamiento térmico de calentamiento comprendido entre 1100°C y 1300°C.

2. Procedimiento experimental

2.1. Material

El material usado es un acero inoxidable dúplex SAF 2304, la composición química, se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición química del Acero dúplex SAF 2304 (en porcentaje peso).

Nombre	C	N	Cr	Ni	Mo
ASTM	0,02	0,10	23	4,8	0,30
Sandvick	0,02	0,10	22,25	4,1	0,35

2.2. Mecanizado de las probetas

El mecanizado de las probetas fue realizado a través de corte por chorro de agua y corte por electroerosión por hilo, las probetas fueron maquinadas acorde con las normas ASTM A -370 [8] para el ensayo de tracción y ASTM E-23 [9]. Para el ensayo de impacto Charpy, tipo sub-size. Las dimensiones de las probetas se especifican en las Figuras 1 y 2.

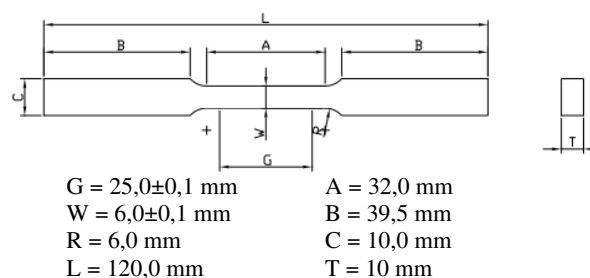


Figura 1: Dimensiones de probetas planas de tracción según normal ASTM A -370 [8].

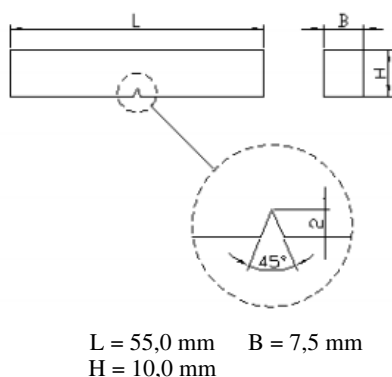


Figura 2: Dimensiones de probetas para el ensayo Charpy en “V” según norma ASTM E-23 [9].

2.3. Tratamiento Térmico

El acero inoxidable dúplex SAF-2304 fue tratado térmicamente en un horno marca Steriltech, modelo KLC-10/15 con un rango de temperatura de 0 a 1500°C. Las probetas Charpy y las de tracción fueron sometidas a un tratamiento térmico de recocido a temperaturas de 1100°C, 1200°C y 1300°C, la permanencia en el horno de las probetas fue de 30 min con un enfriamiento lento dentro de mismo.

2.4. Ensayos

El ensayo de tracción se realizó con una máquina Galdabini con capacidad máxima de carga de 200.000 N, en un área de agarre máximo de 176,71 mm², una velocidad máxima de máquina de 30 mm/min. Para el ensayo de impacto se utilizó una máquina marca Tinius Olsen la cual posee un rango de 0 a 41,5 Kpm. La microdureza Vickers fue evaluada utilizando un microdurómetro marca Leitzwetzlar Germany. Para evaluar la microestructura se utilizó el microscopio marca Versmet-2 Unión 7761. Mediante el procedimiento EDS se evaluó la composición química de cada una de las fases presentes en el material, se utilizó un detector de EDS marca Jeon modelo JSM-6390.

3. Resultados y Discusión

3.1. Propiedades Mecánicas

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las propiedades mecánicas evaluadas a través del ensayo de tracción. El comportamiento de la

resistencia mecánica y la ductilidad se puede observar en las Figuras 3 y 4.

Tabla 2: Propiedades mecánicas promedio para las diferentes condiciones [10].

Cond.	σ_y MPa	$\sigma_{m\acute{a}x}$ MPa	σ_{Rup} MPa	e (%)	RA (%)
Original	578,70	696,76	495,10	48,55	65,56
1100°C	594,38	708,34	420,18	49,85	75,33
1200°C	586,23	723,38	473,30	50,83	70,78
1300°C	586,70	725,33	470,16	51,92	73,60

σ_y : esfuerzo de fluencia.

σ_{Rup} : esfuerzo de ruptura.

RA: % reducción de área.

$\sigma_{m\acute{a}x}$: resistencia máxima.

e: % deformación ingenieril.

En la Tabla 2 se presentan los valores promedio de cada una de las propiedades mecánicas evaluadas para las diferentes condiciones y la representación gráfica se observa en las Figuras 3 y 4 donde se observa como a medida que incrementa la temperatura de recocido incrementa la ductilidad del material (Figura 2) siendo más evidente con la deformación de ingeniería %e, que incrementó de 48,55 a 51,92 a la temperatura de recocido de 1300°C, lo que indica un ablandamiento del material por efecto del tratamiento de recocido, mientras que la resistencia mecánica (Figura 1) incrementó a 1100°C y luego se mantiene constante en el rango de 1200 y 1300°C.

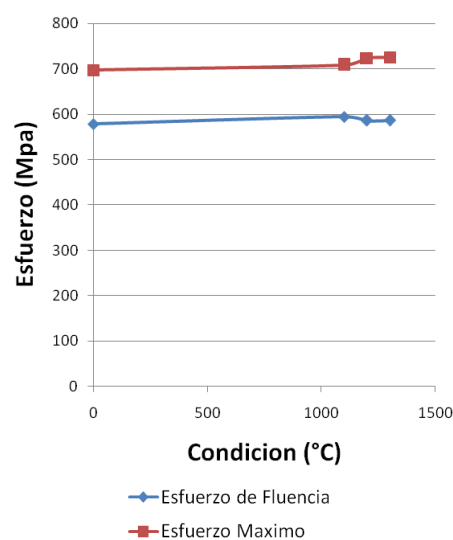


Figura 3: Curva de resistencia mecánica en función de las condiciones de investigación. [10].

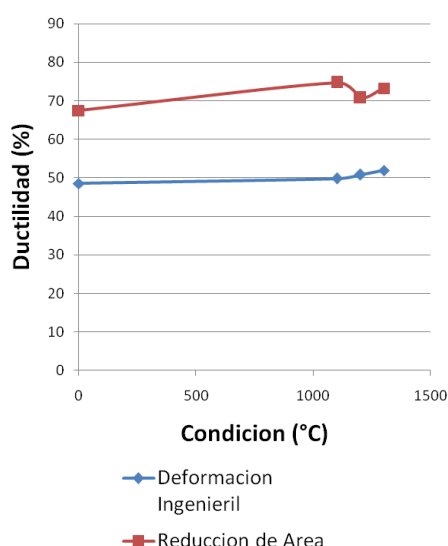


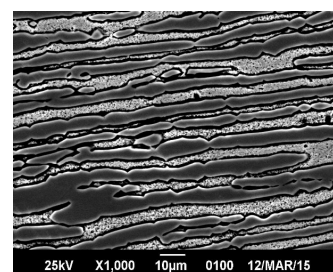
Figura 4: Curva Ductilidad en función de las condiciones de investigación [10].

3.2. Microestructuras

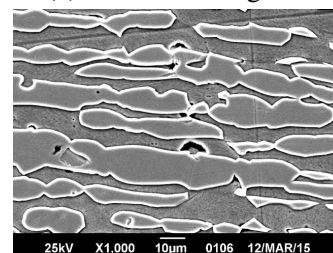
En la Figura 5 se observan por microscopia electrónica de barrido las microestructura del acero inoxidable Dúplex SAF 2304 en: Figura 5a la condición original, formada por ferrita y austenita (islas) típica de los aceros doble fase. En la Figura 5b se observa la microestructura del acero en la condición con tratamiento térmico de calentamiento a 1100°C, donde se observa precipitado, crecimiento de grano de la fase austenita. En la Figura 5c la condición es con tratamiento térmico de recocido a 1200°C a 500X donde se observan precipitados entre la intercara ferrita- austenita y los granos direccionados en el sentido de fabricación. En la Figura 5d se toma de la Figura 5c a 3500X con EDS un Punto de estudio 1 [10]. Para determinar la composición el punto de estudio de la figura 5d se realizó el EDS en punto 1 de la fotomicrografía Figura 5 [10]. Encontrándose los resultados reportados en la Tabla 3, lo que determinó la presencia de un nitruro de cromo.

3.3. Composición química determinada por EDS

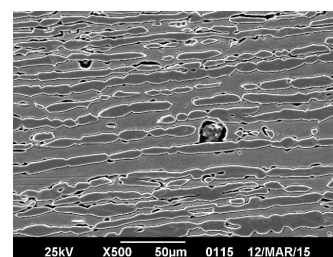
En las Tablas 4 y 5 se presentan los análisis por EDS determinados para cada una de las fases presentes en las diferentes condiciones de la investigación, así como de las zonas de transición y puntos de contaminantes(inclusiones y precipitados) del acero dúplex estudiado.



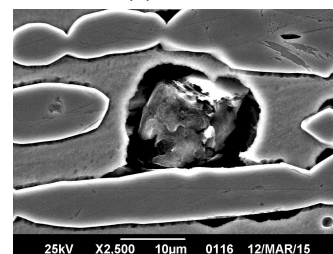
(a) Condición original



(b) Con tratamiento térmico de calentamiento a 1100°C, con tratamiento térmico de recocido a 1200°C.



(c) 500X.



(d) 3500X con EDS Punto de estudio 1.

Figura 5: Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304 [10].

Tabla 3: EDS en punto 1 de la fotomicrografía Figura 5 [10].

Elemento	NK	Cr K	Fe K
% Peso	62,59	9,38	28,03
% Atómico	86,75	3,50	9,74

Tabla 4: Resumen de la composición química (% peso) determinada por EDS en las fases presentes del acero inoxidable dúplex SAF 2304 [10].

	Fase	Cr	Fe	Ni
Condición original	α	25,00	68,73	3,42
	γ	21,63	71,18	5,25
TT 1100°C	α	26,02	67,70	2,95
	γ	21,44	71,59	5,33
TT 1200°C	α	26,45	68,69	2,87
	γ	21,37	71,71	5,37
TT 1300°C	α	25,43	68,71	2,84
	γ	21,90	71,17	4,95

TT: tratamiento térmico.

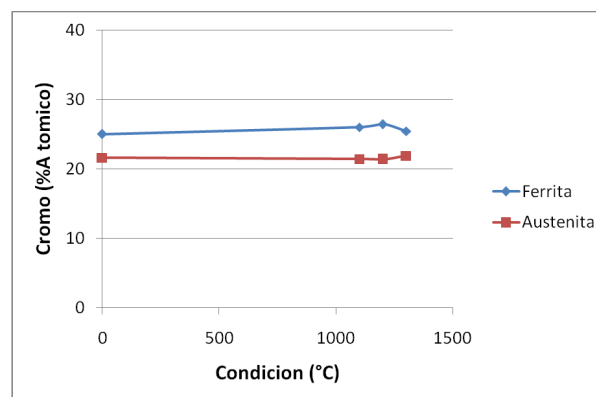


Figura 7: % Atómico Cromo en función de las condiciones de ensayo [10].

Tabla 5: Zonas de transición y contaminantes [10].

Condición	PE	O K	Al K	Fe K	Cr K	Ni K
Original	Z T	9,89	8,49	54,90	21,59	2,63
	I y P	27,59	21,20	30,13	13,14	1,42
		5,79	3,59	64,55	20,26	4,22
TT 1100°C	ZT			71,38	21,56	5,15
	I y P	43,58	35,60	9,28	3,91	0,38
		4,13		62,61	23,68	4,24
		3,38		65,72	24,87	3,41
TT 1200°C	ZT			68,17	27,08	3,15
	I y P	38,66	27,25	16,38	8,20	
				28,03	9,38	62,59
TT 1300°C	ZT			70,04	24,30	3,87
	I y P	41,38	35,91	12,10	5,47	0,52

PE: punto de estudio.

TT: tratamiento térmico.

ZT: zona de transición.

I y P: inclusiones y precipitados.

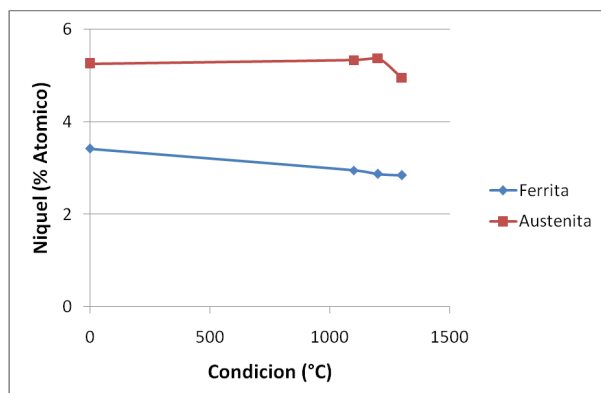


Figura 6: % Atómico Níquel en función de las condiciones de ensayo [10].

En la Tabla 5 se observa que la austenita es la fase que tiene el mayor porcentaje de Níquel

tanto para la condición original como para las condiciones de recocido, la ferrita se observa que tiene el mayor porcentaje de Cromo en todas las condiciones investigadas.

En la Figura 7 se observa que hay una tendencia a aumentar el porcentaje de Cromo en la fase ferrita desde la condición original hasta la condición de 1200 °C pero en la condición de 1300 °C sufre una decaída pero se mantiene por encima del valor de la condición original con un porcentaje de 2 %, algo similar pasa con la austenita con la diferencia que el porcentaje de Cromo disminuye en las condiciones de 1100 °C y 1200 °C y sufre un aumento de 2 %; para el elemento Níquel se puede observar en la Figura 7. La tendencia decreciente que experimenta este elemento en la fase ferrita a medida que aumenta la temperatura, mientras que en la austenita tiende a aumentar entre la condición original y las temperaturas de 1100 °C y 1200 °C, a 1300 °C. Este cambio indica que el elemento Níquel está migrando, de la fase Ferrita a la austenita, debilitando la fase ferrítica. Al detallar la Tabla 4 se evidencia la presencia de inclusiones de óxido de aluminio, así como, un precipitado (Nitruro) en la condición de 1200°C, además, se observa la migración de los elemento Cr y Ni. Cabe destacar que el elemento Molibdeno solo se encontró presente en la condición original del material y la condición de 1100°C.

3.4. Micro Dureza

Los valores promedio de microdureza Vickers fueron obtenidos al realizar diez identaciones

por cada fase aplicando 25 gr de carga por 55 segundos, y son reportados en la Tabla 6 y la Figura 8, se observa incremento de dureza en la fase ferrita a excepción del recocido a 1200 °C, mientras que la fase austenita incrementó desde la condición original hasta el recocido a 1100°C y luego a medida que incrementó la temperatura del tratamiento de recocido se redujo la dureza. Este comportamiento indica que el tratamiento térmico realizado provocó el endurecimiento de la ferrita generando la fragilización de la fase y por otra parte se observa el ablandamiento de la fase austenita.

Tabla 6: Valores promedio de dureza obtenidos en el acero SAF 2305 para cada condición (P=25 g por 55 seg) [10].

Microdureza (HV)	Austenita	Ferrita
Original	276	230
Recocido 1100°C	291	262
Recocido 1200°C	287	248
Recocido 1300°C	266	275

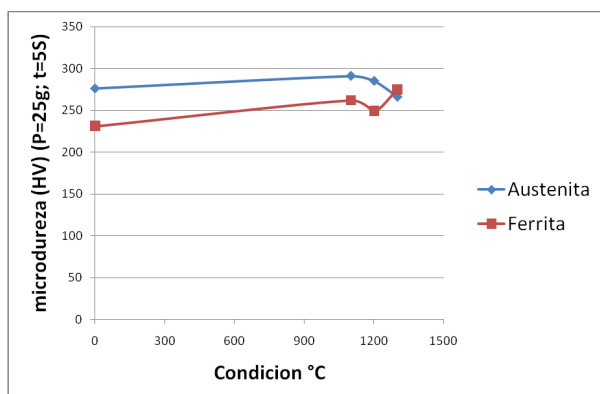


Figura 8: Microdureza Vickers en función de las condiciones de ensayo [10].

3.5. Ensayo de impacto Charpy en V

Se realizó un ensayo Charpy con entalle en “V”, se utilizaron 5 probetas tipo subsize para cada condición de ensayo, los ensayos fueron realizados de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM E-23 [9].

Existen ciertas relaciones empíricas entre los valores de K_{IC} y CVN han sido propuestas en

base a los resultados de diferentes investigaciones Barson et al. [11] observaron que el efecto de la temperatura y la velocidad de carga en los valores de CVN y K_{IC} son las mismas, las cuales sugieren la posibilidad de establecer ciertas relaciones empíricas entre los resultados de estos dos ensayos. La relación propuesta por Barson et al., [11] es la siguiente:

$$(K_{IC}/\sigma_y)^2 = (5/\sigma_y)[CVN - (20/\sigma_y)] \quad (1)$$

Donde:

K_{IC} : Factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de estado plano de deformación en unidades de Ksi x pulg.

σ_y : Esfuerzo de fluencia en unidades de Ksi.

CVN: Energía absorbida por impacto en unidades de pie x lb.

Mediante la relación empírica (ecuación (1)) propuesta por Rolfe, Novack y Barson [11], se procedió a determinar el factor de intensidad de esfuerzo K_{IC} en la Tabla 7 y Figura 9, se muestran los valores obtenidos del ensayo. No hay cambios resaltantes en los valores obtenidos de CVN y K_{IC} se puede decir que permanece constantes el tratamiento térmico realizado a 1100, 1200 y 1300 °C, no afectó el acero inoxidable dúplex.

Tabla 7: Resultados de Energía absorbida por impacto promedio, CVN y Tenacidad de impacto promedio K_{IC} de las condiciones experimentadas [10].

Condición	original	TT		
		1100 °C	1200 °C	1300 °C
CVN Pie x lb	245,49	234,13	241,87	242,74
K_{IC} Ksi.√pulg	318,18	314,70	317,79	318,50

TT: tratamiento térmico de recocido.

4. Conclusiones

El acero inoxidable dúplex SAF-2304, al ser sometido a un tratamiento térmico de recocido a temperaturas de 1100, 1200 y 1300 °C, durante un

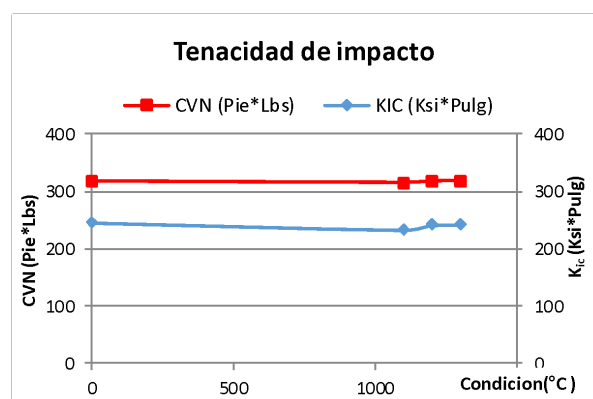


Figura 9: CVN y K_{IC} para cada condición de ensayo [10].

tiempo de 30 min respectivamente, género como resultado el siguiente comportamiento:

No hubo cambios significativos en la resistencia mecánica, ni en la ductilidad del acero inoxidable dúplex, ya que los cambios observados no superaron un mínimo de 10 % de variación, aun cuando el esfuerzo máximo tuvo un leve aumento en las condiciones de 1100 °C, 1200 °C y 1300 °C con respecto a la condición original.

No se evidenciaron cambios en la microestructura del acero al aumentar la temperatura, asimismo se verificó que en todas las condición de trabajo las fases presentes fueron la austenita y ferrita, fases características de un acero inoxidable dúplex.

Se observó a través de EDS un incremento del tamaño de grano y una distribución más homogénea de las fases presentes durante el tratamiento y, se reveló la presencia de inclusiones con alta proporción de Aluminio, Cromo y otros elementos. Se determinó por EDS la migración del Níquel de la fase ferrita a la fase austenita, que provocó el endurecimiento de la ferrita generando la fragilización de la fase ferrita en las muestras tratadas térmicamente.

La micro dureza Vickers evidenció que para la fase ferrita ocurre un incremento en la dureza para las tres condiciones aplicadas de tratamiento térmico al ser comparado con la condición original. Para las condiciones de 1100 °C y 1300 °C se observa un incremento del 12,14 % y 16,24 % respectivamente mientras que en la condición de tratamiento térmico de 1200 °C se observa un

cambio de 7,38 %. Para la fase austenita hay un incremento para las condiciones de 1100 °C y 1200 °C comparados con la condición original mientras que en 1300 °C decae respecto a la condición original.

La tenacidad de impacto, para los tratamientos térmicos de recocido realizados a 1100 °C y 1200 °C se observa una leve disminución de la tenacidad de impacto al ser comparada con la con la condición original, mientras que a 1300 °C se efectúa una pequeña recuperación de su capacidad de absorber energía.

5. Referencias

- [1] S. K. Ghosh and S. Mondal. High temperature ageing behaviour of a duplex stainless steel. *Materials Characterization*, 59(12):1776–1783, 2008.
- [2] Serope Kalpakjian y Steven R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, México, cuarta edición, 2002.
- [3] Sandra Mora Guzmán. Fabricación y caracterización microestructural de un acero inoxidable dúplex grado 2205. Tesis fde Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México DF, 2007.
- [4] Laura A. Sáenz, Oswaldo A. Hilders, Ruben D. Hergueta y Reinaldo A. Zabala. Estudio de un acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C por tiempos entre 1 hora y 48 horas. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, 22(3):37–46, 2007.
- [5] Laura Sáenz. Naturaleza fractal e inestabilidad plástica en un acero inoxidable dúplex envejecido. *Ingeniería y Sociedad UC*, 6(1):7–20, 2011.
- [6] N. Lopez, M. Cid, and M. Puiggali. Influence of σ -phase on mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steels. *Corrosion Science*, 41(8):1615 – 1631, 1999.
- [7] Michael Pohl, Oliver Storz, and Thomas Glogowski. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. *Materials characterization*, 58(1):65–71, 2007.
- [8] ASTM. ASTM A370 - 14, standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, 2014.
- [9] ASTM. ASTM E 23, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, 2014.
- [10] Edwin J. Patiño B. Evaluar la tenacidad de impacto de un acero inoxidable dúplex SAF-2304, sometido a un calentamiento comprendido entre 1100 °C y 1300 °C. Trabajo Especial de Grado, Escuela Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2015.

- [11] John M. Barsom and Stanley Theodore Rolfe. *Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics*. Prentice-Hall, 1987.

Modelling snowmelt on glaciers in the Santa River basin and its impacts in water resources

Elmer E. Calizaya Llatasi*, Jesús A. Mejía Marcacuzco

Doctorado en Recursos Hídricos, Escuela de Post Grado, Universidad Nacional Agraria “La Molina”, Perú.

Abstract.- The melting of glaciers in the Alto-Santa basin is an important contribution of fresh water, that is why the importance of evaluating the dynamics of snow cover through the use of processing of satellite images of the (MODIS), with daily spatial resolution, through the application of the platform Google Earth Engine, platform for the scientific analysis of petabyte-scale, plus the use of the model (SRM), very useful tool to estimate the contribution of water volume in m³/s, from rain and snow melt on a daily basis, the area under study has 5334 km², more than 6500 images were processed to evaluate the dynamics of the snow cover, the model was applied between the altitudes from 1410 masl, up to 6766 masl, dividing into 06 different zones of different intervals, (MDO10A1) were used to obtain the area of snow coverage on a daily basis, the algorithm of NDSI (normalised difference snow index), and at the same time use the (SCA) in the SRM model, and obtain daily flow results from rain and snow melt, the model was calibrated for year 2005 and later was validated for the year 2007, with efficient results of 0,77 and, 0,88 of Nash-Sutcliffe.

Keywords: Snowmelt Runoff Model (SRM); MODIS; Alto-Santa; Google Earth Engine.

Modelamiento de la desglaciación de los nevados de la cuenca del Río Santa y su impacto en los recursos hídricos

Resumen.- El derretimiento de los glaciares en la cuenca Alto-Santa es un aporte importante de agua dulce, por eso es importante evaluar la dinámica de la cobertura de nieve mediante el procesamiento de imágenes satelitales (MODIS), con resolución espacial diaria, a través del uso de la plataforma Google Earth Engine, plataforma para el análisis científico de petabyte-scale, más el uso del modelo (SRM), herramienta muy útil para estimar la contribución de la lluvia y nieve derretida en m³/s, a nivel diario, el área en estudio tiene 5334 km², se procesaron más de 6500 imágenes para evaluar la dinámica de la capa de nieve, el modelo se aplicó entre altitudes desde 1410 msnm, hasta 6766 msnm, dividiéndose en 06 zonas de diferentes intervalos de altitud, las imágenes (MDO10A1) fueron utilizados para obtener el área de cobertura de nieve diario, se usó el algoritmo de NDSI (índice de nieve de diferencia normalizado) y el área de cobertura de nieve (SCA) en el modelo SRM, y se obtuvo resultados de la escorrentía de fusión de nieve y lluvia diario, el modelo se calibró para el año 2005 y luego se validó para el año 2007, con resultados eficientes de 0,77 y 0,88 de Nash-Sutcliffe.

Palabras claves: Modelo de Escorrentía de Fusión de Nieve (SRM); MODIS; Alto-Santa; Google Earth Engine.

Recibido: julio 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

A nivel mundial cerca de dos billones de habitantes viven del suministro de agua proveniente de los glaciares, de ahí la importancia de evaluar la dinámica del área de cobertura de nieve SCA,

aplicando modelos de escorrentía de fusión de nieve y técnicas de percepción remota utilizando el sensor MODIS. Cerca del 99 por ciento de los glaciares tropicales del mundo se encuentran distribuidos en los Andes suramericanos Kaser [1], de los cuales el 71 por ciento se localizan sobre las cordilleras del Perú. En general existen dos categorías de modelos de fusión de nieve: Modelo de Balance de Energía y el Modelo de Índice de Temperatura como por ejemplo el Modelo de Escorrentía de Fusión de Nieve (SRM). El modelo SRM fue desarrollado por Martinec [2], las primeras veces fueron probados en micro-

* Autor para correspondencia:

Correo-e: elmercll@hotmail.com (Elmer E. Calizaya Llatasi)

cuenas en Europa, después fueron aplicados exitosamente en más de 100 cuencas a nivel mundial Martinec [2], Martinec et al. [3]. Para realizar esta investigación los objetivos fueron los siguientes:

1. Evaluar la dinámica de la desglaciación de los nevados mediante el uso del modelo Snowmelt Runoff Model (SRM) y su impacto en los recursos hídricos en la cuenca del río Santa.
2. Determinar el aporte de agua de la fusión de nieve/glaciares en la sub-cuenca Alto Santa. Para realizar el presente estudio se utilizaron imágenes del sensor MODIS (MOD10A1) versión 006 desde el año 2005 al 2008 y a la vez se utilizó el algoritmo de NDSI (normalised difference snow index) para calcular el área de cobertura de nieve para el modelo SRM. También se utilizaron información climática de precipitación diaria y temperatura media diaria para el modelo, 08 parámetros para ejecutar el modelo SRM como el coeficientes de escorrentía de nieve y lluvia, factor de grado-día, tasa de la caída de la temperatura, temperatura crítica, área de contribución de lluvia, coeficiente de recesión y tiempo de retraso, a continuación se explica los métodos y ecuaciones utilizadas para obtener los parámetros para el ingreso al modelo SRM.
3. Se desarrolla los materiales y metodología utilizado en la investigación, se desarrolla el área general de estudio, diferentes características de la zona de estudio.
4. Se presenta los resultados de la simulación del modelo de escorrentía de fusión de nieve (SRM) para los años del 2005 y 2007.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Antes de iniciar la investigación se realizaron diferentes actividades como: reconocimiento de la cuenca en los aspectos hidrográficos, fisiográficos y geomorfológicos. Además la búsqueda de

diferentes fuentes de información como, datos meteorológicos, hidrométricos, cartografía, imágenes de satélites de los sensores ASTER y MODIS, programas de Microsoft office, Autocad, ArcGis 10.x, Erdas10.x, RStudio, Rclimtool, Plataforma del Google Earth Engine y el modelo Snowmelt Runoff Model - SRM, entre otros programas.

2.1.1. Información básica de climatología y cartografía

Las fuentes de información para la recolección de información de climatología y cartografía fueron solicitadas y obtenidas de diferentes instituciones y páginas del internet.

2.1.2. Información meteorológica e hidrométrica históricos diarios

La información meteorológica básica ha sido solicitada al SENAMHI y UHG-Huaraz, desde el año 2005 hasta el año 2008, precipitación diaria, temperatura diaria, y caudales diarios de 04 estaciones. En la Tabla 1, se muestra la relación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas utilizados en la investigación y las zonas de clasificación de A, B, C, D, E y F para el modelo SRM, y en la Figura 1, se muestra el área y delimitación de estudio.

Tabla 1: Características de las seis zonas de elevación extraída el DEM de la sub-cuenca Alto Santa.

Zonas	Rango de elevación	Altitud hipsométrica	Área Km ²	Área %	Estación climática
A	1410 - 2300	2141,87	76,31	1,43	-
B	2300 - 3200	2843,61	645,45	12,11	Yungay
C	3200 - 4100	3730,57	1696,76	31,82	Recuay
D	4100 - 5000	4497,02	2446,71	45,89	Yanamarey
E	5000 - 5900	5242,05	449,67	8,43	Artesonraju AP2
F	5900 - 6766	6129,92	17,00	0,32	-

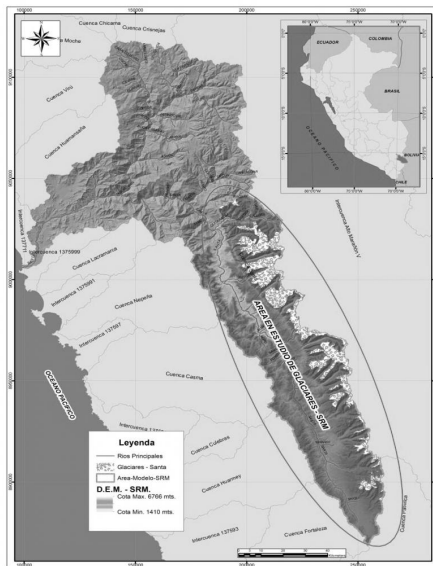


Figura 1: Delimitación de la sub-cuenca Alto Santa con área de cobertura de nieve.

2.2. Metodología y estructura del modelo de escorrentía de fusión de nieve – SRM

El SRM es un modelo semi-distribuido basado en el factor grados día que se ha aplicado alrededor del mundo en cuencas de montaña de diferentes áreas y rangos de elevaciones Martinec et al. [3]. Este enfoque de grados-día para la generación de fusión de nieve ha sido particularmente atractivo para la investigación de hidrología de nieve en regiones con redes meteorológicas dispersas y capacidad limitada para obtener las mediciones de campo necesarias para calibrar físicamente el modelo Zhang et al. [4], Tahir et al. [5] y Muhammad et al. [6].

SRM está basado en la plataforma de Windows (WinSRM), el modelo calcula la cantidad diaria de agua procedente de la fusión de nieve y de la lluvia, esta cantidad se añade al caudal de recesión para obtener el caudal total diario según la ecuación (1).

$$Q_{n+1} = c_{s,n} a_n (T_n + \Delta T) S_n + c_{r,n} P_n \frac{A(10000)}{68400} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1} \quad (1)$$

Donde:

Q es el caudal medio diario (m^3/s), C es el coeficiente de escorrentía, considera las pérdidas

como un cociente (escorrentía, precipitación), C_s referido a fusión de nieve y C_r referido a lluvia, a es el factor de grados-día ($cm/(^{\circ}C \text{ día})$), indica el espesor de nieve fundida debido a un grado-día, T es el número de grados-día ($^{\circ}C \text{ día}$), ΔT es el ajuste de grados-día mediante la razón de variación de temperatura, cuando se extrapolan temperaturas desde una estación de referencia a una zona de elevación ($^{\circ}C \text{ día}$), S es el cociente del área cubierta de nieve al área total, P es la aportación de la precipitación en (cm), T_{crit} es la temperatura crítica, determina cuando esta aportación es en forma de lluvia e inmediata, o en caso de ser nieve nueva se almacena hasta que se reúnan las condiciones de fusión, A es el área de la cuenca en (km^2), K es el coeficiente de recesión, indica el decremento del caudal en ausencia de aportaciones de lluvia o fusión de nieve, donde $K = Q_{m+1}/Q_m$, ($m, m + 1$ son días consecutivos de un período de recesión) y n es la secuencia de días durante el período de cálculo de caudal.

Las variables T , S y P han de ser medidas o determinadas a diario, los parámetros C_s y C_r , la razón de variación para hallar ΔT , T_{crit} , k y el tiempo de retraso son característicos de una cuenca particular o, más en general, de un clima en particular.

Para el caso de estudio la sub-cuenca se ha dividido en 06 zonas de rangos de elevación de casi 1000 metros.

2.3. Parámetros de entrada al modelo SRM

2.3.1. Coeficiente de escorrentía de lluvia y nieve (C_r, C_s)

Este coeficiente tiene en cuenta las pérdidas, la diferencia entre el volumen de agua disponible (fusión + lluvia) y el caudal saliente de la cuenca, a largo plazo ha de ser el cociente entre la precipitación medida y el caudal medido. El programa admite valores independientes para la nieve, C_s , y para la lluvia, C_r , y permite variar sus valores cada quincena, y si se desea a diario, en cada zona de altura. De acuerdo con las definiciones sobre los coeficientes de escorrentía de C_r y C_s , en las ecuaciones (2) y (3) fueron utilizadas en los estudios de Kaya [7]. Además esas fórmulas se aplicaron también

en otra investigación de Tekeli [8]. Para el estudio también se utilizó la misma metodología, utilizando los hidrogramas de caudales y otras ecuaciones descritas a continuación.

$$Cs = \frac{\text{Volumen de la nieve que contribuye a la escorrentía}}{\text{Volumen total de nieve derretida}} \quad (2)$$

$$Cr = \frac{\text{Volumen de lluvia que contribuye a la escorrentía}}{\text{Volumen total de la lluvia}} \quad (3)$$

Para determinar los coeficientes primero se obtuvo el caudal base del hidrograma desde enero del 2005 a junio 2008. Para determinar los volúmenes de contribución de lluvia y nieve se utilizaron las área de cobertura de nieve generados por imágenes de satélite MODIS de resolución temporal diario, después se utilizó las fórmulas para determinar los coeficientes de lluvia Cr y el coeficiente de nieve Cs para, los hidrogramas representativos que se muestran en la Figura 2.

El hidrograma para los años del 2005 al 2008 está constituido a partir de las medidas y sumatorias que se observaron en las estaciones la Balsa, los Cedros y Quitarcas estaciones que fueron medidos por la empresa Duke Energy Egenor – CENERGIA.

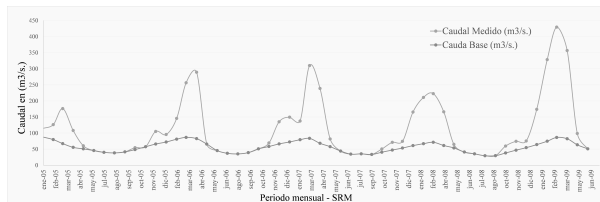


Figura 2: Determinación del coeficiente de lluvia Cr entre el caudal en m^3/s , y el caudal base desde el año enero del 2005 a junio del 2009.

2.3.2. Factor grados día

El factor grados-día a ($cm/(^{\circ}C d)$) convierte el número de grados-día T ($^{\circ}C d$) en espesor diario de agua M (cm) procedente de la fusión de la nieve mediante la ecuación (4).

$$M = aT \quad (4)$$

Una forma de hallar este factor, es comparar los grados-día registrados en una cuenca con la

disminución de agua en forma de nieve. Esta disminución puede calcularse con dispositivos de medida de radioactividad, con las llamadas "almohadas de nieve" o con lisímetros. El método de grados-día da lugar a medidas del factor a muy variables de un día a otro Martinec et al. [3], debido a que no se consideran explícitamente agentes como la radiación solar, velocidad del viento o el calor latente de condensación, que influyen decisivamente en el balance energético. Sin embargo, promediando cada 3-5 días su valor se hace más consistente. El factor de grados-día no es constante. Cambia de acuerdo con las propiedades de la nieve durante el período de fusión. Si no se dispone de suficientes datos, el factor grados-día se puede obtener mediante otras ecuaciones He et al. [9], en este caso se utilizó la siguiente relación empírica en la ecuación (5).

$$a = 1,1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (5)$$

Dónde:

a : factor grados-día ($cm/(^{\circ}C d)$).

ρ_s : densidad de la nieve.

ρ_w : densidad del agua.

Para el caso del estudio se utilizó otra fórmula empírica para determinar el factor grados-día en ($cm/(^{\circ}C d)$) Martinec [10], a continuación se muestra la ecuación (6) y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

$$M = 1,56 + 5,338T$$

$$a = 0,1 \frac{M}{T} \quad (6)$$

Donde:

M : profundidad del hielo fundido.

T : temperatura.

2.3.3. Razón de variación de temperatura (γ)

Dado que la variación de temperatura es un factor muy importante para la fusión de nieve/hielo en alta montaña o picos, debido a lo que la tasa de caída es un parámetro importante en el modelo hidrológico como SRM, para determinar la variación de temperatura con la elevación o altitud. La tasa de caída fue determinada a partir de datos históricos de las estaciones de temperatura

Tabla 2: Promedios anuales del factor grados día calculado con las formulas propuestas para los años 2005 al 2009.

Año	Factor Grados Día (cm °C ⁻¹ d ⁻¹)					
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	Zona E	Zona F
2005	0,5443	0,5443	0,5464	0,5683	0,4855	0,5143
2006	0,5442	0,5442	0,5462	0,5738	0,4992	0,5144
2007	0,5425	0,5455	0,5488	0,5831	0,4785	0,5150
2008	0,5420	0,5446	0,5490	0,5798	0,4399	0,5153
2009	0,5420	0,5446	0,5485	0,6206	0,5419	0,5145

a diferentes altitudes (Yungay y Artesonraju AP2). En la Tabla 3 se muestra el promedio de la razón de variación de temperatura de tres estaciones, desde la estación Yungay a Recuay es de 0,40, desde la estación Yungay a AP2 es de 0,57 y de Recuay a AP2 es de 0,75, las estaciones utilizadas para la determinación de la variación de temperatura, para el modelo se utilizó la variación de temperatura cada 100 metros de 0,75 de la estación de Recuay hasta la estación de AP2, que tienen una diferencia de 1393 metros.

Tabla 3: Temperatura promedio anual y variación de temperatura entre estaciones de menor y mayor altitud.

Año	T_{pa} (°C)			γ		
	Yungay	Recuay	AP2	Yungay Recuay	Yungay AP2	Recuay AP2
2000	17,05	11,89	-	0,55	-	-
2001	16,37	12,07	-	0,46	-	-
2002	16,45	12,60	1,82	0,41	-	0,77
2003	15,38	12,65	1,86	0,29	-	0,77
2004	14,66	12,24	1,76	0,26	-	0,75
2005	14,95	12,48	2,10	0,26	-	0,74
2006	15,06	-	1,85	-	0,59	-
2007	15,74	12,59	1,89	0,34	0,58	0,77
2008	16,75	12,26	1,57	0,48	0,58	0,77
2009	17,00	12,60	1,94	0,47	0,63	0,77
2010	16,90	12,69	2,72	0,45	0,58	0,72
2011	15,49	12,18	1,90	0,35	0,56	0,74
2012	14,56	12,36	1,72	0,24	0,61	0,76
2013	15,37	12,54	2,62	0,30	0,58	0,71
2014	14,55	12,47	2,21	0,22	0,53	0,74
2015	14,11	12,84	2,55	0,14	0,50	0,74
2016	14,35	13,15	2,89	0,13	0,51	0,74
2017	15,15	12,29	2,23	0,31	0,56	0,72
Promedio				0,33	0,57	0,75

T_{pa} : temperatura promedio anual.

γ : razón de variación de temperatura.

2.3.4. Temperatura crítica, (T_{crit})

La temperatura crítica es el valor preseleccionado de la temperatura que determina si el evento de precipitación es lluvia o nieve. En WinSRM, la temperatura crítica solo se usa en la temporada de derretimiento de la nieve para decidir si la precipitación es inmediatamente contribuye a la escorrentía (si llueve), o al atrasar la contribución (si hay nieve). El modelo mantiene la nieve recién caída almacenada hasta que se derrita en temperaturas cálidas en posteriores días. En general, la temperatura crítica se mantiene más alta que el punto de congelación y disminuido a 0 ° C. La temperatura crítica se calibró para la cuenca en el rango de 0 - 3,5 ° C para todos los años según Martinec et al. [3].

2.3.5. Área de contribución a la precipitación, (RCA)

El área de contribución a la precipitación ayuda a determinar si la escorrentía inducida por la lluvia es agregado a la escorrentía inducida por deshielo solo desde el área sin nieve o desde la totalidad de la zona Para RCA = 0, se supone que la lluvia que cae sobre el manto de nieve a principios de la temporada de deshielo es retenida por la nieve que generalmente es seca y profunda, y la lluvia contribuye a la escorrentía solo desde el área sin nieve. En una etapa posterior, la nieve de la cubierta se vuelve madura (RCA = 1) y si la lluvia cae sobre esta capa de nieve, se supone que la misma cantidad de agua se libera de la capa de nieve para que la lluvia de todo el área de la zona contribuya a la escorrentía. RCA es igual a 0 o 1 o una combinación de 0 y 1 fueron probados en este estudio.

2.3.6. Coeficiente de recesión (x, y)

El coeficiente de recesión resulta importante para el modelo dado que $(1-k)$ indica el decremento del caudal en ausencia de aportaciones de lluvia o fusión de nieve. Una buena forma de hallar k es analizando datos históricos de caudal. Representando Q_{n+1} frente a Q_n . A partir de la relación $k = Q_{n+1}/Q_n$, se puede deducir que k no es constante, aumenta a medida que Q disminuye de acuerdo a las ecuaciones (7) y (8).

$$K_{n+1} = xQ_n^{-y} \quad (7)$$

$$K = \frac{Q_{n+1}}{Q_n} \quad (8)$$

Las constantes x e y se hallaron resolviendo con las ecuaciones (9) y (10).

$$\begin{aligned} k_1 &= xQ_{1-y} \\ \log k_1 &= \log(x) - y \log(Q_1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} k_2 &= xQ_{2-y} \\ \log(k_2) &= \log(x) - y \log(Q_2) \end{aligned} \quad (10)$$

Donde x , y son constantes recuperadas del análisis histórico de caudales. Los valores preliminares de los parámetros se obtuvieron en base al método dado en Martinec y Rango [11]. Estos fueron definidos sobre la base de simulaciones SRM y las recesiones modeladas se aproximaron satisfactoriamente a la descarga, se observan las envolventes del coeficiente de recesión para los años 2005, 2006, 2007 y 2008, y los parámetros calculados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Coeficientes de recesión x e y para los diferentes años.

Años	Coeficiente de recesión promedio anual	
	factor (y)	factor (x)
2004	0,027	0,957
2005	0,012	0,915
2006	0,031	0,982
2007	0,042	1,044

2.3.7. Tiempo de retraso (L)

Uno de los propósitos principales de SRM es detectar el momento de las inundaciones y también calcular el volumen de la escurrentía simulada correctamente. El tiempo de retraso en SRM se usa para hacer coincidir el tiempo de escurrimiento simulado con escurrentía medida. Las fluctuaciones diarias características de la escurrentía de deshielo permiten que el desfase de tiempo sea determinado directamente de los

hidrogramas de los últimos años, el tiempo de retraso se trazó en función de los valores de las áreas de las cuencas Tabla 5. Entonces el tiempo de retraso es calculado para la Sub-cuenca Alto-Santa de (5331,42 km²) aplicando la ecuación (11), ecuación de la línea de tendencia, donde calculando da el tiempo de retraso es de 14 horas.

$$y = 1,606 \ln(x) + 0,2054 \quad (11)$$

Tabla 5: Valores de tiempo de retraso en horas de diferentes cuencas que utilizaron el modelo SRM.

Nombre de la cuenca	Área de la cuenca (km ²)	Tiempo de retraso (hrs)
Basin W - 3	8,42	3
Dischma	43,3	7,2
Dunajec	680	10,5
Durance	2160	12,4

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis temporal y tendencia del área de cobertura de nieve, Sub-cuenca Alto-Santa con imágenes del sensor MODIS

El 18 de diciembre de 1999, The Earth Observing System (EOS), Terra Spacecraft fue lanzado con un complemento de cinco instrumentos, uno de ellos es el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) por sus siglas en inglés, esta información ahora está siendo utilizado para generar mapas de áreas de cobertura de nieve con algoritmos automatizados, la metodología utilizada para determinar el área de cobertura de nieve fue en la plataforma del Google Earth Engine, la cobertura de nieve es un importante componente de la criosfera además juega un rol en la climatología del planeta tierra, por eso es muy importante determinar la tendencia del retroceso o aumento de los glaciares. Las variaciones temporales de cobertura de nieve en (km²) desde el año 2000 al 2017, para el año 2000 había un promedio anual de cerca de los 300 km² de cobertura de nieve llegando como máximo en los meses de acumulación de nieve con 549

km² en el mes de febrero del mismo año, y esto fue disminuyendo debido a diferentes factores de cambio climático, de tal manera que en el año 2009 bajó hasta los 226,3 km² de promedio en área, y un máximo de 376,9 km² en el mes de enero, y para el año 2017 tenía 184,3 km² de promedio de área glaciar, y como máximo llegó en el mes de febrero a 311,6 km², con estos resultados y análisis temporales podemos llegar a la conclusión de que el área de cobertura de nieve continua disminuyendo en estos últimos 18 años. En la Figura 3, se muestra la tendencia de retroceso glaciar desde el año 2000 al 2017, como ya se explicó la tendencia es negativa, es decir que el área de cobertura de nieve está disminuyendo, debido al aumento de la temperatura a nivel nacional y mundial según el quinto informe de la IPCC, y los análisis de temperatura anual y precipitación de algunas estaciones como Yungay, Recuay y Artesonraju AP2, estas estaciones se encuentran dentro del área de estudio, la pérdida del área glaciar desde el año 2000 al 2017 es de orden de 24,7 % con mayor porcentaje de reducción en las áreas pequeñas de los glaciares. Según un informe de la UGRH, desde el año 1970 hasta el año 2003 hay una pérdida de 27,6 % de glaciares en la cordillera blanca.

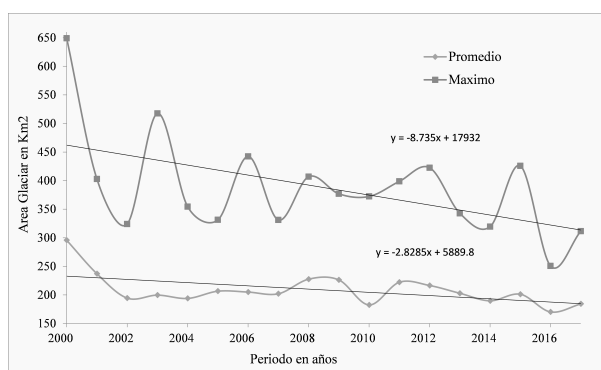


Figura 3: Tendencia del retroceso del área de la cobertura de nieve, promedios y máximos en km² desde el año 2000 al 2017, según: (MOD10A2).

3.2. Análisis de correlación estandarizada

Se realizó un análisis de correlación estandarizada desde el año 2005 al 2009, las estaciones que se encuentran en la parte baja y media del

área de estudio Yungay y Recuay tienen una correlación de -0,56 y -0,71 con el método de DCCA, de igual forma las estaciones que se encuentran en la parte alta de la cuenca a más de 4500 msnm, como son Artesonraju AP1 y AP2 con -0,67 y -0,56 de correlación, son las que tienen mejor correlación con el área glaciar esto significa que el área de la cubierta glaciar y la precipitación son significativamente inversas, podemos deducir que a mayor precipitación hay menor área glaciar durante las épocas de lluvia, lo que puede ser explicado que la precipitación líquida tiene un impacto negativo en el área glaciar, porque genera mayor absorción de energía en la masa de hielo. Las demás estaciones también tienen una buena correlación con el área de cobertura de nieve con el método DCCA Zebende [12], los mejores resultados de correlación se dieron con las estaciones climatológicas que están por encima de los 3400 msnm. Ya que estos juegan un papel importante en la acumulación de nieve durante las estaciones de invierno y otoño y la fusión de nieve durante las estaciones de primavera y verano, los resultados fueron los esperados, mientras que en las estaciones que están por debajo de los 3400 msnm, como Yungay no fueron los esperados. De igual manera en la Figura 4 se muestran las correlaciones estandarizadas entre cuatro variables de entrada, precipitación, temperatura, área de cobertura de nieve y el caudal todos mensuales para el modelo SRM, de las estaciones de Artesonraju AP2, para el periodo de simulación del 2005 al 2009. Donde para la estación Artesonraju AP2 en la gráfica claramente se observa la coherencia del comportamiento de las cuatro variables, la precipitación es una variable negativa para la acumulación de nieve en las estaciones de primavera y verano, de igual forma la temperatura juega un papel importante en la disminución del área de cobertura de nieve durante las dos estaciones, y el caudal aumenta debido a la fusión de nieve y precipitaciones según el gráfico, y en los meses de estiaje es a lo contrario ya que disminuye la temperatura, la precipitación y el caudal estos comportamientos son positivos para la acumulación de nieve desde fines del mes de abril hasta setiembre

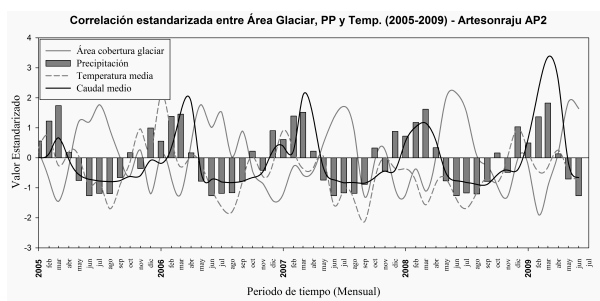


Figura 4: Correlación estandarizada mensual entre la precipitación, temperatura, área glaciar y caudales del (2005 - 2009) de la estación Artesonraju AP2.

3.3. Análisis y discusión de los resultados del modelo SRM

3.3.1. Calibración del modelo SRM para los años 2005

El modelo SRM, fue calibrado para el periodo del año 2005 y la validación se realizó para el año 2007, a continuación se muestran los resultados de la calibración del modelo para el año 2005.

Para el año 2005, se realizó la calibración utilizando la información de caudales observados de la sumatoria de tres estaciones la Balsa, Quitarcas y los Cedros, la estación la Balsa equivale a más del 90 % del caudal de la sumatoria de las tres estaciones desde los 80 a 90 m³/s, según los resultados de la calibración en el gráfico se observa el coeficiente de determinación de nash-sutcliffe fue de 0,77 % con un volumen de diferencia de 3,94 %, como se muestra en la Figura 5 los meses de mayor ajuste se dieron desde noviembre hasta el mes de abril perteneciente a las estaciones de primavera y verano llegando a un caudal promedio de 140 m³/s, esto debido al aporte de las precipitaciones y al aporte del derretimiento de los glaciares, mientras en los demás meses de otoño e invierno no hubo un buen ajuste de los caudales simulados y observados debido a los parámetros que se tuvieron que ajustar de Cr y Cs, recomendados por Martinec et al. [3]. De todas maneras la calibración es aceptable ya que supera el 0,75 de coeficiente de determinación, en cuanto a volumen de agua, el resultado de volumen calculado de 3,94 % equivale a más de 100 millones de m³, y a la vez esto equivale a un caudal de 3,22 m³/s durante todos los

días del año, por eso es necesario ajustar algunos parámetros para la validación del modelo, para tener un mejor resultado en cuanto a las diferencias de volumen de agua entre el simulado y observado. Los valores utilizados para la calibración fueron: razón de variación de temperatura con (0,75 °C/100 m), factor grados día con 0,553 (cm / (°C d)), coeficiente de escorrentía de la lluvia (Cs) con valores de 0,0 – 1,0, coeficiente de escorrentía de la nieve (Cr) con valores de 0,32 a 1,0, temperatura crítica (T_{crit}) de 0,75 – 2 °C, área de contribución RCA 0,0 y 1,0, coeficiente de recesión x con 0,96 y Coeficiente de recesión y con 0,027, el tiempo de retraso (L) de 14 horas y descarga inicial de 104 m³/s.

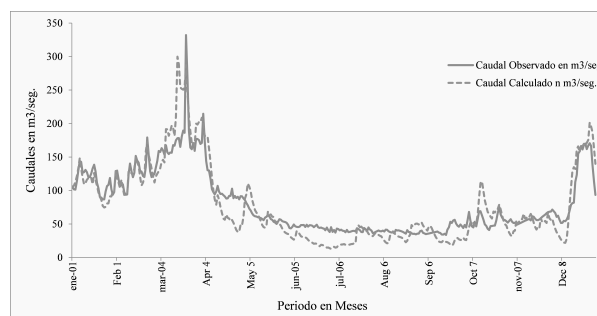


Figura 5: Resultados de la calibración del modelo SRM para el año 2005 en la sub-cuenca Alto Santa – área con glaciares.

3.3.2. Validación del modelo SRM para el año 2007

Los resultados de la validación para el año 2007, según la Figura 6, muestra un ajuste del coeficiente de determinación de nash-sutcliffe de 0,88 %, los mejores ajustes en los caudales observados y calculados se dan en los meses de enero y febrero donde la variación de los caudales es de 110 m³/s a 2015 m³/s, estos pertenecientes a la estación de verano donde empieza la fusión de nieve debido al aumento de la temperatura, mientras en los meses de marzo hasta mayo no hubo un buen ajuste entre el observado y calculado se nota que el caudal pico del observado llega hasta los 680 m³/s mientras que en el calculado llegó hasta los 550 m³/s. Esto implica que se tendría que hacer un mayor ajuste a uno de los parámetros del modelo, en los demás meses desde junio hasta diciembre tienen una cierta

similitud entre el simulado y el observado, y son las épocas donde hay menor fusión de nieve y mayor demanda de uso de agua, los parámetros utilizados para la validación fueron la razón variación de temperatura con $(0,75\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m})$, factor grados día con $0,528\text{ (cm }^{\circ}\text{C}^{-1}\text{ d}^{-1})$, coeficiente de escorrentía de la lluvia (C_s) con valores de $0,0-1,0$, coeficiente de escorrentía de la nieve (C_r) con valores de $0,23$ a $0,936$, temperatura crítica (T_{crit}) de $0,75-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, área de contribución RCA $0,0$ y $1,0$, coeficiente de recesión x con $0,98$ y coeficiente de recesión y con $0,031$, tiempo de retraso (L) de 14 horas y descarga inicial de $188\text{ m}^3/\text{s}$. Para realizar la validación el único parámetro que se utilizó para ajustar el modelo fue el coeficiente de escurrimiento Cr , el resto de los parámetros no se ajustó. El caudal promedio anual del observado y el simulado es de $104\text{ m}^3/\text{s}$, lo que indica una variación de $0,63\text{ }\%$ de diferencia en el volumen de agua.

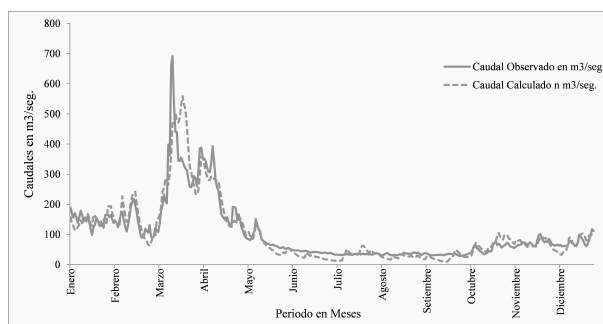


Figura 6: Validación del modelo SRM para el año 2007 en la sub-cuenca Alto Santa – área con glaciares.

4. Conclusiones

El área en estudio fue dividida en 6 zonas de diferentes intervalos con un promedio de 900 m con una altitud mínima de 1410 msnm , y una máxima de 6766 msnm , utilizando un DEM de $12,5\text{ m}$, de resolución espacial, se calculó el área de cobertura de nieve para cada zona denominados A, B, C, D, E y F, de las cuales en las zonas E y F, existían mayor área de cobertura de nieve que está desde los 5000 msnm , hasta los 6766 msnm y con un promedio de área de cobertura de nieve desde los 250 km^2 hasta 350 km^2 con respecto

al área total de la sub-cuenca de 5331 km^2 . Las imágenes MODIS fueron usadas para determinar el área de cobertura de nieve, se procesaron más de 730 imágenes con resolución temporal de un día en la plataforma del Google Earth Engine, y posteriormente utilizados para el modelo SRM de los años 2005 y 2007, para la simulación y validación de caudales diarios, el modelo se calibró para los años 2005 y posteriormente se validó para los años 2007, con resultados eficientes de $0,77$ y $0,88$ de coeficiente de determinación de Nash-Sutcliffe. A consecuencia de las tendencias positivas del aumento de las temperaturas se confirma el continuo retroceso de los glaciares es imparable desde el año 2000 al 2017 de un orden de $24,7\text{ }\%$, según el análisis y resultados de las imágenes satelitales del sensor MODIS, con mayor sensibilidad de reducción en las áreas pequeñas y en los bordes de los glaciares en la sub-cuenca Alto-Santa. De la aplicación del modelo de escorrentía de fusión de nieve SRM, también se obtuvo resultados del aporte de la fusión de nieve obteniendo un resultado de promedio anual de aporte a los caudales de $35,5\text{ }\%$.

La plataforma del Google Earth Engine, fue muy importante para el desarrollo de la investigación, trabaja con la base de datos de las imágenes de satélite de los sensores más importantes de diferentes tipos de resoluciones, el procesamiento es en nube, procesa grandes cantidades de información a nivel global en cuestión de segundos, y los resultados salen en gráficos de series temporales.

5. Referencias

- [1] Georg Kaser. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1-4):93–103, 1999.
- [2] J. Martinec. Snowmelt-runoff model for stream flow forecasts. *Nordic Hydrology*, 6(3):145–154, 1975.
- [3] J. Martinec, Albert Rango, and Ralph Roberts. *The snowmelt-runoff model (SRM) user's manual*. New Mexico State University, 2008.
- [4] Guoqing Zhang, Hongjie Xie, Tandong Yao, Hongyi Li, and Shuiqiang Duan. Quantitative water resources assessment of qinghai lake basin using snowmelt runoff model (srn). *Journal of Hydrology*, 519:976 – 987, 2014.

- [5] Adnan Ahmad Tahir, Pierre Chevallier, Yves Arnaud, Luc Neppel, and Bashir Ahmad. Modeling snowmelt-runoff under climate scenarios in the hunza river basin, karakoram range, northern pakistan. *Journal of Hydrology*, 409(1-2):104–117, 2011.
- [6] Muhammad Adnan, Ghulam Nabi, Muhammad Saleem Poomee, and Arshad Ashraf. Snowmelt runoff prediction under changing climate in the himalayan cryosphere: A case of gilgit river basin. *Geoscience Frontiers*, 8(5):941–949, 2017.
- [7] I. Kaya. Application of snowmelt runoff model using remote sensing and geographic information systems. Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turquía, 1999.
- [8] A. E. Tekeli. Integration of remote sensing and geographic information systems on snow hydrology modeling. Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turquía, 2000.
- [9] Z. H. He, J. Parajka, F. Q. Tian, and G. Blöschl. Estimating degree-day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12):4773–4789, 2014.
- [10] Jaroslav Martinec. The degree-day factor for snowmelt runoff forecasting. In *IUGG General Assembly of Helsinki*, pages 468–477. IUGG, 1960.
- [11] J. Martinec, Albert Rango, and E. Major. *The snowmelt-runoff model (SRM) user's manual*. Washington, D.C. : National Aeronautics and Space Administration, 1983. .April 1983-Cover.
- [12] G. F. Zebende, M. F. da Silva, and A. Machado Filho. DCCA cross-correlation coefficient differentiation: Theoretical and practical approaches. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(8):1756–1761, 2013.

Reformulation of latex class A latex paint for interior use, by partial replacement of titanium dioxide by extenders.

Fabiola Sevilla^a, José Luis Muñoz^a, José Antonio Pérez^b, Belén María Paricaguán^{*,b}

^a*Centro de Investigaciones Montana, Valencia, Carabobo, Venezuela.*

^b*Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- The main objective of this research was to reformulate a latex class A semi-precious interior paint by partial replacement of titanium dioxide (TiO₂) by extenders. A titanium dioxide (TiO₂) concentrate was used as a standard mixture, to which partial substitution was made for each of the titanium dioxide (TiO₂) extenders. In percentage mass / mass of 5, 10 and 15 respectively. There were seven extenders of different characteristics: five calcium carbonates, one aluminum silicate and one barium sulphate, among which a selection was made of the three that complied with the physicochemical characteristics of the paint. The extensions that met the requirements of the painting were two of the carbonates under study and the aluminum silicate.

Keywords: semi-matt paint; extenders; latex; pigment; titanium dioxide.

Reformulación de pintura látex clase A Semimate de uso interior, mediante la sustitución parcial del dióxido de titanio por exténderes.

Resumen.- El objetivo principal de esta investigación, fue reformular una pintura látex clase A semimate de uso interior mediante la sustitución parcial de dióxido de titanio (TiO₂) por exténderes. Como mezcla patrón se usó un concentrado dióxido de titanio (TiO₂) al cual se le realizó la sustitución parcial por cada uno de los exténderes del dióxido de titanio (TiO₂) En porcentaje masa/masa de 5, 10 y 15 respectivamente. Se contaron con siete exténderes de distintas características: 5 carbonatos de calcio, 1 silicato de aluminio y 1 sulfato de bario, entre los cuales se realizó una selección de los tres que cumplieron con las características fisicoquímicas de la pintura. Los exténderes que cumplieron con los requerimientos de la pintura fueron dos de los carbonatos en estudio y el silicato de aluminio.

Palabras claves: pintura semimate; extender; látex; pigmento; dióxido de titanio.

Recibido: abril 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

La pintura es aquel producto en estado líquido, fluido o viscoso que una vez aplicado sobre un soporte o superficie, al cabo de un tiempo, se transforma en una película sólida y opaca, fuertemente adherida a dicha superficie o soporte confiriéndole el color del pigmento que tiene la composición de la pintura. Existen diversos tipos de pinturas (imprimaciones y esmaltes, plásticas,

barnices, entre otros), las cuales cada una está diseñada para un fin específico, el presente trabajo de investigación centra su interés únicamente en las pinturas látex, también llamadas pinturas plásticas, de emulsión o decorativas de base agua. Considerando esto, se procede a definir lo que es una pintura látex como, una dispersión en medio acuoso de partículas aglutinadas mediante un determinado ligante y estabilizadas de forma conveniente, generalmente son empleadas para la decoración y protección de superficies, por ejemplo paredes y fachadas, [1].

Los pigmentos son compuestos orgánicos e inorgánicos, cuya función es proporcionar a la pintura color y poder cubriente. Los pigmentos son opacos tanto en seco como en húmedo.

* Autor para correspondencia:

Correo-e: belenparicaguan@gmail.com (Belén María Paricaguán)

Ruszala y colaboradores [2] enfatizan que el dióxido de titanio (TiO_2) es uno de los más eficientes pigmentos de dispersión de luz conocidos por el hombre, y como resultado es ampliamente utilizado para entregar opacidad, especialmente en formulaciones de pintura. Sin embargo, debido al costo del mismo, la disminución de los recursos y un proceso de fabricación que consume mucha energía y produce subproductos indeseables, se requieren sustitutos para mantener una fuente de pigmento blanco en el futuro. Existen muchos sustitutos, como caolín (tanto sin tratar como calcinado) y látex. Estos, junto con otras alternativas, son revisados. Hassas y colaboradores [3] en su investigación resaltan el comportamiento del carbonato de calcio precipitado (PCC), y se definió como seudoplástico y su viscosidad se eleva con el aumento del pH. Se encontró aceptable para la sustitución parcial del dióxido de titanio (TiO_2), ya que su contribución a la opacidad es mayor que la de otros sustitutos de la carga. La producción de PCC es un proceso de recristalización de calcita en condiciones bien controladas; por lo tanto, los productos son más puros que los otros minerales. Debido a esta pureza, las pinturas que contienen PCC producen un brillo más alto que las pinturas estándar que contienen calcita molida (GCC) como pigmento. Se observó que el PCC parcialmente sustituido por dióxido de titanio (TiO_2) puede mejorar la estabilidad, la resistencia al fregado, el brillo y la cobertura de las pinturas producidas.

Karakas y colaboradores [4] realizaron un estudio con el carbonato de calcio precipitado (PCC) se sustituyó por TiO_2 en la mezcla de pintura con tres concentraciones diferentes de volumen de pigmento (PVC). Se observó que la sustitución de TiO_2 por PCC depende del valor de PVC en el que hay una cantidad óptima de PCC. La calidad de las pinturas producidas por PCC junto con sus propiedades reológicas se evaluó en función de las características estándar tanto en pinturas húmedas como secas, además, los valores de viscosidad, densidad, opacidad y brillo. La adición de PCC aumenta la opacidad hasta cierto punto. De manera similar, la resistencia al fregado y la viscosidad aumentan con la adición de PCC en todos los PVC, sin embargo, la viscosidad no es tan crítica para la

producción de pintura. Por otro lado, no hay ningún efecto sistemático de PCC en el valor de brillo de la pintura. En general, este estudio demuestra que el PCC puede usarse exitosamente para sustituir TiO_2 solo con un ajuste cuidadoso del PVC y otros exténderes utilizados en la formulación de la pintura.

Asimismo, las cargas, generalmente inorgánicas; aportan cuerpo, materia sólida, estructura y reología a la pintura. Las cargas son opacas cuando están secas pero se vuelven translúcidas en estado húmedo. Una gran diferencia con los pigmentos es su bajo índice de refracción entre 1,5 y 1,7 por lo que su contribución al poder cubriente de la pintura es despreciable. Las cargas pueden ser divididas en dos grupos: cargas de relleno y exténderes. Es necesario destacar, que en función de la carga utilizada variarán las características del producto final[5].

Los exténderes son un tipo de carga funcional, ya que tienen la capacidad de mejorar el rendimiento de los pigmentos cubrientes debido a dos posibilidades, primero, si su forma es laminar (tipo silicato de aluminio), las partículas de extender provocan que el pigmento se distribuya y arregle en forma espaciada evitando su aglomeración, segundo, si la forma del extender es nodular y su tamaño medio de partícula se asemeja al tamaño del dióxido de titanio (TiO_2), (tipo carbonatos de calcio micronizados y sulfato de bario), las partículas del extender se distribuyen entre las partículas de dióxido de titanio (TiO_2), generando un efecto de espaciamiento que igualmente evita su reaglomeración y, en ambos casos, el resultado es una mejora del proceso de dispersión del dióxido de titanio (TiO_2), lo que conlleva a beneficios como mayor cubrimiento, mayor poder de tinte, mayor retención de brillo y mejor estabilidad contra la sedimentación[6].

En Venezuela por el alto costo del dióxido de titanio se planteó, reformular una pintura látex clase A semimate de uso interior, mediante la sustitución parcial del dióxido de titanio (TiO_2) por exténderes. Se fabricaron alternativas de formulación con reducciones de la concentración en porcentaje en masa de dióxido de titanio (TiO_2) y su sustitución parcial por exténderes, luego de la evaluación de

las propiedades de las pinturas alternativas, fueron seleccionados los tres que mejor exténderes y se ajustaron a los requerimientos de la calidad de la pintura. Así a través de diversas evaluaciones de calidad en la película en pinturas tanto húmedas como secas se obtuvieron las concentraciones adecuadas de sustitución parcial de dióxido de titanio (TiO_2) por los exténderes y se analizó su impacto en las alternativas de formulación planteadas[7].

2. Materiales y Métodos

2.1. Exténderes a evaluar

Se tomó en consideración siete exténderes a estudiar tomando en cuenta su forma, tamaño de partícula, índice de refracción en seco y absorción de aceite. Bhoge y colaboradores [8] realizaron formulaciones con el reemplazo parcial de hasta un 30 % del pigmento dióxido de titanio (TiO_2) utilizando Mica- CaCO_3 en pintura decorativa. Sin embargo, en esta investigación se fijó un rango entre (5-15) %, debido a la poca disponibilidad de materia prima en el mercado venezolano para realizar los ensayos, el mismo fue usado en todas las fórmulas desarrolladas. Los análisis se realizaron por triplicado, usando el mismo sistema de medición, bajo las mismas condiciones de calidad soportadas según las Normas Venezolanas Covenin. Asimismo, para la sustitución parcial del dióxido de titanio (TiO_2), se inició tomando en consideración el valor más alto 15 %, y de esta manera obtener el punto en el cual las propiedades críticas del producto evaluado se encontraron dentro de especificaciones a la mayor reducción posible de dióxido de titanio (TiO_2) [7].

En la Tabla 1 se observan las características de siete exténderes, cinco carbonatos de calcio, un silicato de aluminio y un sulfato de bario.

En principio se tomó como base un concentrado de dióxido de titanio (TiO_2), esto es debido a que posee la mayor cantidad del pigmento y, por ende, permitiría observar con mayor facilidad el efecto de los exténderes sobre el dióxido de titanio (TiO_2) en la pintura en estudio; asimismo, se determinaron propiedades tales como: peso por galón, no volátiles, viscosidad, pH, sedimentación

Tabla 1: Exténderes adquiridos para realizar ensayos.

E_i	Familia	Tamaño de partícula $d_{50}(\mu\text{m})$	Absorción de aceite ($\text{g}_{ac}/100\text{g}_{ext}$)	Índice de refracción en seco (Adim)
E_1	CaCO_3 (microniz)*	0,70	17,0	1,57
E_2	CaCO_3 (microniz)*	1,00	24,0	1,57
E_3	CaCO_3 (microniz)*	0,80	21,0	1,57
E_4	CaCO_3 (microniz)*	3,05	22,1	1,57
E_5	CaCO_3 (microniz)*	0,90	20,5	1,57
E_6	$\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$ **	5,40	152,3	1,64
E_7	BaSO_4 *	0,80	16,7	1,65

microniz: micronizado, *:Forma nodular, **:Forma laminar

E_i : extender i, d_{50} : tamaño medio de partícula

y poder de tinteo, de acuerdo a las alternativas más adecuadas en cuanto a sus especificaciones se eligen tres opciones a desarrollar [7]. En la Tabla 2 se observan las fórmulas 1, 2 y 3 que corresponden a la cantidad de dióxido de titanio (TiO_2) sustituidas y estas fueron 5 %, 10 % y 15 % masa/masa respectivamente.

Tabla 2: Diseño de fórmula para el concentrado de Dióxido de Titanio (TiO_2)

Materia prima	Porcentaje masa/masa			
	F_{actual}	$F_{5\%}$	$F_{10\%}$	$F_{15\%}$
Agua tratada	26,6	26,6	26,6	26,6
Espesante	0,2	0,2	0,2	0,2
*Tensoactivos	2,0	2,0	2,0	2,0
Co-solvente	1,0	1,0	1,0	1,0
Dióxido de titanio	70,0	66,5	63,0	59,5
Extender E_i	0,0	3,5	7,0	10,5
Bactericida	0,2	0,2	0,2	0,2

*Tensoactivos: antiespumantes/dispersantes/humectantes

$F_n\%$: Fórmula al n % de sustitución parcial de TiO_2 , E_i : extender i

Nota: Etapa de fabricación dispersión

Las alternativas de formulación presentadas en la Tabla 2 aplican de igual forma para todos los exténderes.

2.2. Caracterización y evaluación fisicoquímica de la pintura clase A semimate de uso interior

En la Tabla 3 se presentan todas las materias primas que conforman la fórmula para la elaboración

de la pintura clase A semimate de uso interior.

Tabla 3: Fórmula actual para la fabricación de la pintura clase A semimate de uso interior [7]

Materia prima	Porcentaje masa/masa
Agua tratada	22,0
Celulosa/Espesante	2
*Tensoactivos	1,0
estabilizante de pH	2,0
Coalescente	19,0
Dióxido de titanio	12,0
Cargas varias	0,5
Co-solvente	1,0
Bactericida / Fungicida	0,5
Resina	40,0
TOTAL	100,0

*Tensoactivos: antiespumantes/dispersantes/humectantes
Nota: etapa de fabricación, dispersión y terminación

La pintura en estudio se evaluó según sus parámetros fisicoquímicos tal como se observa en la Tabla 2 y soportada según lo establecido en la Norma Venezolana Covenin (en caso de regirse por alguna).

Tabla 4: Parámetros fisicoquímicos de la pintura clase A semimate de uso interior

Propiedad	Unidad	Especificación
No volátiles[8]	%	Mín. 40,00
pH [9]	N/A	8,0-9,5
Peso por galón [10]	kg/gal	4,77±0,20
Grado de dispersión[11]	μm	25-35
Viscosidad[12]	KU	85-95
Estabilidad en el envase[13]	N/A	Mín. s/Norma
Brochabilidad[14]	N/A	Mín. fácil
Resistencia al fregado	Ciclos	Mín. 300
Brillo. 60°[15]	N/A	15-25
Blancura	%	(*)
Índice de amarillez	N/A	(*)
Radio contraste[16]	%	Mín. 95
Secamiento libre de huella[17]	h	Máx. 1

N/A: no aplica, KU: Krebs-Stormer, Mín: mínimo, Máx.: máximo
s/norma: según norma, F: fórmula, (*): Comparar con F. actual

2.3. Evaluación de la influencia de la reducción del dióxido de titanio (TiO_2) por los exténderes en la reformulación de la pintura objeto del estudio

Para poder evaluar la influencia de la sustitución parcial del dióxido de titanio en las reformulaciones estudiadas, se quiso conocer el comportamiento de

las fórmulas actuales si se reducen las cantidades de dióxido de titanio sin sustituirlo por otro tipo de carga. Se fabricó cada uno de las pinturas en estudio, restándoles las cantidades de dióxido de titanio que se redujeron en las fórmulas propuestas. Para aquellas fórmulas reformuladas en las cuales existía más de un porcentaje de sustitución posible, se utilizó la menor concentración, con la intención de generar el menor impacto en las propiedades que no eran de interés para esta evaluación. Posteriormente se evaluó el cubrimiento proporcionado por cada una de las pruebas realizadas, con el fin de corroborar que los exténderes cumplieron con su función principal: extender el dióxido de titanio[7].

Se evaluó la influencia de la reducción del dióxido de titanio en las reformulaciones propuestas. Los pasos para dicha evaluación se dividieron en: fabricación de pinturas con cantidades de dióxido de titanio (TiO_2) reducidas, evaluación del cubrimiento proporcionado por dicha pintura y análisis de la variación de las propiedades en las pinturas alternativas con respecto a pinturas con dióxido de titanio (TiO_2) reducido y fórmula actual.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de la pintura clase A semimate de uso interior

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para la pintura clase A semimate de uso interior según fórmula actual.

Los valores obtenidos durante la evaluación de dicha pintura indican que la misma cumple con los parámetros fisicoquímicos exigidos en las Normas Venezolanas Covenin, por lo que no fue necesario un ajuste previo. Asimismo, para la fórmula que contiene una sustitución parcial de 10 % fue sustituido 7 % de dióxido de titanio (TiO_2) y la fórmula que contiene una sustitución parcial de 15 % fue sustituido 10,5 % de dióxido de titanio (TiO_2).

La fórmula actual contiene un 70 % de dióxido de titanio, por lo que para la fórmula que contiene una sustitución parcial de 5 % fue sustituido 3,5 % de dióxido de titanio (TiO_2) por el extender correspondiente en el concentrado de dióxido

Tabla 5: Propiedades de la pintura clase A semimate de uso interior según fórmula actual

Propiedad	Unidad	Especificación	F. Actual
No volátiles[8]	%	Mín. 40,00	51,31
pH [9]	N/A	8,0-9,5	8,88
Peso por galón[10]	kg/gal	4,77 ±0,20	4,89
Grado de dispersión [11]	μm	25-35	25
Viscosidad[12]	KU	85-95	92,6
Brochabilidad [14]	N/A	Mín. fácil	Fácil
Resistencia al fregado	Ciclos	Mín. 300	> 400
Brillo. 60°[15]	N/A	15-25	25,0
Blancura	%	(*)	84,24
Índice de amarillez	N/A	(*)	2,70
Radio contraste[16]	%	Mín. 95	95,41
Secamiento libre de huella[17]	h	Máx. 1	1

N/A: no aplica, KU: Krebs-Stormer, Mín.: mínimo, Máx.: máximo
s/norma: según norma, F: fórmula, (*)Comparar con F. actual.

de titanio llamado desde ahora (intermedio). Asimismo, para la fórmula que contiene una sustitución parcial de 10 % fue sustituido 7 % de dióxido de titanio (TiO_2) y la fórmula que contiene una sustitución parcial de 15 % fue sustituido 10,5 % de dióxido de titanio (TiO_2).

Una vez fabricadas las 7 alternativas al 5 %, 10 % y 15 % masa/masa de sustitución del intermedio, se realizaron las evaluaciones de las características físicas y químicas.

3.1.1. Viscosidad

Al variar los tipos de carga en la fabricación de una misma pintura se observan variaciones en la viscosidad de la pintura, dependiendo de las características asociadas a dicha carga, tal y como se presenta en la Tabla 7, los distintos valores obtenidos a medida que se realizan cambios en la formulación.

La mayoría de las alternativas de los intermedios, excepto para el E_7 , presentaron valores de viscosidad por encima de la especificación, esto ocurre debido a que al sustituir el dióxido de titanio (TiO_2) por los exténderes se incrementa la absorción de aceite total del dióxido de titanio (TiO_2) más extender, exceptuando el caso de E_7 , cuya absorción de aceite particular es muy cercana a la del dióxido de titanio (TiO_2), en los demás casos la absorción de aceite del extender

Tabla 6: Variación de la viscosidad en las distintas alternativas

E_i	Viscosidad (KU) % Sustitución de TiO_2		
	5 %	10 %	15 %
E_1	102,2	101,0	100,1
E_2	96,1	96,4	97,1
E_3	101,0	110,1	101,2
E_4	101,7	98,7	98,1
E_5	99,1	98,8	98,1
E_6	103,3	105,2	106,0
E_7	94,5	93,7	89,9

E_i : extender i, KU: Krebs-Stormer

F. actual:95,0 KU

Especificación: (85,0-95,0) KU

es superior a la del dióxido de titanio (TiO_2). El índice de absorción es un factor importante que influye en forma considerable, sobre la viscosidad y propiedades de flujo y nivelación o extensibilidad de la película de pintura [18].

Asimismo, las partículas redondeadas producen menor espesamiento que las que tienen formas laminares y también mientras más alto sea el índice de absorción de aceite, mayor será la viscosidad de la pintura. Si en la fórmula hay carga de tamaño muy grande comparadas con el dióxido de titanio (TiO_2), estas obligan a las partículas de titanio a juntarse entre ellas y de este modo vuelven a perder eficacia, es necesaria la presencia de cargas finas para separar las partículas de dióxido de titanio.

El E_6 presentó los valores más altos en cuanto a viscosidad del intermedio entre (103,3 y 106,0) KU; incrementando a medida que aumentaba la concentración del extender, esto es debido a que, dicho extender corresponde a un silicato de aluminio cuya forma de partícula es laminar y posee el valor de absorción de aceite más alto entre los exténderes evaluados, la combinación de cargas laminares de varios tamaños aumenta la porosidad en pintura con una concentración en volumen de pigmentos (PVC) por encima de PVC crítico esto aumenta la opacidad en seco, pero puede perjudicar características como lavabilidad.

Para la evaluación del E_7 , ocurre todo lo contrario, ya que en este caso se obtuvieron, los mínimos valores de viscosidad entre (89,9-94,5) KU, disminuyendo a medida que la concentración

del extender se incrementa, lo cual coincide con lo esperado, debido a que al ser un sulfato de bario presenta una forma de partícula nodular, su área de superficie es reducida, lo cual trae como consecuencia que la absorción de aceite de este producto sea baja ($16,7g_{ac}/100g$) e incluso menor a la del TiO_2 ($17,1g_{ac}/100g$).

Finalmente, se observa que para los exténderes asociados a carbonatos, que van desde el 1 hasta el 5, los valores de viscosidad son altos y similares entre sí. Generalmente, a menor tamaño de partícula mejor dispersión, y a mayor dispersión menor será la cantidad de solvente libre en la mezcla, por ende, el concentrado o pintura presentará una mayor viscosidad[5].

3.1.2. Brillo

Esta propiedad es crítica para la pintura en estudio por lo que se tuvo que verificar en el concentrado de pigmentos y así evitar la selección de exténderes que puedan afectar el brillo. Para realizar estas pruebas, se utilizó una base estándar sin dióxido de titanio (TiO_2) de una pintura satinada en la cual fue añadida, en proporción 90 % de base y 10 % de concentrado de dióxido de titanio (TiO_2) (% masa/masa) para su posterior aplicación a espesor constante, una vez seca la película de pintura se obtuvieron los resultados representados en la Figura 1.

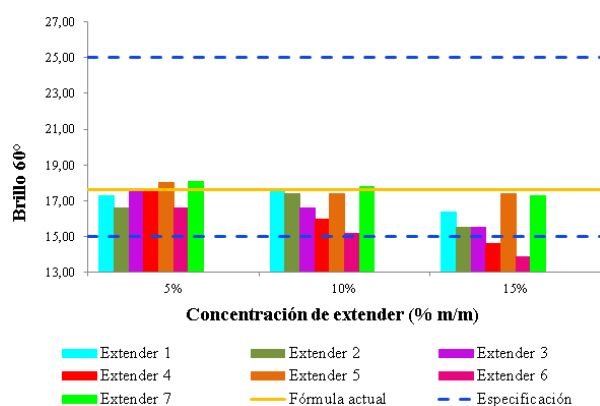


Figura 1: Variación del brillo en función de la concentración en porcentaje masa/masa de dióxido de titanio (TiO_2) sustituido parcialmente por cada extender evaluado.

El brillo es afectado por dos características: absorción de aceite y finura de partícula de

los exténderes utilizados, [6]. Debido a esto y considerando que el dióxido de titanio posee un índice de absorción de aceite relativamente bajo ($17,1g_{ac}/100g_{pig}$) y pequeño tamaño de partícula ($0,3\mu m$); en la medida en que se redujo la concentración del porcentaje masa/masa del mismo, sustituyéndose por cada uno de los exténderes se evidenció, que el brillo de la película de la pintura seca disminuía con respecto al brillo presentado por la pintura de la fórmula actual (F. actual). Sin embargo, los valores de brillo obtenidos se encuentran dentro de especificaciones respecto a las normas, a excepción de E_6 correspondiente al silicato de aluminio, ya que si bien, a una concentración de 5 % masa/masa en sustitución parcial del dióxido de titanio (TiO_2) este presenta un valor de brillo medianamente aceptable (brillo 60° al 5 %: 16,6), se aprecia una caída brusca de esta propiedad a medida que es incrementada la concentración del extender por lo cual para un 15 % masa/masa en sustitución parcial de dióxido de titanio, el valor de brillo obtenido es menor al mínimo requerido en especificaciones (brillo 60° prueba E_6 al 15 %: 13,9; brillo 60° especificación: entre 15,0 y 25,0) en concordancia con lo esperado, esto es debido a la alta absorción de aceite y gran tamaño que presenta este silicato (absorción de aceite: $152,3g_{ac}/100g$; tamaño de partícula: $5,40\mu m$). Asimismo de forma opuesta, sucede con el E_7 cuya baja absorción de aceite y reducido tamaño (absorción de aceite: $16,7g_{ac}/100g$; tamaño de partícula: $0,80\mu m$), le confiere los valores más altos de brillo (entre 17,6 y 18,1 manteniéndose prácticamente constante en la medida que es disminuida la concentración de dióxido de titanio (TiO_2)).

En el caso de los carbonatos de calcio micronizados (de E_1 a E_5) estos presentaron distintos comportamientos, esto es debido a los diferentes tamaños medios de partícula (variando desde $0,70\mu m$ hasta $3,05\mu m$), así como, sus índices de absorción de aceite cercanos, pero no iguales entre sí (entre $17,0g_{ac}/100g_{ext}$ y $24,07g_{ac}/100g_{ext}$). Sin embargo, considerando ambas propiedades, se tienen que estos exténderes cumplieron con el comportamiento esperado, puesto que a menor tamaño y menor índice de absorción de aceite, más

alto era el brillo proporcionado por la película de pintura asociada. De igual forma, se hace notar que el carbonato de calcio correspondiente a E_5 presenta un comportamiento muy similar al sulfato de bario, esto se debe a que es un carbonato diseñado para usarse en productos de alto brillo, fabricado mediante un proceso controlado de molienda que garantiza la distribución cerrada y el tamaño de partículas finas, generando una dispersión y espaciado del (TiO_2) eficientes con mínima afectación del brillo.

3.1.3. Relación radio contraste y cubrimiento

Se toman los intermedios preparados con la fórmula actual y con sustituciones por los distintos exténderes y se incorporan a paridad de condiciones a base estándar donde el aporte del dióxido de titanio (TiO_2) al cubrimiento es máximo. Asegurando un espesor constante de 3mils en cartulinas barnizadas no absorbentes. Los valores de cubrimiento obtenidos por las distintas alternativas superan el mínimo requerido en especificaciones 95,0 %.

Tabla 7: Variación porcentaje de blancura y relación radio contraste

	Propiedad					
	Blancura(%)			Radio contraste(%)		
	% Sustitución de TiO_2			% Sustitución de TiO_2		
	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %
E_1	69,78	71,07	70,17	95,69	95,94	95,66
E_2	70,83	70,79	69,53	96,88	96,78	95,35
E_3	71,88	71,55	70,14	95,55	95,9	95,22
E_4	70,02	69,78	69,71	95,93	95,28	95,37
E_5	70,19	70,92	71,18	95,44	95,88	95,51
E_6	71,55	71,57	71,29	97,37	96,69	96,34
E_7	70,78	70,89	70,71	96,05	96,42	96,07

En cuanto al porcentaje de blancura se observa en la Tabla 8 que el mejor comportamiento fue presentado por E_2 (carbonato de calcio micronizado), E_5 (carbonato de calcio micronizado), E_6 (silicato de aluminio) y E_7 (sulfato de bario) puesto que mantuvieron niveles de blancura relativamente altos a mayores porcentajes de sustitución (15 % masa/masa) parcial del dióxido de titanio (TiO_2). Sin embargo, aquellos pigmentos que tienen

tamaño de partícula extremadamente pequeño permiten una buena distribución del color sobre la superficie y de aquí su poder colorante. En el caso del sulfato de bario, según el autor [5] los cristales son nodulares rómbicos e inertes, su resistencia química y poca solubilidad en el agua la predestinan para recubrimientos a la intemperie, tienen un índice de refracción bajo y absorción de aceite extremadamente baja. Y para el silicato de aluminio es de estructura laminar y flexible sirve para estabilizar la distribución de pigmentos funcionando como un extender de dióxido de titanio (TiO_2) fortaleciendo el poder de cubrimiento. Al analizar los resultados de radio contraste y porcentaje de blancura para los distintos porcentajes de sustitución parcial de dióxido de titanio (TiO_2) reportados en la Tabla 8, se seleccionan los exténderes E_2 , E_5 y E_6 para la reformulación y evaluaciones de propiedades críticas de la pintura en estudio.

3.2. Determinar las cantidades adecuadas de exténderes a utilizar en la nueva fórmula pintura látex tipo A semimate de uso interior.

Para esta pintura, al reducir en un 15 % masa/masa la concentración del dióxido de titanio (TiO_2) y sustituirlo parcialmente por cada uno de los tres exténderes evaluados, en ninguno de los casos se alcanzaron valores de cubrimiento que cumplieran con especificaciones, esto es debido, a que la pintura clase A semimate de uso interior posee una baja concentración en volumen de pigmentos (PVC) de 30 %, lo que la hace mucho más susceptible a los cambios en el material sólido contenido en la misma[5].

3.3. Evaluación de las propiedades críticas de la pintura en estudio

Al observar los valores presentados en la Tabla 9, el extender 6 correspondiente al silicato de aluminio a una concentración de 15 % masa/masa en sustitución parcial de dióxido de titanio (TiO_2), arrojó los mejores resultados en cubrimiento (94,7 %) y blancura (87,3 %), ocurriendo lo contrario en el caso del brillo 60°, propiedad en la cual obtuvo valores inferiores al establecido en especificaciones debido a que este extender

posee los valores más altos en cuanto a tamaño de partícula ($5,40\mu\text{m}$) e índice de absorción de aceite ($152,3\text{gac}/100\text{gext}$) que tiene como consecuencia una menor cantidad de resina libre en el producto causando bajo brillo en la pintura terminada. Entonces, al reducir el porcentaje de sustitución parcial del TiO_2 a un 10 % masa /masa se tiene que el extender 6 cumple especificaciones de cubrimiento con un 0,1 % por encima del presentado por la fórmula actual así como un % blancura 0,2 % mayor; en el caso de los exténderes 2 y 5 se hizo necesaria la reducción de la concentración masa/masa de extender sustituido por dióxido de titanio (TiO_2) a un 5 %, concentración en la cual dichos exténderes lograron alcanzar el cubrimiento mínimo requerido por especificaciones 95,0 %, sin embargo, no alcanzaron la blancura presentada por la fórmula actual permaneciendo ambos exténderes un 1,4 % por debajo de la misma.

Tabla 8: Evaluación de propiedades críticas para la pintura clase A semimate de uso interior

Sustitución (masa/masa)	Propiedad	E_6	Δ	E_2	Δ	E_5	Δ
15 %	R/C (%)	94,5	0,9	92,8	2,6	91,1	4,3
	Brillo 60°	4,6	20,4	14,5	10,5	14,7	10,3
	Blancura (%)	87,3	1,1	79,5	6,7	80,3	5,9
10 %	R/C (%)	95,5	0,1	94,3	1,1	93,6	1,9
	Brillo 60°	15,2	9,8	18,4	6,6	18,6	6,4
	Blancura (%)	86,4	0,2	82,3	3,9	82,4	3,8
5 %	R/C (%)	93,5	1,9	95,3	0,1	96	0,6
	Brillo 60°	23,5	24,5	20,1	4,9	20,3	4,7
	Blancura (%)	86,4	0,2	84,8	1,4	84,8	1,4

R/C: Relación de contraste, Mín.: mínimo.

F: fórmula, Δ : variación con respecto a fórmula actual.

R/C (%): Especificación: Mín. 95,0; F. actual: 95,4

Brillo 60°: Especificación: (15-25); F. actual: 25

Blancura (%): Especificación: Comp. con F. actual; F. actual: 86,2

3.4. Estandarizar las fórmulas actuales y las reformulaciones con los exténderes alternativos en producto terminado

3.4.1. Formulación y evaluación de propiedades fisicoquímicas de las alternativas propuestas para pintura látex tipo A semimate de uso interior.

Las alternativas de formulación con los exténderes 6, 2 y 5 correspondientes a silicato de

aluminio E_6 , carbonato de calcio micronizado E_2 y carbonato de calcio micronizado E_5 . Asimismo, en la Tabla 10 se proporcionan las fórmulas alternativas para la pintura látex clase A semimate de uso interior.

Tabla 9: Fórmulas alternativas para pintura clase A semimate de uso interior

Materia prima	Alternativas % masa/masa		
	E_6	E_2	E_5
Agua tratada	22,00	22,00	22,00
Celulosa / Espesantes	2,00	2,00	2,00
*Tensoactivos	1,00	1,00	1,00
estabilizante de pH	2,00	2,00	2,00
Dióxido de titanio	17,10	18,05	18,05
Extender	1,90	0,95	0,95
Cargas varias	12,00	12,00	12,00
Coalescente	0,50	0,50	0,50
Co-solvente	1,00	1,00	1,00
Bactericida/Fungicida	0,50	0,50	0,50
Resina	40,00	40,00	40,00
TOTAL	100,00	100,00	100,00

*Tensoactivos: antiespumantes/dispersantes/humectantes

En la Tabla 10 se evidencian los resultados obtenidos para la concentración en volumen de pigmentos (PVC) de las alternativas formuladas para la pintura látex clase A semimate de uso interior.

Tabla 10: Variación de la concentración de pigmento en volumen (PVC) en las alternativas propuestas para la pintura látex clase A semimate de uso interior.

F. actual	PVC (%)					
	Alternativas					
	E_6	Δ (%)	E_2	Δ (%)	E_5	Δ (%)
30,00	31,09	1,09	30,47	0,47	30,47	0,47

*Tensoactivos: antiespumantes/dispersantes/humectantes

Se tiene que la concentración de pigmento en volumen de las alternativas presentó incrementos con respecto a la fórmula actual debido a las diferencias de densidad entre el dióxido de titanio, silicato de aluminio y carbonatos de calcio (PVC fórmula actual: 30,00 %; PVC E_6 : 31,09 %; PVC E_2 y E_5 : 30,47 %), a pesar de ello las alternativas de formulación presentadas se mantuvieron con

valores de PVC dentro del rango recomendado para las pinturas clase A semimate de uso interior entre (30-40) %.

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación de la pintura látex clase A semimate de uso interior en la fórmula actual y alternativas correspondientes.

3.4.2. Evaluación del brillo en la pintura

En la Figura 2 se observa la evaluación del brillo de la película a 60°, se tiene que las fórmulas alternativas arrojaron valores menores al presentado por la fórmula actual (F. actual: 25,0; E_6 : 15,2; E_2 : 20,1 y E_5 : 20,3), esto es debido a que la absorción de aceite de los exténderes (E_6 : 152,3; E_2 : 24,0 y E_5 : 20,5) es mayor a la del dióxido de titanio (17,1) teniendo entonces valores de brillo decrecientes conforme la absorción de aceite del extender incrementa, siendo entonces E_6 el que presenta el valor más bajo entre las alternativas propuestas.

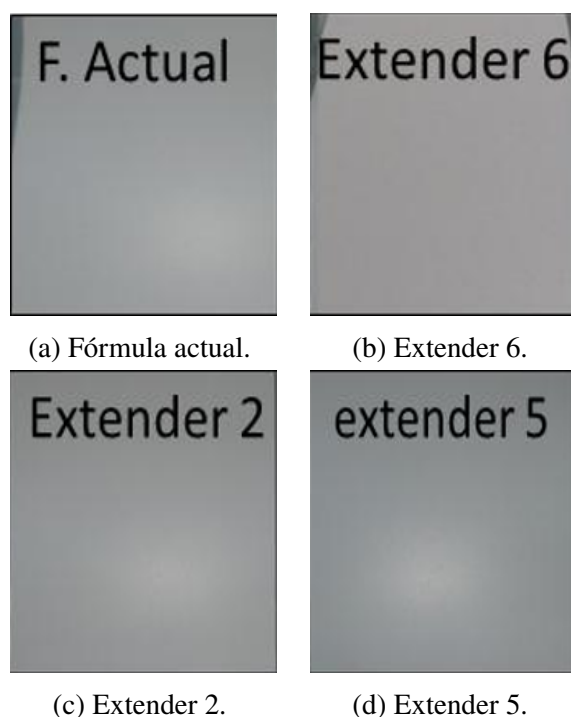


Figura 2: Prueba de brillo 60° aplicada a pintura látex de uso interior clase A semimate según fórmula actual y alternativas.

Al evaluar el cubrimiento proporcionado por las distintas alternativas, se tiene que los exténderes

6 (silicato de aluminio) y 5 (carbonato de calcio micronizado) superan el valor proporcionado por la fórmula actual (f. actual: 95,4 %; E_6 : 95,5 % y E_5 : 95,9 %), siendo el E_5 el que presenta el mejor comportamiento, sin embargo, su concentración en la alternativa propuesta para la pintura clase A semimate de uso interior es de 5 % masa/masa de sustitución, mientras que E_6 se encuentra propuesto para una sustitución parcial de 10 % masa/masa, por lo que continua siendo este último el que presenta los mejores resultados.

En cuanto al E_2 , este suministró el menor valor de radio contraste entre las pruebas realizadas (95,3 %), sin embargo, cumple con el requerimiento mínimo de opacidad exigido en especificaciones 95,0 % por lo que es también una alternativa válida de formulación para esta pintura.

Se observa que el uso de E_6 mejora en mayor medida la blancura e índice de amarillez de la película de pintura, debido a su alto grado de pureza y luminosidad, mientras que los carbonatos micronizados, exténderes E_2 y E_5 , involucran pequeñas mejoras en dichas propiedades, que pueden considerarse como que se mantienen inalteradas a los % de sustitución estudiados (f. actual: 84,24 % y 2,70; E_6 : 86,40 % y 1,86; E_2 : 84,83 % y 2,67; E_5 : 84,76 % y 2,65).

3.4.3. Identificación del extender con mejor performance

De las tres alternativas propuestas para la pintura evaluada, la correspondiente a E_6 (silicato de aluminio) presentó el mejor comportamiento en cuanto a cubrimiento, porcentaje blancura para todos los casos. Este es el desempeño esperado ya que dicho extender posee una forma de partícula laminar siendo entonces el mejor espaciando y redistribuyendo el dióxido de titanio en las pinturas a diferencia del resto de los exténderes estudiados, los cuales poseían una forma de partícula nodular. Referente al resto de las propiedades, las variaciones con respecto a la fórmula actual no generaron grandes impactos ya que en todos los casos se mantuvieron dentro de especificaciones. Debido a lo anterior, aunque en la pintura semimate el brillo se ubica en el mínimo de la especificación, se considera que el silicato de

Tabla 11: Propiedades de la pintura látex clase A semimate de uso interior

Propiedad	Unidad	Alternativas			
		F. actual	E_6	E_2	E_5
No volátiles	%	51,90	52,00	51,93	52,12
pH	N/A	8,88	8,90	8,90	8,91
Peso por galón	kg/gal	4,89	4,88	4,87	4,89
Grado de dispersión	μm	25	25	25	25
Viscosidad	KU	92,6	95,0	93,1	94,2
Brochabilidad	N/A	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil
Resistencia al fregado	Ciclos	>400	> 400	> 400	> 400
Brillo. 60°	N/A	25,0	15,2	20,1	20,3
Radio contraste	%	95,4	95,5	95,3	95,9
blancura	%	84,24	86,40	84,83	84,76
Índice de amarillez	N/A	2,70	1,86	2,67	2,65
Secamiento libre de huella	Min	60	45	60	60

N/A: no aplica, KU: Krebs-Stormer. Mín.: mínimo, Máx.: máximo

F: fórmula, E_i : extender i

aluminio es el extender con mejor performance en la línea estudiada.

3.5. Evaluación de la influencia de la reducción del TiO_2 por los nuevos exténderes en las reformulaciones de pintura látex clase A semimate de uso interior.

La evaluación de la influencia de la reducción del dióxido de titanio en las reformulaciones propuestas se realizó con el fin de comprobar la funcionalidad de los exténderes como espaciadores del dióxido de titanio (TiO_2) en las pinturas, se tomó en consideración, parámetros fisicoquímicos de las pinturas y una propiedad crítica como lo es el poder cubriente a través de la prueba de radio contraste.

3.5.1. Evaluación del cubrimiento proporcionado por productos con cantidades de dióxido de titanio reducidas para pintura látex clase A semimate de uso interior

El porcentaje de reducción y sustitución parcial de dióxido de titanio (TiO_2) fue de un 5 % masa/masa del mismo ya que a porcentajes de sustitución más altos los exténderes E_2 y E_5 , asociados a carbonatos de calcio micronizado, no cumplirían con los requerimientos de calidad de esta pintura en cuanto a cubrimiento.

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos durante la evaluación del cubrimiento a un 5 % masa/masa de reducción de dióxido de

titanio en la pintura clase A semimate de uso interior.

En este caso, el cubrimiento ofrecido por la pintura clase A semimate de uso interior con una reducción del 5 % masa/masa en la concentración de dióxido de titanio es mucho menor al obtenido por la fórmula actual con un 3,0 % menos de opacidad, ubicándose 2,6 % por debajo del valor establecido en especificaciones, debido a que se reduce la cantidad de dióxido de titanio (TiO_2) en la pintura siendo este el principal responsable del cubrimiento proporcionado por la pintura, caso contrario al comportamiento obtenido al sustituir por los exténderes al 5 % masa/masa, exceptuando E_6 que si bien supera el cubrimiento presentado por la pintura con dióxido de titanio reducido (RDT: 92,4 %) proporcionando un cubrimiento de 93,5 % no alcanza el valor mínimo requerido por especificaciones 95,0 %, indicando entonces que para la pintura clase A semimate de uso interior, este extender solo es capaz de mejorar el cubrimiento de la misma a un 10 % de sustitución.

3.5.2. Análisis de la variación de propiedades en las pinturas alternativas con respecto a las pinturas actuales.

En términos generales, las variaciones ocasionadas por el uso de exténderes fueron similares en la pintura estudiada.

Sin embargo, para el caso de la pintura con E_6 , este es un silicato de aluminio, debido a su forma

Tabla 12: Comportamiento del cubrimiento proporcionado por la pintura de uso interior semimate clase A en las distintas pruebas realizadas

Propiedad	Especificación	F.Actual	Prueba RDT		E_6		E_2		E_5	
			RDT 5 % masa/masa	Δ (%)	5 % masa/masa	Δ (%)	5 % masa/masa	Δ (%)	5 % masa/masa	Δ (%)
Radio Contraste (%)	Min. 95,0	95,4	92,4	3,0	93,5	1,9	95,3	0,1	95,9	0,5

Mín.: mínimo, RDT: reducción de dióxido de titanio, F: fórmula, Δ : variación del radio contraste con respecto a la fórmula actual. E_i : extender i

y tamaño cuenta con una alta absorción de aceite ($152,3g_{ac}/100g_{ext}$), lo cual genera el incremento de la viscosidad en la pintura terminada, aunque en ninguno de los casos, dicho incremento fue de magnitud lo suficientemente grande como para salir de especificaciones. Del mismo modo, al poseer un valor relativamente alto de absorción de aceite, el brillo para la pintura clase A semimate de uso interior, se encontró muy cercano al límite inferior establecido en especificaciones.

En cuanto al porcentaje de blancura, usando la pintura con el extender E_6 , este supera en todos los casos los valores establecidos por la fórmula actual. Para el cubrimiento, se logró mantener el comportamiento de la pintura fabricada según fórmula actual, además se redujo el tiempo de secado a 45 minutos, sin ocasionar problemas en las características físicas de la película seca.

Por otra parte, las alternativas correspondientes a E_2 y E_5 experimentalmente presentaron un comportamiento similar, debido a que ambos pertenecen a la familia de los carbonatos de calcio y cuyas discrepancias radican en las características físicas de cada uno de ellos. En el caso de la viscosidad, el extender E_5 , arrojó un valor mayor con respecto a E_2 , esto es debido a su menor tamaño. En lo que a blancura se refiere, ambas alternativas mantienen los valores arrojados por la fórmula actual.

4. Conclusiones

Los exténderes E_2 (carbonato de calcio), E_5 (carbonato de calcio) y E_6 (silicato de aluminio) presentaron los mejores porcentajes de blancura y cubrimiento cuando se sustituyó el mayor porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2). Para la alternativa asociada al uso de silicato de aluminio

como extender de la pintura clase A semimate de uso interior, la concentración adecuada en porcentaje masa/masa para sustituir el dióxido de titanio (TiO_2) por dicho extender es de 10 %. Para la alternativa asociada al uso de carbonatos de calcio micronizado como extender de la pintura clase A semimate de uso interior, la concentración adecuada en porcentaje masa/masa para sustituir el dióxido de titanio (TiO_2) por dicho extender es de 5 %. Al disminuir las concentraciones de dióxido de titanio (TiO_2) en las pinturas sin realizar la sustitución parcial por algún extender, el cubrimiento proporcionado por estas se reduce hasta en un 5,1 % con respecto a la fórmula actual.

5. Recomendaciones

Evaluar sustituciones de dióxido de titanio (TiO_2) entre (5-10) % respectivamente con silicato de aluminio en la pintura semimate de uso interior, para determinar el punto donde se garantice un valor de brillo que no se encuentre en el límite inferior de la especificación. Realizar pruebas en las cuales se evalúe el comportamiento de los exténderes combinándose entre sí para conocer si es posible que los mismos puedan realizar entre sí compensaciones en las propiedades fisicoquímicas de las pinturas, es decir, comprobar si la sinergia entre los materiales mejora el comportamiento individual.

6. Referencias

- [1] Alcalde Cruz. Optimización de pinturas decorativas base agua mediante aditivos dispersantes y espesantes. Trabajo especial de grado, Escola Técnica Superior de Enginyeria Industrial de Barcelona- Enginyeria Química, Universitat politècnica de Catalunya, España, 2014.

- [2] M. J. A. Ruszala, N. A. Rowson, L. M. Grover and R. A. Choudhery. Low Carbon Footprint TiO₂ Substitutes in Paint: A Review. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 6(5), October 2015.
- [3] B. Hassas, F. Karakaş and M. Çelik. Substitution of TiO₂ with PCC (precipitated calcium carbonate) in waterborne paints. In *3rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey*, Antalya, Turkey, April 2013.
- [4] F. Karakaş, B.V. Hassas and M. Çelik. Effect of precipitated calcium carbonate additions of waterborne paints at different pigment volume concentrations. *Progress in Organic Coatings. Revista Elsevier*, 83:64–70, February 2018.
- [5] E. Schweigger. *Manual de pinturas y recubrimientos plásticos*. Editorial Díaz de Santos, 1era edition, 2005.
- [6] J. Calvo. *Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología*. Díaz de Santos. 1era edición, España, 2009.
- [7] Fabiola Sevilla. Reformulación de pinturas latex clase A y B mediante la sustitución parcial de dióxido de titanio por nuevos exténderes. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Venezuela, 2018.
- [8] Pinturas y productos afines. Determinación del contenido de material no volátil. 3^{ra} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 680. (Norma COVENIN 680:2008), Caracas, Venezuela, 2008.
- [9] Sistemas acuosos. Determinación de pH. Norma Técnica FONDONORMA (NTF 676-2011), Caracas, Venezuela, 2011.
- [10] Pinturas, barnices, lacas y productos relacionados. Determinación de la densidad. 2^{da} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 737. (Norma COVENIN 737:1999), Caracas, Venezuela, 1999.
- [11] Pinturas y productos afines. determinación del grado de dispersión del sistema pigmento vehículo. 1^{era} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 1580. (Norma COVENIN 1580:1996), Caracas, Venezuela, 1996.
- [12] Determinación de la viscosidad mediante el viscosímetro Stormer. Norma Venezolana FONDONORMA (NVF 684-2007), Caracas, Venezuela, 2007.
- [13] Pinturas. Determinación de la estabilidad en el envase. Comisión Venezolana de Normas Industriales 682. (Norma COVENIN 682-1996), Caracas, Venezuela, 1996.
- [14] Pintura y barnices. Determinación de la brochabilidad y apariencia de la película. 3^{era} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 472. (Norma COVENIN 472-93), Caracas, Venezuela, 1993.
- [15] Pintura y Productos afines. Determinación de brillo especular. Norma Técnica FONDONORMA (NTF 1142-2009), Caracas, Venezuela, 2009.
- [16] Pinturas y productos afines. Determinación de la relación contraste. 2^{da} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 3258. (Norma COVENIN 3258:1996), Caracas, Venezuela, 1996.
- [17] Pinturas y productos afines. Determinación de los tiempos de secamiento. Norma Venezolana FONDONORMA (NVF 690:2008), Caracas, Venezuela, 2008.
- [18] Henry Fleming. *Tecnología de Pinturas*. Tomo II. Editorial Blume, Madrid, España, 1973.

A Management Plan for Hazardous Substances in the Toxicology-Pharmacology and Organic Chemistry Laboratories

William Peñaloza, Nasser Jamul, Angelina Correia, Cristina De Sousa*

Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.- This research aimed to propose a plan for the proper handling of hazardous substances handled in the Laboratory of Toxicology-Pharmacology and Organic Chemistry at the School of Bioanalysis, Faculty of Health Sciences at the University of Carabobo, based on the Current Environmental Regulation. The research was of a documentary and field type, using as tools of data collection, interviews, surveys and visits to the study sites. substances used in practice were classified as hazard level, and the effluents were characterized by assessing physicochemical parameters as Biochemical Oxygen Demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), chlorides, sulphates and total nitrogen. After the data collection it was evident that all the discharges are discarded without previous treatments to the drainage and that they do not comply with the maximum permissible limits established by Decree N° 3219. Finally, it is proposed to apply a plan that includes the conditioning of laboratories and the deposit of waste, the realization of labels and safety sheets for chemical substances, the management of accounting for substances and the incineration of waste.

Keywords: waste; incineration; sulfates; regulations; biochemical oxygen demand.

Un plan de manejo de las sustancias peligrosas en los laboratorios de toxicología-farmacología y química orgánica

Resumen.- La presente investigación tuvo como finalidad proponer un plan para el manejo adecuado de sustancias peligrosas manipuladas en los Laboratorios de Toxicología-Farmacología y Química Orgánica de la Escuela de Bioanálisis, en la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Carabobo, basado en la Normativa Ambiental Vigente. La investigación fue de tipo documental y de campo, empleando como herramientas de recolección de datos, entrevistas, encuestas y visitas a los sitios de estudio. Se clasificaron las sustancias empleadas en las prácticas según su nivel de peligrosidad, y se caracterizaron los efluentes evaluando parámetros físico-químicos como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), cloruros, sulfatos y nitrógeno total. Luego de la recolección de datos se evidenció que todos los vertidos son desechados sin tratamientos previos al desagüe y que los mismo no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por el Decreto N° 3219. Finalmente se propone la aplicación de un plan que incluye el acondicionamiento de los laboratorios y del depósito de desechos, la realización de etiquetas y hojas de seguridad para las sustancias químicas, el manejo de contabilidad para las sustancias y la incineración de los desechos.

Palabras claves: desechos; incineración; sulfatos; normativa; demanda bioquímica de oxígeno.

Recibido: septiembre 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

Las sustancias químicas forman parte integral de la vida y de todo lo que la rodea. Es indudable que sus usos conllevan a beneficios, y se emplean en prácticamente todos los ámbitos de la actividad humana. Sin embargo, bajo ciertas condiciones

de exposición y de manejo inadecuado, estas sustancias pueden representar riesgos importantes para el ambiente y para la salud humana. El manejo adecuado de estas sustancias es un tema de por sí complejo a escala global. Además, cada país se enfrenta a desafíos particulares relacionados con su nivel de desarrollo, la dificultad de diseñar y aplicar normas es un tema complicado así como la falta de información y de capacitación de la población sobre la peligrosidad de dichas sustancias [1].

En este mismo orden de ideas, Ferro *et al* [2] exponen que el desarrollo industrial y el empleo de tecnologías y sustancias químicas potencialmente

*Autor para correspondencia: C. De Sousa cdesousa@uc.edu.ve

peligrosas han generado diferentes tipos de contaminación ambiental, lo que ha provocado efectos negativos sobre la salud y el medio ambiente, razón por la cual actualmente, organizaciones y empresas prestan una mayor atención a la regulación y el control de estas sustancias, así como también de los desechos tóxicos, persistentes y bioacumulables que pudieran contribuir a un mayor deterioro del entorno. En respuesta a la creciente preocupación que supone el empleo o generación de estos compuestos, a nivel internacional se han establecido un conjunto de medidas orientadas a la reducción y/o eliminación de las liberaciones de productos químicos tóxicos, incluyendo el desarrollo de planes de acción nacionales, dirigidos a la identificación y aplicación de alternativas de solución.

Venezuela no escapa de la contaminación, la cual ha generado daños perjudiciales para el medio ambiente, siendo uno de ellos el manejo inadecuado de los residuos sólidos. Estos pueden presentar una serie de características reactivas, inflamables, corrosivas, biológicas y algunas otras netamente dañinas para la población, que en cantidades o concentraciones elevadas pueden causar un gran impacto a la salud y al medio ambiente. Los materiales peligrosos son actualmente un tema fundamental y urgente para todos los que están interesados en la seguridad de los seres humanos. Podemos considerar un material peligroso, a toda sustancia capaz de producir un daño a la salud de los seres vivos o para el medio ambiente. A diferencia de lo que ocurría hasta hace algún tiempo, estos materiales son producidos, utilizados, transportados, almacenados y expendidos no sólo en las grandes industrias especializadas, sino también en pequeñas empresas, en el comercio, en instituciones educativas e incluso en el ámbito doméstico.

Tal como ya se ha mencionado, la problemática ambiental es una realidad de la cual no se escapa ningún ciudadano del mundo, ya que sus daños a afectado y seguirá afectando a la población mundial mientras no se busque soluciones definitivas para estos problemas, entre los mayores agravantes para tal situación tenemos los materiales y desechos peligrosos, los cuales al no recibir un tratamiento

eficaz de acuerdo a su naturaleza pueden generar daños a los cuerpos de aire, suelo, agua y en general a los seres humanos. Enfocados en este impacto es netamente necesario el estudio y evaluación a profundidad de los desechos producidos en las actividades industriales y educativas. En Venezuela existen normativas legales para la regulación de sustancias peligrosas como lo son los Decretos 2635 (Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos) [3], Decreto 883 (Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos) [4] y Ley 55 (Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos) [5], estos suministran directrices para el manejo y almacenaje adecuado de mencionados desechos.

Como parte del alcance del fenómeno ambiental el Estado Carabobo no escapa de esta situación, producto de la existencia de uno de los más grandes sectores industriales que posee Venezuela, los cuales generan desechos peligrosos en sus actividades. Así lo confirman investigaciones realizadas en el Instituto de Estudios Superiores de Administración (IESA), estas afirman que empresas de la región carabobeña tienen almacenadas un aproximado de 24.600 toneladas de desechos peligrosos en tambores dispuestos en terrenos de su propiedad, sin embargo “se presume” que esta cantidad puede ser superior. Tal situación hace constar la ausencia de lugares técnicamente adecuados para el manejo y almacenaje de estos desechos, así como insuficientes empresas que dominen métodos o estrategias para su disposición final. Así mismo vale la pena destacar, que algunas organizaciones del sector industrial vierten inmensas cantidades de productos contaminantes a los ríos, lagos y mares posiblemente ignorando el gran daño que causan a la población en general [6].

En el mismo orden de ideas específicamente en el Municipio Naguanagua perteneciente al Estado Carabobo, la Universidad de Carabobo en los distintos laboratorios de las diferentes facultades, al igual que otras organizaciones educativas presentes en la región carabobeña, dentro de sus procesos inherentes a la planificación del desarrollo de sus actividades académicas, manejan una serie

de sustancias peligrosas. Muchas de las prácticas experimentales realizadas en la mencionada casa de estudio, generan variados desechos dentro de los cuales, se hallan aquellos considerados como peligrosos, por sus efectos hacia el medio ambiente y en consecuencia a los seres vivos, por tal razón el manejo correcto de dichas sustancias ayudaría a disminuir el impacto ambiental.

Por lo expuesto anteriormente ha surgido la necesidad de realizar el diagnóstico en las áreas educativas referentes a la Universidad de Carabobo, lo cual ha generado investigaciones en algunos laboratorios de las diferentes facultades de esta casa de estudio, entre las cuales podemos mencionar la de Blanco y Travieso [7], que exponen una propuesta para mejorar el manejo de sustancias peligrosas en los laboratorios del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencia y Tecnología; así como también la de López y Urbina [8], pero en las áreas clínicas de Imagenología y Endodoncia de la Facultad de Odontología.

Tomando en cuenta las debilidades observadas en cuanto al manejo y disposición final de sustancias peligrosas en los diversos Laboratorios de Docencia e Investigación en nuestra casa de estudios, surgió la de Diseñar un Plan para el Manejo Adecuado de Sustancias Peligrosas, en la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud, específicamente en los Laboratorios de Toxicología–Farmacología y Química Orgánica, ya que éstos son los que generan mayor número de desechos peligrosos; además de que no cuentan con un control para las sustancias que se emplean a diario, y los residuos generados son envasados y almacenados, y otros simplemente vertidos en los desagües sin ningún control previo.

Por lo tanto, luego de una revisión en los Laboratorios de Toxicología–Farmacología y Química Orgánica de la Escuela de Bioanálisis, nace la necesidad de incorporar una metodología precisa que garantice la organización para el manejo, almacenaje y la disposición final de sustancias peligrosas. Por lo que esta investigación tuvo como objetivo general el Diseño de un Plan de Manejo de las Sustancias Peligrosas en los laboratorios mencionados anteriormente, con la finalidad de que con su aplicación se

disminuya el impacto al medio ambiente, basado primordialmente en el adecuado almacenamiento, manipulación y disposición final de las sustancias químicas usadas.

Para la ejecución de este trabajo de investigación, en primera instancia se realizó un diagnóstico del manejo de las sustancias químicas y desechos generados mediante la realización de entrevistas a los estudiantes, profesores y personal técnico, posteriormente se clasificaron las sustancias químicas que se utilizan en los laboratorios, según los niveles de riesgo tal como lo establece la Normativa Ambiental Vigente. Luego se realizó la caracterización los vertidos que se generan en las diferentes actividades de los laboratorios, determinando parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), cloruros, sulfatos y nitrógeno total. Seguidamente se efectuó la propuesta de métodos de recuperación de los materiales peligrosos de acuerdo a la normativa que rige la materia. De manera consecuente se diseñó el plan de manejo, haciendo una comparación entre la situación deseada y la actual de las condiciones, basado primordialmente en el Decreto N° 2635 y la Ley N° 55, Ley Sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos. Por último se estimaron los costos derivados de la implementación del plan de manejo diseñado, que abarca la realización de hojas de seguridad y etiquetado, adquisición de estantería, acondicionamiento del depósito de desechos, adquisición de equipos de protección personal y los costos de incineración de desechos.

2. Metodología

2.1. Diagnóstico

La fase de diagnóstico del manejo de las sustancias químicas y desechos generados en las actividades realizadas en los laboratorios será tratado a continuación.

Esta fase consistió en visitar a los laboratorios de Toxicología–Farmacología y Química Orgánica de la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud, efectuándose un chequeo del manejo de las sustancias químicas y los distintos desechos generados de acuerdo a las prácticas realizadas,

además de un recorrido por el depósito de desechos. Mediante la realización de entrevistas a los técnicos y profesores se obtuvo mayor información sobre la problemática existente.

Se aplicó una encuesta a profesores, técnicos y estudiantes que hacen vida en los laboratorios, a modo de profundizar un poco más en el diagnóstico de las condiciones de trabajo; se emplearon dos (2) cuestionarios, uno (1) para los profesores y personal técnico que constó de doce (12) preguntas y otro para los estudiantes de nueve (9) preguntas, ambos con dos (2) modalidades de respuestas de tipo dicotómicas. En el laboratorio de Toxicología-Farmacología se tiene un total de ciento veinte (120) estudiantes, 3 profesores y 2 técnicos; mientras que en el laboratorio de Química Orgánica se tiene un total de 300 estudiantes, 7 profesores y 2 técnicos. La muestra en el laboratorio de Farmacología-Toxicología fue de 42 personas y en el laboratorio de Química Orgánica de 54, y se calcularon mediante el uso de la Ecuación 1

$$n = \frac{N \cdot P \cdot Q \cdot Z^2}{P \cdot Q \cdot Z^2 + E^2 \cdot (N + 1)}, \quad (1)$$

donde:

n : tamaño de la muestra;

N : tamaño de la población;

P : variabilidad positiva (0,50);

Q : variabilidad negativa (0,50);

Z : nivel de confianza (1,64) y

E : precisión o error (0,1) [9].

2.2. Clasificación

En esta fase fueron clasificadas las sustancias químicas utilizadas en los laboratorios, según los niveles de riesgo.

Se procedió a realizar un inventario para todas las sustancias presentes en ambos laboratorios. Posteriormente se documentaron las sustancias químicas que se utilizan en cada práctica, y se clasificaron de acuerdo a sus características de peligrosidad demostrada mediante el rombo de seguridad, número de CAS y el número de código de las naciones unidas (ONU).

2.3. Caracterización

Los vertidos generados en los laboratorios fueron caracterizados en esta etapa.

Se realizaron entrevistas con los profesores y técnicos en ambos laboratorios con el fin de saber cuántas prácticas, nombre de las mismas y la disposición final de los desechos en cada una de ellas, para así determinar los parámetros analizar. Con la información recolectada se determinó que todos los desechos son descartados por el desagüe. El método de recolección utilizado en cada laboratorio, se realizó según la Norma COVENIN 2709:02 (Guías para técnicas de muestreo) [10]. La toma de muestra se realizó a través de recipientes plásticos donde los estudiantes fueron descartando los desechos líquidos.

En el laboratorio de Farmacología-Toxicología se realizaron un total de 7 prácticas, las muestras fueron trasladadas al Centro de Investigación Microbiológicas Aplicadas de la Universidad de Carabobo (CIMA-UC) y refrigeradas hasta obtener la totalidad de todas las muestras, con la finalidad de tener una muestra mixta o compuesta. Se realizó un estudio de los reactivos utilizados en cada práctica para determinar los parámetros fisicoquímicos a analizar, los cuales son: DQO (Demanda Química de Oxígeno), Cloruros, Nitrógeno y sulfatos. En cuanto al Laboratorio de Química Orgánica se realizaron un total de 3 prácticas, donde se ejecutó un procedimiento similar al realizado en el laboratorio anterior, tomándose de igual forma una muestra mixta, donde el parámetro escogido fue la DQO (Demanda Química de Oxígeno); a excepción de la práctica de aldehídos y cetonas, la cual por contener materia orgánica que puede ser biodegradada por microorganismos, se procedió a realizar los análisis de DQO (Demanda Química de Oxígeno), seguido de una DBO (Demanda Biológica de Oxígeno). Una vez culminados los estudios se procedió a comparar los resultados con los que establece el Decreto 3219, mediante el cual dictan las “Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia” [11].

2.4. La propuesta

La propuesta de métodos de recuperación de los materiales peligrosos fue realizada en esta fase.

Luego de efectuar varias visitas a las actividades prácticas realizadas en los laboratorios

en estudio, se evidenció que todos los residuos eran descartados al desagüe. Por lo tanto se propone la utilización de métodos que permitan la recuperación de reactivos o en otros casos la neutralización de algunos otros y de esta forma disminuir el impacto ambiental. Los métodos a proponer son:

- **Biorremediación:** Es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (bacterias, hongos y levaduras), para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, y por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas. También se puede definir como un grupo de tratamientos, contra la contaminación de un medio, que aplica sistemas biológicos para catalizar la destrucción o transformación de compuestos químicos en otros menos tóxicos. Estos microorganismos utilizan su potencial enzimático para mineralizar los compuestos contaminantes o degradarlos hasta productos intermedios, en un ambiente aerobio o anaerobio [12].
- **Destilación:** Es el proceso de separar las distintas sustancias que componen una mezcla líquida mediante vaporización y condensación. Dichas sustancias se separan aprovechando los diferentes puntos de ebullición de cada, ya éste es una propiedad intensiva de cada sustancia. Se propone emplear dos tipos destilación
 1. **Destilación simple:** Se utiliza cuando la mezcla de productos líquidos a destilar contiene únicamente una sustancia volátil, o bien, cuando ésta contiene más de una sustancia volátil, pero el punto de ebullición del líquido más volátil difiere del punto de ebullición de los otros componentes en al menos 80 °C.
 2. **Destilación fraccionada:** Se utiliza para separar mezclas (generalmente homogéneas) de líquidos mediante el calor, y con un amplio intercambio calorífico y másico entre vapores y líquidos. Se emplea cuando es necesario separar

soluciones de sustancias con puntos de ebullición distintos pero cercanos [13].

- **Incineración:** Es un proceso de tratamiento de residuos que implica la combustión completa de sustancias orgánicas contenidas en los materiales de desecho. La incineración convierte la basura en cenizas, gases de combustión y calor. La ceniza es en su mayoría formada por los componentes inorgánicos de los residuos, y puede tomar la forma de grumos o partículas sólidas transportadas por los gases de combustión. Los gases de combustión se deben limpiar de gases y partículas contaminantes antes de que se dispersen en la atmósfera. En algunos casos, el calor generado por la incineración puede ser utilizado para generar energía eléctrica [14].






2.5. Diseño del Plan de manejo

Mediante una revisión documental y apoyándose en la Normativa Ambiental Vigente, se procedió a realizar el diseño del plan de manejo de las sustancias químicas y de los desechos, primeramente efectuando un análisis comparativo mediante el uso de tablas para seccionar las condiciones actuales y las deseadas en lo que respecta a los escenarios

- a) acondicionamiento del área de trabajo;
- b) almacenamiento de sustancias químicas;
- c) etiquetado de los envases y hojas de seguridad;
- d) inventario de las sustancias químicas en uso, ubicadas en el almacén y en depósito
- e) normas de protección personal para los estudiantes, profesores y personal técnico; y por último
- f) depósito de desecho.

Al realizar un estudio comparativo se justifica la aplicación de esta propuesta, asegurando así el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, el resguardo de la seguridad del personal técnico, docente y de los estudiantes, además de la armonía con el medio ambiente.

Tabla 1: Características de algunas de las Sustancias Químicas utilizadas en el laboratorio de Toxicología-Farmacología en la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud

Sustancia	Fórmula	Número CAS	Rombo de seguridad	N° de código de las Naciones Unidas
Acetona	CH_3COCH_3	67-64-1		1090
Ácido acético	CH_3COOH	64-19-7		2798
Ácido clorhídrico	HCl	7647-01-0		1789
Anhídrido acético	$\text{CH}_3\text{COOCOCH}_3$	108-24-7		1715
Cloroformo	CHCl_3	67-66-3		1888






3. Resultados y discusión

3.1. Diagnóstico del manejo de las sustancias químicas y desechos generados en las actividades realizadas en los laboratorios

Una vez analizados los resultados de las encuestas aplicadas a los profesores, técnicos y estudiantes, se obtiene que

1. Los profesores y técnicos consideran que el manejo de sustancias peligrosas no es óptimo en el laboratorio y que las condiciones ambientales en las que se labora no son aptas para la salud, a su vez, disponen de un inventario de sustancias manejadas en el laboratorio. En el mismo orden de ideas, todos consideraron que si conocen las normas y leyes que rigen la materia ambiental referente al manejo de desechos peligrosos.
2. Tanto el personal técnico y docente, así como los estudiantes indicaron que si existen las hojas de seguridad de los reactivos con los cuales trabajan. De igual manera el personal que labora en los laboratorios en estudio expuso que no poseen las planillas de registro para el control de entrada y salida de sustancias al laboratorio.
3. Tanto técnicos, docentes como estudiantes indicaron que si usan el equipo de seguridad adecuado para la realización de las prácticas. De igual manera consideran que el desecho inadecuado de sustancias peligrosas genera un daño al ambiente, y que en los laboratorios no existe una medida de reutilización de los desechos.
4. Docentes, técnicos y estudiantes afirman que los desechos de sustancias peligrosas generan un daño a su salud, y en caso de tener

Tabla 2: Características de algunas de las Sustancias Químicas utilizadas en el laboratorio de Química Orgánica en la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud

Sustancia	Fórmula	Número CAS	Rombo de seguridad	N° de código de las Naciones Unidas
Ácido nítrico	HNO ₃	7697-37-2		2031
Amoníaco	NH ₃	7664-41-7		1005
Anilina	C ₆ H ₇ N	62-53-3		1547
Benceno	C ₆ H ₆	71-43-2		1114
Diclorometano	CH ₂ Cl ₂	75-09-2		1593

un plan de manejo de sustancias peligrosas, estarían dispuestos a colaborar con la puesta en práctica del mismo

3.2. Clasificación de las sustancias químicas utilizadas en los laboratorios, según los niveles de riesgo

En esta fase de la investigación se clasificaron todas las sustancias químicas orgánicas e inorgánicas que se utilizan en las prácticas de ambos laboratorios. En dicha clasificación se indica el número de cas, rombo de seguridad y el número de las naciones unidas. Las Tablas 1 y 2 muestran algunas de las sustancias que se emplean en los laboratorios de estudio.

3.3. Caracterización de los vertidos generados en los laboratorios

En esta etapa se procedió a la toma de muestras (desechos líquidos que son vertidos por el desagüe)

Tabla 3: Resultados de la caracterización de los efluentes del Laboratorio de Farmacología-Toxicología

Parámetros	Valores Obtenidos (ppm)
DQO	25.000
Cloruros	2.630
Nitrógeno Total	4.367
Sulfatos	19,6

de los laboratorios en estudio, tal como lo dicta la Norma COVENIN 2709:02, para su análisis en el CIMA-UC, donde fue analizada una sola muestra mixta o compuesta para el estudio de los parámetros de interés. Una vez obtenidos los resultados se realizó la comparación con lo establecido en el Decreto 3219, donde se dictan las Normas para la Clasificación y el Control de

Tabla 4: Resultados de la caracterización de los efluentes del Laboratorio de Química Orgánica

Parámetros	Valores Obtenidos (ppm)
DQO _{Total}	544.000
DQO	8.140
DBO _{5,20°C}	3.700

la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia. Los resultados se muestran en las Tablas 3 y 4.

Al comparar los resultados obtenidos con los indicados en el Decreto, se evidencia que el valor del DQO (Demanda Química de Oxígeno) está muy elevado, ya que el límite máximo permitido es de 350. En cuanto a los cloruros el valor máximo es de 1.000 ppm y el obtenido fue 2.630 ppm, observándose que tampoco se encuentra dentro del límite permitido. Siguiendo el mismo orden de ideas para el Nitrógeno Total, el valor máximo permitido es 10 ppm y el obtenido es 4.367 ppm, comprobando que no cumple con lo establecido en el Decreto; y por último sabiendo que el límite máximo permitido para sulfatos es de 600 ppm y el obtenido fue de 19,6 ppm, se evidencia que éste si se encuentra dentro del parámetro establecido por la ley.

En el laboratorio de Química Orgánica se realizó: una DQO_{Total} (Demanda Química de Oxígeno) proveniente de la mezcla mixta o compuesta, DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO_{5,20°C} (Demanda Bioquímica de Oxígeno) de la práctica de “aldehídos y cetonas”, puesto que de las prácticas realizadas, ésta es la que contenía materia orgánica que puede ser degradada por los microorganismos. En la Tabla 4, se puede observar que el DQO_{Total} y DQO es de 544.000 ppm y 8.140 ppm respectivamente, esto quiere decir que no cumple con lo establecido en el Decreto 3219, y el DBO_{5,20°C} es de 3.700 ppm por lo cual tampoco cumple con lo establecido en la normativa ambiental vigente.

3.4. *Proposición de métodos de recuperación de los materiales peligrosos*

Mediante una revisión de campo se evidenció que los Laboratorios de Toxicología-Farmacología y Química Orgánica en la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Carabobo, no cuentan con métodos de recuperación para ninguno de los desechos químicos que se generan. Fundamentados en el método de incineración como principal propuesta para los desechos generados en los laboratorios en estudio, se recomienda una recolección semestral o anual de las prácticas, donde los desechos serán envasados y clasificados como orgánicos (fase orgánica) e inorgánicos (fase acuosa) previo a una extracción líquido-líquido. A la fase orgánica se le realiza destilación fraccionada y la acuosa se incinera o aplica técnicas de biorremediación. Cabe mencionar que estas fases serán mezclas mixtas o compuestas de todas las prácticas en cada laboratorio.

3.5. *Plan de manejo de las sustancias químicas y de los desechos*

3.5.1. *Acondicionamiento del área de trabajo*

a. *Condiciones actuales.* Ambos laboratorios poseen deficiencias en cuanto a condiciones del área de trabajo, en las cuales podemos mencionar insuficiente ventilación, campanas extractoras con poca eficiencia, mala distribución general de equipos, materiales de trabajo y sustancias químicas, y el piso de granito tiende a ser un poco resbaloso.

b. *Condiciones deseadas.*

- Cumplir y hacer cumplir las normas básicas de permanencia en un laboratorio químico, enfocado principalmente en el comportamiento de quienes hacen vida en los mismos.
- Perfecta iluminación.
- Limpieza general del laboratorio
- Campanas extractoras en funcionamiento, y además que las mismas no sean usadas para almacenar productos químicos ya que esto

produce problemas en la ventilación de la cabina.

- Ventilación continua mediante la colocación de ventanas en sitios estratégicos.
- Orden para la distribución de equipos, generando mayor facilidad en cuanto a la manipulación durante las jornadas de trabajo.
- Diseño de depósitos de almacenamiento basando su estructuración en lo establecido por la Normativa Ambiental Vigente Decreto N°2635, Título II Capítulo II, artículos 16, 17, 18, 19 y 20.
- Piso anti-resbalante, a fin de evitar accidentes
- Inventariado general de las sustancias químicas presentes.
- Identificación general de las sustancias químicas presentes.

3.5.2. Almacenamiento de sustancias químicas

a. Condiciones actuales. En ambos laboratorios se observaron envases de sustancias químicas en el piso, además de la presencia de estantes afectados por la corrosión, los cuales son utilizados para almacenar reactivos. No poseen un control de almacenamiento o depósito. Hay la presencia de ciertos envases de sustancias en las inmediaciones del laboratorio en general y algunos sin tapas ni etiquetado.

b. Condiciones deseadas. Los productos químicos no deben almacenarse sobre los mesones, ni en el piso, ya que de esta manera se encuentran desprotegidos y expuestos a la participación de una fácil situación de peligro, por lo que se recomienda un área establecida para el almacenamiento dotada de estantería siguiendo los patrones

- La estantería debe poseer bordes adelante y detrás para evitar la caída de frascos.
- Identificar cada renglón de los estantes de modo tal que sea más fácil ubicar mediante el inventariado los envases deseados.

- La estantería debe estar asegurada a un sitio permanente, y ser rígidos que soporten el peso de las sustancias presentes.
- Evitar estantes con exceso de envases y de esta forma lograr el fácil acceso a los frascos requeridos.
- Todos los productos inflamables deben almacenarse en un sitio adecuado para tal, y separados de los ácidos, bases o reactivos oxidantes.

El Decreto N°2635 establece que los materiales peligrosos deben clasificarse según clases variantes entre 1 y 5, por lo que es necesario conocer la clase de las sustancias para su previo almacenaje.

3.5.3. Etiquetado de los envases y hojas de seguridad

a. Condiciones actuales. Los Laboratorios de Toxicología-Farmacología y Química Orgánica no poseen un etiquetado estándar que permita la fácil identificación de las sustancias químicas, ni los niveles de peligrosidad de los mismos, además se observaron ciertos envases sin etiquetado. De igual forma no poseen todas las hojas de seguridad de las sustancias químicas utilizadas en las prácticas ni de las almacenadas.

b. Condiciones deseadas. Así como lo indica el Artículo 17 de la ley N°55 [5], las Normas COVENIN 3059 (2002) [15] y 3060 (2002) [16] explican que toda institución pública o privada que manipule sustancias químicas debe etiquetarlos y envasarlos, además de indicar información referida a identificación de sus componentes, advertencias y riesgos a la salud y al ambiente incluyendo medidas de protección personal, rombo de seguridad, así como procedimientos de primeros auxilios, por lo que se recomienda la creación de etiquetas para cada una de las sustancias almacenadas en los laboratorios y la realización de hojas de seguridad, las cuales a su vez deben estar archivadas en un sitio de fácil acceso en caso de emergencia. Esto debe realizarse para cada una de las sustancias almacenadas en los laboratorios.

3.5.4. Sistema de contabilidad para las sustancias químicas en uso y almacenadas en los laboratorios

a. *Condiciones actuales.* Los Laboratorios de Toxicología-Farmacología y Química Orgánica no poseen un sistema que permita contabilizar la entrada y salida de las sustancias químicas utilizadas durante sus actividades inherentes.

b. *Condiciones deseadas.* Se recomienda llevar una hoja de contabilidad preferiblemente realizada en una hoja de cálculo digital que permita adicionar o sustraer información de cantidades, número y tipo de envases, estado de la materia, número de etiqueta y ubicación para una mejor localización y almacenaje de las sustancias químicas usadas en los laboratorios, la cual sea únicamente manipulada por los profesores y el personal técnico.

3.5.5. Depósito de desechos

a. *Condiciones actuales.* En la Escuela de Bioanálisis de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Carabobo, existe actualmente un depósito de desechos el cual posee sustancias químicas vencidas y algunos desechos de origen químico con tiempos que exceden los permitidos por la Normativa Ambiental Vigente, además este no cuenta con ningún sistema de seguridad para almacenar las mencionadas sustancias.

b. *Condiciones deseadas.* Basado en el Decreto N° 2635 específicamente, Título III, Capítulo II, artículo 40 y Título I, Capítulo II, artículo 8:

- Ningún desecho peligroso puede permanecer más de cinco (5) años en un almacén o sitio de carácter temporal.
- Los desechos deben estar envasados dependiendo de su estado físico y sus características, además de un cierre hermético.
- Los envases deben estar rotulados con la identificación de su proveniencia, fecha de envasado cantidad y símbolo de peligrosidad.
- El sitio de almacén debe estar asilado de sitios de calor y otras fuentes de energía, en zona

no inundable, no expuesta a contingencias como derrumbes, descargas, emisiones u otros vertidos industriales.

- El piso debe ser de material impermeable o impermeabilizado con canales de desagüe que conduzcan a una fosa de retención, si los desechos son almacenados en tambores esto deben estar sobre paletas de maderas.
- Este almacén debe permitir el desplazamiento de personal y movimiento de bomberos.
- Las instalaciones deben tener un sistema de detección y extinción de incendios y kit anti derrames.
- El área debe estar delimitada con señalización de peligro colocada en sitios visibles.
- La ventilación debe ser natural, si es forzada será calculada con base a la característica de los desechos y las condiciones ambientales.
- El área debe estar dotada de un sistema de iluminación, con protección de cortocircuitos y contra la intemperie. Si los desechos o envases son susceptibles al efecto del calor y la lluvia debe contar con sistemas de alarma contra incendios.
- El acceso a este almacén debe estar restringido a personal capacitado y autorizado, debe llevarse un control de entrada y salida de desechos.
- Los desechos incompatibles deben almacenarse en áreas separadas o asiladas físicamente.

El Decreto N°2635 establece que los materiales peligrosos deben clasificarse según clases entre 1 y 5, por lo que es necesario conocer la clase de la sustancias para su previo almacenaje.

3.5.6. Normas de protección personal para los estudiantes, profesores y personal técnicos

a. *Condiciones actuales.* Se observaron deficiencias en lo que a normas de protección personal respecta, evidenciando usos de teléfonos celulares durante las prácticas, zapatos abiertos, cabello

suelto, comportamientos no apropiados, partes del cuerpo descubierta, colocando en riesgo la salud de los alumnos en general, profesores y personal técnico.

b. Condiciones deseadas.

- Los alumnos deben poseer un comportamiento adecuado durante las horas de trabajo.
- Queda terminantemente prohibido el uso de teléfonos celulares o cualquier equipo electrónico que desvíen la atención del estudiante.
- Queda prohibida la ingesta de alimentos y bebidas durante la permanencia en las inmediaciones del laboratorio.
- Es obligatorio el uso de bata, lentes de seguridad y zapatos cerrados durante la permanencia en el laboratorio.
- El cabello siempre debe permanecer recogido.

4. Conclusiones

Finalmente, se puede concluir que los laboratorios en estudio no cuentan con las condiciones de seguridad necesarias para los estudiantes, técnicos y profesores que hacen vida en estos, así como el depósito de desechos no sigue los parámetros establecidos en la Normativa Ambiental Vigente. Por otra parte, los resultados de la DQO y DBO referentes al Laboratorio de Química Orgánica superan los límites permisibles de acuerdo al Decreto 2635; así como también el Laboratorio de Toxicología-Farmacología, excede los valores permisibles en cuanto a la DQO, cloruros y nitrógeno total. El plan de manejo de sustancias químicas garantiza una adecuada manipulación, identificación, transporte y almacenamiento de sustancias basado principalmente en la normativa ambiental que rige la materia. El procedimiento de incineración es el más apropiado como método de disposición final.

5. Referencias

- [1] A. Mendoza and I. Ize Lema. Las sustancias químicas en México. perspectivas para un manejo adecuado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4):719–745, 2017.
- [2] A. Ferro, I. Morales, S. Bárcenas, and González B. Plan de manejo de productos químicos ociosos en campus universitario holguinero. *Ciencias Holguín*, 23(2), 2017.
- [3] Decreto 2635. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Número 5.245 Extraordinario, Caracas, Venezuela, 1998.
- [4] Decreto 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Número 5.021 Extraordinario, Caracas, Venezuela, 1995.
- [5] Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Número 5.554 Extraordinario, Caracas, Venezuela, 2001.
- [6] Edilberto Guevara. Diagnóstico de la situación ambiental y ecológica del estado carabobo. *Revista Ingeniería UC*, 7(1):7–13, 2000.
- [7] M. Blanco and F. Travieso. Propuesta para mejorar el manejo de sustancias peligrosas en los laboratorios del departamento de biología de la facultad de ciencia y tecnología de la universidad de carabobo. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo., Valencia, Venezuela, 2013.
- [8] M. López and E. y Urbina. Propuesta de mejoras para el manejo de sustancias peligrosas en las áreas clínicas de imagenología y endodoncia de la facultad de odontología de la universidad de carabobo. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo., Valencia, Venezuela, 2011.
- [9] R. Walpole, R. Myers, and S. Myers. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Prentice-Hall Hispanoamérica, S.A., México, 6ta edición edition, 1998.
- [10] Aguas naturales, industriales y residuales. guía para la técnica de muestreo. Comisión Venezolana de Normas Industriales 2709. (Norma COVENIN 2709:2002), Caracas, Venezuela, 2002.
- [11] Decreto 3219. Normas para la clasificación y el control de las aguas de la cuenca del lago de valencia. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Número 5.305 Extraordinario, Caracas, Venezuela, 1999.
- [12] EH. González-Rpjas. Concepto y estrategias de biorremediación. *IngeUAN*, 1(1), 2011.
- [13] José Manuel Otero. *Notas para la Historia de la Destilación*. Editorial Tébar Flores, Madrid, 2003.
- [14] Xavier Elías Castells. *Sistemas de tratamiento térmico*.

La incineración: Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 2012.

- [15] Materiales peligrosos. Hoja de datos de seguridad de los materiales (HDSM). 1era Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 3059. (Norma COVENIN 3059:2002), Caracas, Venezuela, 2002.
- [16] Materiales peligrosos. Clasificación, símbolos y dimensiones de señales de identificación. 1era Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 3060. (Norma COVENIN 3060:2002), Caracas, Venezuela, 2002.

Smith Chart *ad hoc* using GNU Octave for didactics purposes

A. J. Zozaya*

Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Tecnológica Israel, Quito, Ecuador

Abstract.- In this paper, for didactic purposes, the classic problem of transmission line matching using a single parallel stub is reviewed altogether with two programs written in GNU Octave, which gradually draw a simplified Smith Chart and on it the curves, circles and points of interest from the matching procedure. The matching network obtained from this method is simulated and the accuracy of results is checked using QucsStudio.

Keywords: Smith chart; single-stub matching; GNU Octave; QucsStudio.

Diagrama de Smith *ad hoc* usando GNU Octave para fines didácticos

Resumen.- En el presente artículo se recrea, para fines didácticos, un ejercicio clásico de adaptación de una línea de transmisión con un *stub* en paralelo acompañado de dos programas escritos en GNU Octave, los cuales paulatinamente trazan una Carta de Smith *ad hoc* simplificada y sobre esta las curvas, círculos y puntos de interés del procedimiento de adaptación. La red de adaptación que se obtiene de este procedimiento se simula usando QucsStudio y se comprueba la exactitud de los resultados.

Palabras claves: carta de Smith; adaptación con un *stub* en paralelo; GNU Octave; QucsStudio.

Recibido: septiembre 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

La carta de Smith es una herramienta gráfica ampliamente utilizada en telecomunicaciones, especialmente en las áreas del conocimiento de diseño de circuitos de comunicaciones, líneas de transmisión, ingeniería de antenas y microondas, inventada en la década de los 30 del siglo pasado, casi simultáneamente, por Mizuhashi Tosaku [1] (1937) y Phillip Hagar Smith [2] (1939).

La carta de Smith permite el cálculo gráfico de numerosos parámetros técnicos de interés cuyo computo analítico comprende operaciones tediosas con números complejos que, si bien en la primera mitad del siglo pasado eran difíciles de llevar a cabo y hoy día con la enorme capacidad de computo de cualquier PC o teléfono inteligente no tanto, mantiene una importante vigencia, formando parte sustancial del currículo de Ingeniería en Telecomunicaciones en todo el mundo.

La comprensión y uso de la carta de Smith por parte de los estudiantes es crucial no solo para resolver problemas de carácter práctico sino también para el aprendizaje de conceptos fundamentales dentro del currículo de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Desde su creación, numerosas iniciativas se han emprendido para facilitar la comprensión de los conceptos subyacentes en la construcción de la varta de Smith y su uso en la solución de problemas prácticos. Se han divulgado códigos en diferentes lenguajes de programación [3, 4, 5] así como cartas de Smith interactivas. De estas, algunas están basadas en la web, como por ejemplo QuickSmith-Web (<https://niyeradori.github.io/QuickSmithWeb/>), Smith Chart Tutorial (<http://www.fourier-series.com/rf-concepts/smith-chart.html>) e *Interactive Smith Chart* de la Universidad Politécnica de Valencia, España (<http://labvirtual.webs.upv.es/flash/frames/smith.html>) [6].

Otras están disponibles en forma de programas autónomos como por ejemplo Smith V4.1 (<http://fritz.dellsperger.net/smith.html>) y SimSmith (http://www.ae6ty.com/Smith_Charts.html).

*Autor para correspondencia: A. J. Zozaya azoza-ya@uisrael.edu.ec

En este artículo, si bien emulamos iniciativas similares [7, 8, 9], proponemos un ejercicio sobre la carta de Smith el cual acompañamos con dos programas escritos en GNU Octave que agregan un enorme valor didáctico a la experiencia facilitando el estudio autónomo de parte del estudiante. Se trata de un ejercicio clásico que es bastante simple y sumamente rico en valor didáctico. Nos referimos al diseño de una red de adaptación usando un stub en paralelo. Con las dos rutinas de acompañamiento escritas en GNU Octave el estudiante, en la medida que sigue el procedimiento de adaptación, puede comprobar la exactitud de sus decisiones observando las salidas de estas rutinas las cuales van dibujando una carta de Smith *ad hoc* con los puntos y curvas de interés. Para reforzar la confianza del estudiante hemos incluido, también, una simulación de la red de adaptación resultante usando QucsStudio.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe analíticamente la carta de Smith y se dan algunos detalles de la primera de las rutinas diseñadas (SmithChartDelgado.m) la cual traza una carta de Smith simplificada cuyo script completo se incluye en el Apéndice 1. En la Sección 3 se describe el procedimiento de adaptación con un stub en paralelo y se desarrolla un ejemplo en el que se muestran los resultados paulatinos que arroja la segunda rutina diseñada (adap1stub.m). No se incluye en este artículo el script de adap1stub.m por razones de espacio pero la misma puede ser compartida via e-mail con cualquier lector interesado. En la Sección 4 se muestran los resultados de simulación de la red de adaptación y en la Sección 5 se concluye.

2. Carta de Smith

La carta de Smith de admitancias e impedancias es una representación 6D de todos los valores posibles de cargas pasivas de una línea de transmisión. Las admitancias e impedancias se conectan con el coeficiente de reflexión dada en la ecuación 1

$$\frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} = \Gamma = \frac{z - 1}{z + 1} \quad (1)$$

donde γ es la admitancia normalizada: $\gamma = Y/Y_0$, Γ es el coeficiente de reflexión, z es la impedancia normalizada: $z = Z/Z_0$, y Y_0 y Z_0 son la admitancia y la impedancia características de la línea de transmisión, respectivamente. Las cantidades γ , Γ y z son complejas:

$$\frac{1 - g - jb}{1 + g + jb} = u + jv = \frac{r + jx - 1}{r + jx + 1} \quad (2)$$

En la ecuación (2) los parámetros g , r , b y x son la conductancia, la resistencia, la susceptancia y la reactancia normalizadas, respectivamente, y u y v son las partes real e imaginaria de Γ .

La ecuación (2) representa dos transformaciones bilineales: una desde el plano de γ y la otra desde el plano de z , ambas hacia el plano complejo de Γ . La manipulación de la ecuación (2) permite obtener las ecuaciones de las familias de los lugares de puntos iso- g , iso- b , iso- r e iso- x siguientes.

La familia de lugares iso- r e iso- x están dadas en las ecuaciones 3 y 4

$$\left(u - \frac{r}{r + 1}\right)^2 + v^2 = \left(\frac{1}{r + 1}\right)^2 \quad (3)$$

$$(u - 1)^2 + \left(v - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (4)$$

La familia de lugares iso- g e iso- b están dadas en las ecuaciones 5 y 6

$$\left(u + \frac{g}{g + 1}\right)^2 + v^2 = \left(\frac{1}{g + 1}\right)^2 \quad (5)$$

$$(u + 1)^2 + \left(v - \frac{1}{b}\right)^2 = \left(\frac{1}{b}\right)^2 \quad (6)$$

El dibujo de cierto número de miembros de estas familias de curvas dentro del círculo de radio unitario del plano complejo de Γ da lugar a la carta de Smith. En la Figura 1 se muestra una carta de Smith de impedancias simplificada obtenida con la función SmithChartDelgado([0 0.5 1 2], [0.5 1 2]) (ver Apéndice 1).

La programación de las ecuaciones de la (3) a la (6) para dibujar una carta de Smith *ad hoc* constituye en si mismo un gran ejercicio didáctico. Esta programación se puede enfrentar de múltiples maneras, siendo clave para ello la

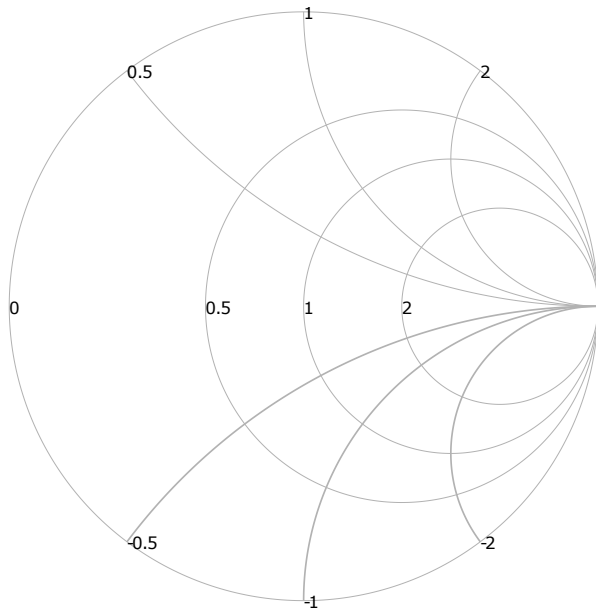


Figura 1: Carta de Smith obtenida con la función SmithChartDelgado([0 0.5 1 2],[0.5 1 2]).

transformación de las ecuaciones (3) a (6) a coordenadas Cartesianas.

Debido a su elegancia y a su carácter analítico, en contraposición con un enfoque numérico, en el presente trabajo hemos preferido las ecuaciones de Delgado [4] para construir nuestra carta de Smith de impedancias *ad hoc*

$$u_r = \frac{\cos \phi_i + r}{1 + r} \quad (7)$$

$$v_r = \frac{\sin \phi_i}{1 + r} \quad (8)$$

$$\phi_i = 0, \dots, 2\pi \quad (9)$$

para trazar un lugar de puntos iso- r determinado; y

$$u_x = 1 + \frac{\cos \theta_i}{x} \quad (10)$$

$$v_x = \frac{\sin \theta_i + 1}{x} \quad (11)$$

$$\theta_i = \theta_1, \dots, \theta_2 \quad (12)$$

para trazar un lugar de puntos iso- x inductiva determinado; donde

$$\theta_1 = \begin{cases} 2\pi - \arccos\left(-\frac{2x}{1+x^2}\right); & \text{si } x < 1 \\ \arccos\left(-\frac{2x}{1+x^2}\right); & \text{si } x \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\theta_2 = \frac{3\pi}{2} \quad (14)$$

Los lugares de puntos iso- x capacitiva se trazan como una imagen especular de los inductivos.

Usando las ecuaciones desde (7) a (14) hemos escrito en GNU Octave la function SmithChartDelgado(r,x) que traza tantas curvas iso- r e iso- x cuanto se indiquen, y cuyo script hemos transcrito en el Apéndice 1 para fines didácticos.

Elementos claves de la carta de Smith:

1. Una carga determinada se puede ubicar sobre la carta de Smith siempre que nos sea dado uno de los siguientes tres parámetros: su coeficiente de reflexión Γ_L , su impedancia Z_L o su admitancia Y_L . Dado uno cualquiera de estos, los restantes se pueden leer directamente sobre la carta de Smith sobre las curvas correspondientes.
2. Si nos es dada la impedancia Z_L , o la admitancia Y_L , la primera se ha de normalizar respecto de $Z_0 = 50 \Omega$, y la segunda respecto de $Y_0 = 20 \text{ mMHos}$.
3. Los puntos de igual módulo de Γ_L yacen sobre un círculo de radio $|\Gamma_L|$ con centro en el origen. Un movimiento desde $z_\ell = Z_L/Z_0$ hacia el generador implica un desplazamiento en sentido horario sobre el círculo iso- $|\Gamma_L|$ correspondiente en la carta de Smith.
4. Los lugares de puntos iso- $|\Gamma_L|$ son también lugares de puntos iso-ROE ya que $\text{ROE} = \frac{1+|\Gamma_L|}{1-|\Gamma_L|}$.

3. Adaptación de impedancias con un stub en paralelo

Hay un problema clásico cuya solución en la carta de Smith permite captar más del 50 % de toda su potencialidad [10, 11, 12]. Se trata de la adaptación de impedancias con un stub en paralelo. La adaptación con un stub en paralelo se prefiere sobre la adaptación con un stub en serie por la mayor dificultad de implementación física que presenta este último en comparación con el primero.

Situación inicial: se tiene una línea de transmisión de impedancia característica Z_0 conectada a una impedancia de carga Z_L , siendo Z_L distinta de Z_0 , como se ilustra en la Figura 2a. En el problema de adaptación con un stub se plantea como meta

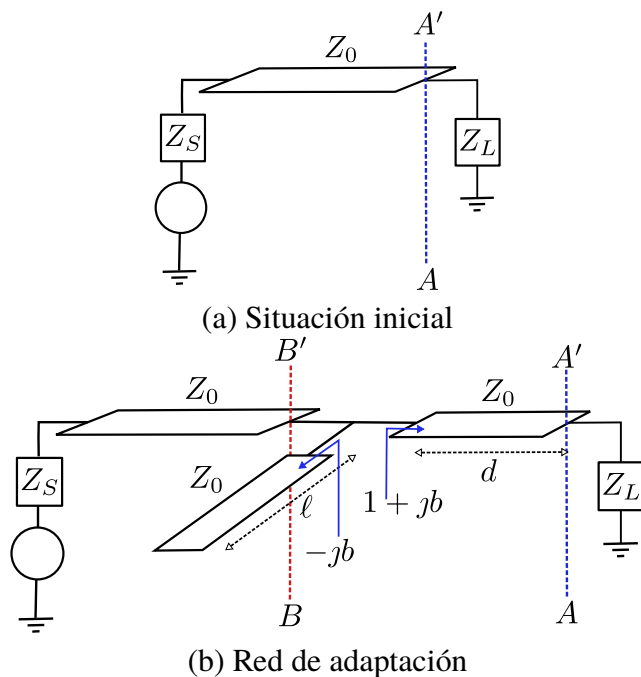


Figura 2: Adaptación con un stub en paralelo.

convertir Z_L en el plano AA' en Z_0 en el plano BB' tal como se muestra en la Figura 2b. Para ello se ha de incorporar una red de adaptación compuesta por un tramo de L. de T. de longitud d en serie y por un stub en paralelo cortado a ℓ unidades de λ , terminado en corto circuito o circuito abierto, según convenga (Figura 2b). La longitud d del tramo de línea se determina de modo que la conductancia normalizada de entrada entrada en d sea unitaria $y_{in}(-d) = 1 + jb_{in}(-d)$. Y la longitud ℓ del stub se fija tal que $y_{in}^{stub}(-\ell) = -b_{in}(-d)$.

Sobre la carta de Smith el procedimiento paso a paso es el siguiente:

1. Dada la impedancia de carga Z_L , esta se normaliza dividiéndola por Z_0 : $z_\ell = \frac{Z_L}{Z_0}$.
2. Se ubica z_ℓ sobre la carta de Smith.
3. Con el compás, haciendo pivote en el centro de la carta, partiendo desde z_ℓ , se traza un arco de circunferencia en sentido horario hasta intersectar el círculo iso- g unitario.
4. En esta intersección $y_{in} = 1 +$ cierta susceptancia b .
5. Esta cierta susceptancia b debe ser «eliminada», por lo que se debe añadir otra, en paralelo,

de polaridad contraria, la cual llamaremos de compensación.

6. La susceptancia de compensación se sintetiza mediante un stub.
7. Aunque por razones de compatibilidad electromagnética se pudiera preferir un stub terminado en corto circuito, aquí procederemos de la siguiente manera:

- a) Si $b < 0$ (susceptancia inductiva) utilizaremos un stub terminado en circuito abierto.
- b) Si $b > 0$ (susceptancia capacitiva) utilizaremos un stub terminado en corto circuito.

Para acompañar al estudiante en la ejecución de este procedimiento se ha escrito un pequeño programa en GNU Octave denominado `adap1stub.m` el cual dibuja paso a paso los distintos círculos, arcos y puntos de interés dando lugar a una carta de Smith simplificada *ad hoc*. Este programa permite al estudiante comprobar la exactitud de sus decisiones en la medida que las toma siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. El lector interesado puede obtener una copia del script solicitándolo por *e-mail* al autor.

3.1. Ejemplo

Se desea adaptar una carga compuesta de una resistencia de 60Ω y un inductor de $L = 1,33\text{nH}$ a una línea de transmisión de $Z_0 = 50\Omega$ a $2,4\text{ GHz}$ usando un stub en paralelo. A continuación se indican los pasos que debe seguir el estudiante en conjunto con las gráficas que `adap1stub.m` va generando en cada instancia.

Paso 1. Se calcula Z_L y se normaliza respecto de $Z_0 = 50\Omega$.

$$Z_L = 60 + j\omega L = 60 + j20\Omega$$

$$z_\ell = \frac{60 + j20}{50} = 1,2 + j0,4$$

Luego se traza z_ℓ sobre la carta de Smith. El programa `adap1stub.m` genera la gráfica que se muestra en la Figura 3.

En la Figura 3 se muestran el círculo de resistencia normalizada iso-1.2, el arco de reactancia

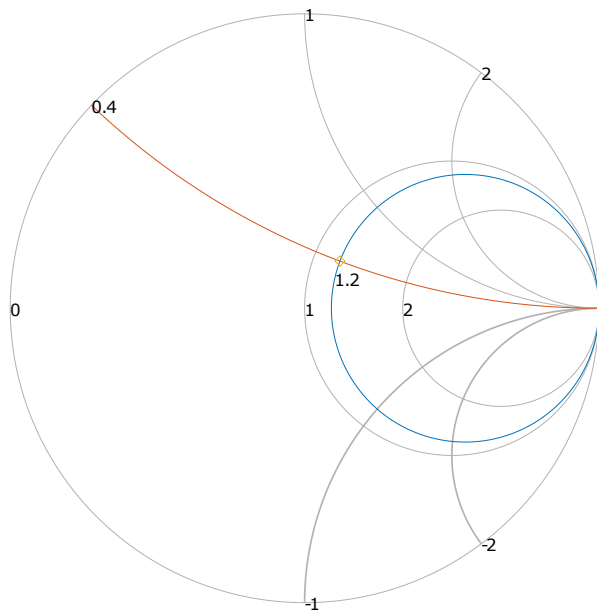


Figura 3: Paso 1: trazado de z_ℓ sobre la carta de Smith.

normalizada iso-0.4 y, en la intersección de estos, z_ℓ .

Paso 2. Nos desplazamos sobre la circunferencia iso- $|\Gamma_L|$ en sentido horario hasta intersectar el círculo de conductancia unitaria iso-1. El programa adap1stub.m devuelve la Figura 4 en este punto.

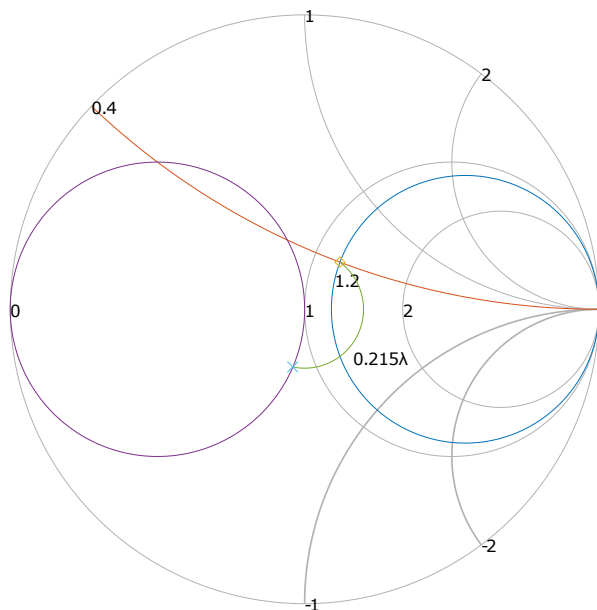


Figura 4: Paso 2: círculo de conductancia unitaria y su intersección con el círculo iso- $|\Gamma_L|$.

En la Figura 4 se muestra el círculo de conductancia unitaria y su intersección con el semicírculo iso- $|\Gamma_L|$. La gráfica generada por adap1stub.m muestra, también, la longitud d de la línea de transmisión que es necesario añadir para ubicarnos en el punto indicado sobre la carta. En este caso se puede leer $d = 0,215\lambda$.

Paso 3. Sobre la carta se lee el valor de $b_{in}(-d) = 0,40844$. En este punto el programa adap1stub.m resalta la curva de $b_{in}(-d)$ tal como se muestra en la Figura 5.

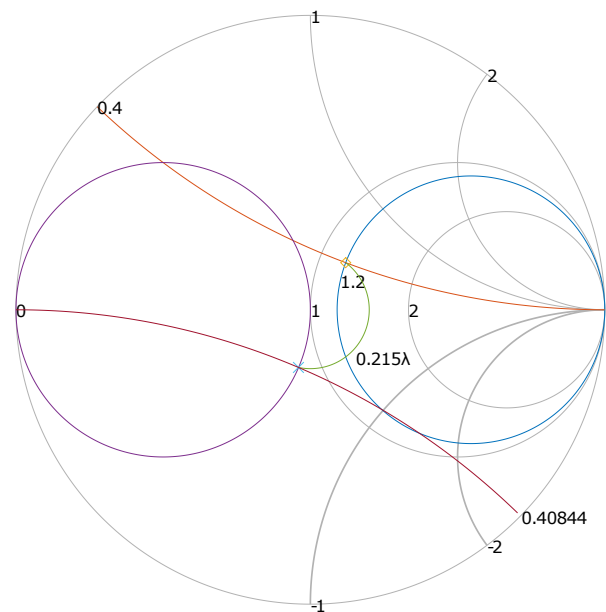


Figura 5: Paso 3: trazado del lugar de puntos de igual $b_{in}(-d)$.

Paso 4. Se ubica sobre la carta tanto el lugar de puntos de igual $-b_{in}(-d) = -0,40844$ como la intersección de este con el círculo de $|\Gamma_L| = 1$. Sobre la escala exterior de la carta de Smith se lee la longitud ℓ del stub en unidades de λ . Al completar este paso el programa adap1stub.m devuelve el diagrama que se muestra en la Figura 6 indicando, además, el valor de ℓ en unidades de λ : $\ell = 0,18829\lambda$.

4. Resultados de simulación con QucsStudio

Como acompañamiento del procedimiento de adaptación con la carta de Smith recomendamos a nuestros estudiantes la comprobación de los

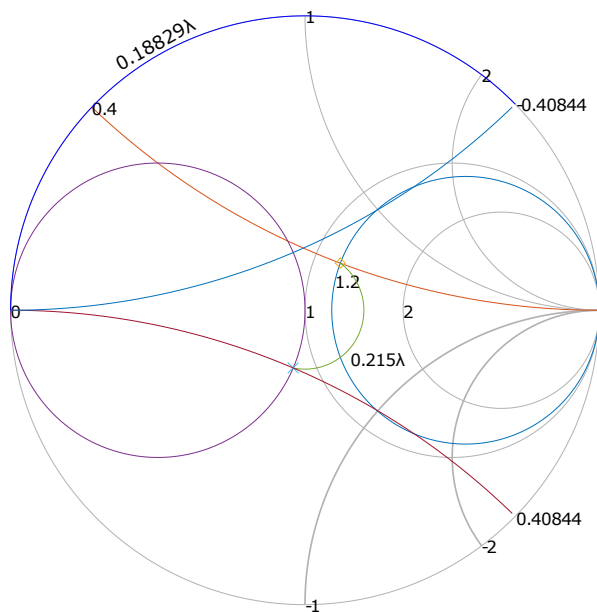


Figura 6: Paso 4: trazado del lugar de puntos de igual $-b_{in}(-d)$ y determinación de la longitud ℓ del stub.

resultados obtenidos mediante la simulación de la red de adaptación usando un software de simulación circuital de distribución gratuita. En este sentido QucsStudio ha demostrado ser de gran utilidad didáctica en nuestros cursos de Líneas de Transmisión y Antenas. QucsStudio es un simulador circuital evolucionado a partir de Qucs de libre distribución y uso, el cual se puede descargar en <http://dd6um.darc.de/QucsStudio/qucsstudio.html>.

Tabla 1: Resumen de los datos y resultados obtenidos en el ejemplo desarrollado en el Apartado 3.1.

Parámetro	Valor
f	2,4 GHz
L	1,33 nH
Z_L	$60 + j2\pi f L$
Z_0	50Ω
d	$0,215 \lambda$
ℓ	$0,18829 \lambda$

Para comprobar la validez de los resultados obtenidos en el apartado anterior, los cuales se resumen en la Tabla 1, se ha recreado en

QucsStudio una réplica del circuito resultante.

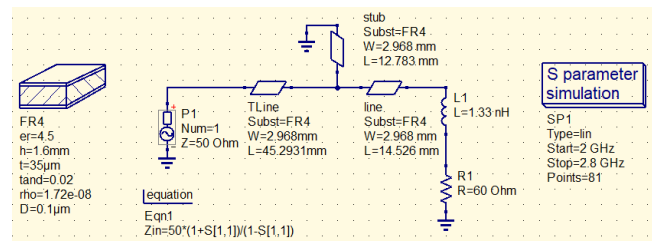


Figura 7: Modelo en QucsStudio del circuito con la red de adaptación diseñada en el Apartado 3.1.

El circuito resultante está compuesto de la carga Z_L , la red de adaptación diseñada en el Apartado 3.1 con la ayuda de la carta de Smith, una línea de transmisión de 50Ω de impedancia característica y un generador con una impedancia de fuente igualmente de 50Ω , tal como se muestra en la Figura 7. Las líneas de transmisión de la Figura 7 han sido diseñadas para un sustrato FR4 usando la herramienta de cálculo correspondiente disponible en el menú de Herramientas de QucsStudio.

Al correr la simulación se han obtenido los resultados que se muestran en la Figura 8.

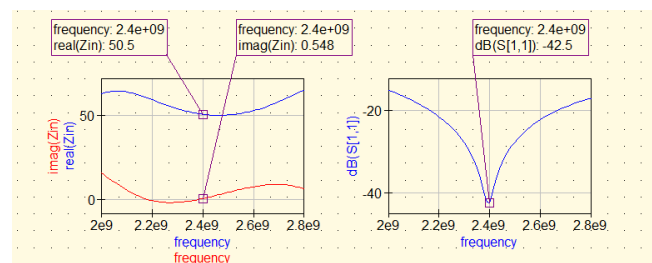


Figura 8: Resultados de simulación de la red de adaptación diseñada en el Apartado 3.1 obtenidos con QucsStudio.

Como se puede apreciar en la Figura 8 los resultados obtenidos concuerdan bastante bien con los esperados validando de esta forma la exactitud del procedimiento gráfico seguido sobre la carta de Smith.

5. Conclusión

Se ha desarrollado un ejercicio clásico de adaptación de una línea de transmisión con un stub

en paralelo. Se han escrito dos programas en GNU Octave de acompañamiento, a saber: `adap1stub.m` y `SmithChartDelgado.m`. Con el primero se puede trazar una carta de Smith *ad hoc* simplificada. Con el segundo las curvas, círculos y puntos de interés del procedimiento de adaptación. Se ha simulado la red de adaptación en QucsStudio comprobando la exactitud de los resultados obtenidos de la aplicación del procedimiento de adaptación. En su conjunto, el material y la información compartida en este documento poseen un importante valor didáctico y facilitarán el estudio autónomo de los estudiantes en el contexto del currículo de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Apéndice 1: Función `SmithChartDelgado.m`

```
function SmithChartDelgado(r,x)
% SmithChartDelgado construye una Carta de Smith
% ad hoc con las curvas iso-r e iso-x segun los
% valores contenidos en los vectores de entrada
% r y x, usando las ecuaciones analíticas
% provistas por (Delgado, 1998)
% r=[0 0.25 0.5 1 2]
% x=[0.25 0.5 1 2]

close all
%% Trazado de las circunferencias iso-r
phi=linspace(0,2*pi,360);
M=length(r);
for m=1:M
clear ur vr;
ur=(cos(phi)+r(m))./(1+r(m));
vr=sin(phi)./(1+r(m));
plot(ur,vr,'b','color',[0.7 0.7 0.7])
text((r(m)-1)./(1+r(m)),0,num2str(r(m)));
axis equal;
axis([-1 1 -1 1]);
box off
axis off
hold on
end

%% Trazado de los arcos de circunferencia iso-x
N=length(x);
theta_2=(3*pi)/2;
for n=1:N
clear u v theta;
if x(n)<1
theta_1=(2*pi)-acos(-(2*x(n))/(1+x(n)^2));
elseif x(n)>=1
theta_1=acos(-(2*x(n))/(1+x(n)^2));
end
theta=linspace(theta_1,theta_2,100);
u=1+cos(theta)./x(n);
v=(sin(theta)+1)./x(n);
plot(u,v,'b','color',[0.7 0.7 0.7],u,-v,'b','color',
[0.7 0.7 0.7],'linewidth',1)
text(1+cos(theta_1)./x(n),
(sin(theta_1)+1)./x(n),num2str(x(n)));
text(1+cos(theta_1)./x(n),-(sin(theta_1)+1)./x(n),
num2str(-x(n)));
end
```

6. Referencias

- [1] T. Mizuhashi. Theory of four-terminal impedance transformation circuit and matching circuit (in japanese). *The Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan*, pages 1053–1058, December 1937.
- [2] P. H. Smith. Transmission line calculator. *Electronics*, 12(1):29–31, January 1939.
- [3] Joseph W. Verzino. Computer Programs for Smith-Chart Solutions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pages 1–2, August 1969.
- [4] Heriberto J. Delgado and Michael H. Thursby. Derivation of the smith chart equations for use with mathcad. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 40(2):99–101, April 1998.
- [5] Fong Mak and Ram Sundaram. A matlab-based teaching of the two-stub smith chart application for electromagnetics class. *38th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, October 2008.
- [6] Francisco Ramos. Interactive smith chart for microwave engineering students. In *2009 EAEEIE Annual Conference*, November 2009.
- [7] Jose R. Pereira and Pedro Pinho. Using modern tools to explain the use of the smith chart. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 52(2):146–150, April 2010.
- [8] José R. Pereira and Pedro Pinho. Bandwidth analysis of a single-stub matching system using the smith chart. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54(6):203–206, December 2012.
- [9] Zhijun Zhang. *Antenna Design for Mobile Devices*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2017.
- [10] B.C. Wadell. Smith charts are easy. i. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2(1):37–40, March 1999.
- [11] B. C. Wadell. Smith charts are easy. ii. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2(2):45–47, June 1999.
- [12] B.C. Wadell. Smith charts are easy. iii. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2(3):38–42, September 1999.

Impedance spectroscopy in water/oil emulsions in a range of intermediate frequencies

José Jorge^{*,a}, Juan Carlos Pereira^c, María Rodríguez^b, Nelson Barrios^c, David Oliva^a, José Antonio Navia^a

^a*Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.*

^b*Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.*

^c*Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD), Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- Impedance spectroscopy is the study of interaction between electromagnetic radiation and matter with absorption or emission of radiant energy; thus making a quick and non-destructive characterization of fluids, such as synthetic emulsions or natural ones (e.g. emulsified crude oil). Heterogeneous mixture composed of two immiscible liquids which differs on its electrical permittivity and conductivity shows a dielectric dispersion process due to interfacial polarization, according to the Maxwell-Wagner effect. In this work, water in oil emulsions (W/O) with 0,5:10, 1,0:10, 1,5:10 ratios are synthesized; complex electrical permittivity and conductivity are obtained in a frequency range from 400 kHz to 4,7 MHz through electrical impedance measurements using an impedance analyzer HP 4193A Vector Impedance Meter and a cell of flat and parallel plates of stainless steel of 40 ml of volume in its interior. The results showed that the real part of the electric permittivity and the conductivity of the emulsions increase with the water content. It is found that the behavior of the permittivity and electrical conductivity of the emulsions agree with Wagner's theory. The micrograph through an optical microscope showed that the droplet size of the emulsions is between 2,3 and 3,0 μm .

Keywords: spectroscopy; impedance; water:oil emulsions; permittivity; conductivity.

Espectroscopia de impedancia en emulsiones agua/aceite en un rango de frecuencias intermedias

Resumen.- La espectroscopia de impedancia es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o emisión de energía radiante, por lo que facilita una caracterización rápida y no destructiva de fluidos como emulsiones sintéticas o naturales v.g. crudos emulsionados. Una mezcla heterogénea compuesta de dos fases líquidas inmiscibles que difieren en la constante dieléctrica y en la conductividad eléctrica muestra un proceso de dispersión dieléctrica debido a la polarización interfacial de acuerdo al efecto Maxwell-Wagner. En este trabajo se sintetizan emulsiones agua en aceite (W/O) con relaciones 0,5:10, 1,0:10 y 1,5:10, para determinar tanto la permitividad eléctrica, como la conductividad eléctrica compleja en un rango de frecuencia entre 400 kHz y 4,7 MHz a partir de medidas de impedancia eléctrica, a través de un analizador de impedancias HP 4193A Vector Impedance Meter y una celda de placas planas y paralelas de acero inoxidable de 40 ml de volumen en su interior. Los resultados obtenidos muestran que la parte real de la permitividad eléctrica y la conductividad de las emulsiones, aumentan con el contenido de agua. Se encuentra que el comportamiento de la permitividad y conductividad eléctrica de las emulsiones concuerdan con la teoría de Wagner. La micrografía a través de un microscopio óptico arrojó que el tamaño de gota de las emulsiones se encuentra entre 2,3 y 3,0 μm .

Palabras claves: espectroscopia; impedancia; emulsiones agua:aceite; permitividad; conductividad.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción.

Las emulsiones son una mezcla entre dos líquidos inmiscibles en los que la fase dispersa consiste de gotas con un tamaño que varía de 0,1 a 100 μm de diámetro, una fase continua y un estabilizador como agente emulsionante. La

* Autor para correspondencia:

Correo-e: josejorgea@gmail.com (José Jorge)

mayoría de las emulsiones tienen una fase acuosa y una fase oleosa. La dispersión que contiene aceite como fase continua y agua como fase dispersa, se denomina emulsión de agua en aceite (W/O).

Las gotas de agua se dispersan en el medio continuo produciendo una interfase, originando el aumento de la energía libre del sistema y conduciendo a un estado termodinámicamente inestable. Por lo tanto, se observa una tendencia a la separación de las fases debido a la coalescencia de las gotas, que provoca una disminución en el área interfacial, reduciendo la energía libre del sistema. Para lograr la estabilidad cinética de la emulsión, es necesario agregar un tercer componente llamado emulsionante. El emulsionante o surfactante es una sustancia química que, en baja concentración (0,5-3 %), tiene la característica de disminuir la tensión interfacial entre las fases de agua y aceite; por lo que, debido a la disminución de la energía interfacial y, considerando que las emulsiones contienen un área interfacial grande, las fuerzas responsables de la coalescencia de las gotas se reducen promoviendo la estabilidad del sistema [1].

La espectroscopia de impedancia facilita una caracterización rápida y no destructiva de fluidos como emulsiones sintéticas o naturales, entre las cuales se encuentran los crudos emulsionados. En la producción de petróleo, la emulsión está constituida por el agua contenida en los yacimientos o por agua inyectada a los pozos por métodos de extracción y recuperación, en cuyo caso la fase de aceite es el crudo. Esta mezcla, al ser bombeada y transportada por tuberías, genera la emulsión. Sin embargo, la emulsión W/O puede generarse durante diferentes procesos como en la recuperación, el transporte y la refinación de petróleo. Las emulsiones se producen cuando el petróleo y el agua se ponen en contacto en presencia de fuerzas de fricción entre la tubería y el fluido, o cuando se inyectan mezclas de vapor de agua en el pozo. Un gran porcentaje de los crudos explotados a nivel mundial están en estado emulsionado [2]. La concentración volumétrica de agua en la producción de petróleo es un parámetro importante que se monitorea constantemente para tener una estimación del contenido neto de la producción de petróleo.

Entre las técnicas de medición de la concentración volumétrica de agua en emulsiones de petróleo se encuentran *Near Infra Red* (NIR) y mediciones de rayos gamma, pero suelen ser muy costosas; sin embargo, los sensores capacitivos son sencillos y económicos, y son frecuentemente usados por diferentes técnicas eléctricas para medir la constante dieléctrica de diferentes materiales, incluidos los fluidos [1]. La espectroscopia de impedancia frecuentemente se emplea en emulsiones de agua en aceite (W/O) para obtener la constante dieléctrica en un rango de 10 mHz a 10 MHz utilizando sensores capacitivos de placas paralelas o cilíndricas.

Se conoce en la literatura que una mezcla heterogénea compuesta de dos fases que difieren en la constante dieléctrica y en la conductividad eléctrica muestran un proceso de dispersión dieléctrica debido a la polarización interfacial. Para partículas esféricas dispersas, con constante dieléctrica ϵ_p y conductividad eléctrica σ_p (S/m) en un medio continuo de constante dieléctrica ϵ_m y conductividad eléctrica σ_m , es posible conocer la permitividad eléctrica compleja y conductividad eléctrica compleja en función de la fracción volumétrica de la fase dispersa, de acuerdo a la Teoría de Wagner. Esta teoría es aplicable a emulsiones W/O en bajas proporciones de la fase dispersa. [3, 4].

La espectroscopia de impedancia consiste en aplicar una diferencia de potencial alterna a una celda, $V(j\omega) = V_0 \exp(j\omega t)$, donde ω es la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ y f la frecuencia en Hz, midiendo las partes real e imaginaria de la corriente $I(j\omega) = I_0 \exp[j(\omega t + \theta)]$ que circula por la celda, con el fin de obtener la impedancia $Z(j\omega)$ a través de la ley de Ohm $Z(j\omega) = V(j\omega) / I(j\omega)$. El espectro de frecuencia se obtiene al cambiar la frecuencia angular. Varios factores intrínsecos al material dentro de la celda, como la composición química, las estructuras moleculares o cristalinas, la homogeneidad, la presencia de portadores de carga y sus tipos, pueden afectar la respuesta del espectro [1].

La permitividad eléctrica compleja es una función de la frecuencia y de la temperatura, se origina en diferentes procesos: (i) fluctuaciones

microscópicas de dipolos moleculares (difusión rotacional), (ii) propagación de los portadores de carga móvil (difusión traslacional de electrones, protones o iones), y (iii) la separación de cargas en las interfases da lugar a una polarización adicional. Esta última puede tener lugar en capas límite dieléctricas internas (polarización Maxwell/Wagner/Sillars) en una escala mesoscópica y/o en los electrodos externos que entran en contacto con la muestra (polarización del electrodo), en una escala macroscópica. Su contribución a la pérdida dieléctrica puede ser de órdenes de magnitud mayor que la respuesta dieléctrica debido a las fluctuaciones moleculares [5].

En este trabajo se realiza un estudio de *espectroscopia de impedancia* en emulsiones W/O con relaciones agua/aceite de 0,5:10, 1,0:10 y 1,5:10. Se determinará la permitividad eléctrica y conductividad eléctrica compleja a partir de las medida de impedancia, en un rango de frecuencia de 400 kHz a 4,7 MHz, usando una celda de electrodos de placas planas y paralelas de acero inoxidable; y se estudia el comportamiento de la permitividad y conductividad eléctrica en función de la fracción volumétrica de agua de las emulsiones.

2. Aspectos teóricos.

La impedancia, permitividad y conductividad eléctrica complejas están descritas por:

$$Z^* = Z' + jZ''$$

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2}$$

$$\varepsilon^* = \frac{1}{j\omega C_o Z} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' = j\omega\varepsilon_0\varepsilon^*$$

Donde, $j = \sqrt{-1}$, ω es la frecuencia angular; Z' y Z'' , ε' y ε'' y σ' y σ'' son la partes reales e imaginarias de la impedancia, permitividad y conductividad eléctrica descritas en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

$$\varepsilon' = \frac{-Z''}{|Z|^2 \omega C_o} \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \frac{Z'}{|Z|^2 \omega C_o} \quad (2)$$

$$\sigma' = \omega\varepsilon_0\varepsilon'' \quad (3)$$

$$\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad (4)$$

Donde $C_o = \frac{\varepsilon_0 A}{t}$ es la capacitancia de la celda con aire, ε_0 es la permitividad en el vacío ($8,854 \times 10^{-12} F/m$), A es el área de sección transversal de las láminas del capacitor, t es la separación entre los electrodos [6].

3. Sección experimental

Emulsiones. Se sintetizaron tres emulsiones con proporciones distintas de agua;aceite. La muestra **A** tiene una proporción agua:aceite de 0,5:10. La muestra **B**, una proporción de 1,0:10 y la muestra **C**, una proporción de 1,5:10 como se muestra en la Tabla 1, donde también se exponen los volúmenes de agua, aceite empleados.

Tabla 1: Preparación de emulsiones fase externa aceite.

	$V_a \pm 0,1$ ml	$V_s \pm 0,1$ ml	$V_o \pm 0,2$ ml	Relación Agua: Aceite
A	5,0	23,8	71,2	0,5:10
B	10,0	22,5	67,5	1,0:10
C	15,0	21,3	63,7	1,5:10

V_a : Volumen de agua. V_s : Volumen de surfactante.
 V_o : Volumen de aceite.

Se utilizó aceite mineral Vassa 9, como fase continua aceite, agua destilada; y como agente emulsificante se utilizó el tensoactivo nonilfenol Etoxilado de 4 moles de óxido de etileno. Se preparó una dispersión de NFE-4 al 4 % v/v en el aceite para su incorporación en la emulsión. Las emulsiones se formaron mediante agitación manual (10 golpes verticales). Se realizó prueba de fase externa resultando todas las emulsiones fase externa aceite.

Equipos. Se utilizó el analizador de impedancia *HP 4193A Vector Impedance Meter*, el cual posee un rango de frecuencia desde 400 kHz a 110 MHz. También se hizo uso de un microscopio óptico

NIKON MED 600 con cámara CCD incluida para la captura de imágenes, con el propósito de determinar el área promedio y diámetro promedio de las gotas de agua.

Celda. La celda consiste en un bloque rectangular de teflón, con un sistema de refrigeración y con electrodos de acero inoxidable en su interior de área $55 \times 105 \text{ mm}^2$ separados por 5,5 mm. La capacidad del condensador C_0 resulta ser 8,79 pF. En la Figura 1 se grafica el módulo de la impedancia del condensador o celda en función de la frecuencia para un rango entre 400 kHz y 10 MHz, la celda se comporta como un condensador ideal hasta una frecuencia de 4,7 MHz. El módulo de la impedancia decae como $1/\omega C_0$ y el ángulo es aproximadamente $-\pi/2$. Por encima de 4,7 MHz el ángulo comienza a disminuir debido a efectos inductivos. Debido a este efecto las medidas realizadas en las emulsiones están comprendidas en ese rango.

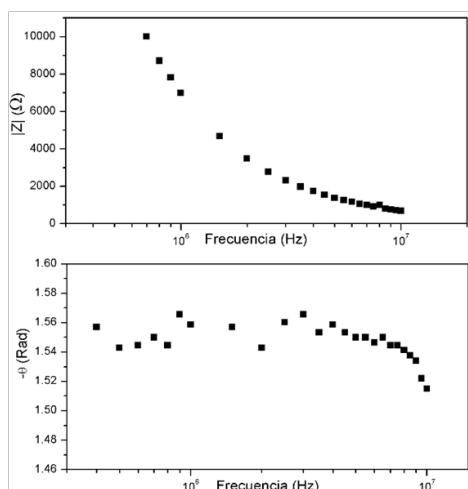


Figura 1: Diagramas de Bode de la celda con aire.

4. Resultados y Análisis.

En las Figuras 2a, 2b y 2c se muestran los diagramas de Bode de las tres muestras en un rango de frecuencias entre los 400 kHz y 4,7 MHz. En las tres gráficas se observa como el módulo de la impedancia disminuye a medida que aumenta la frecuencia y también disminuye con el aumento del volumen de agua; el ángulo de fase aumenta

a medida que aumenta la frecuencia tendiendo a $-\pi/2$, dándole características capacitivas al conjunto celda-fluido.

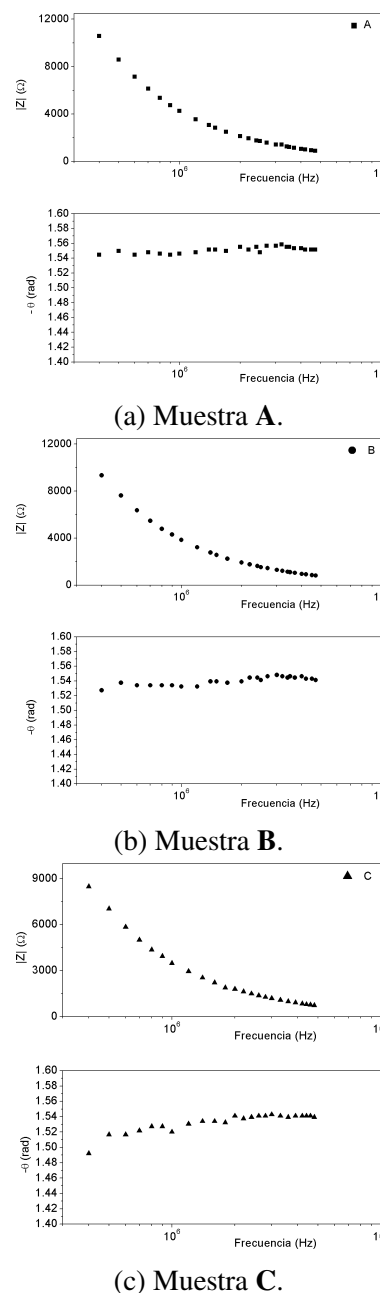


Figura 2: Diagramas de Bode de las muestras A, B y C.

En la Figura 3 se grafica la parte real (ϵ') e imaginaria (ϵ'') de la permitividad eléctrica en función de la frecuencia. Los datos de las gráficas se obtienen a partir de las ecuaciones (1) y (2). La parte real de la permitividad eléctrica de las tres emulsiones presentan un comportamiento

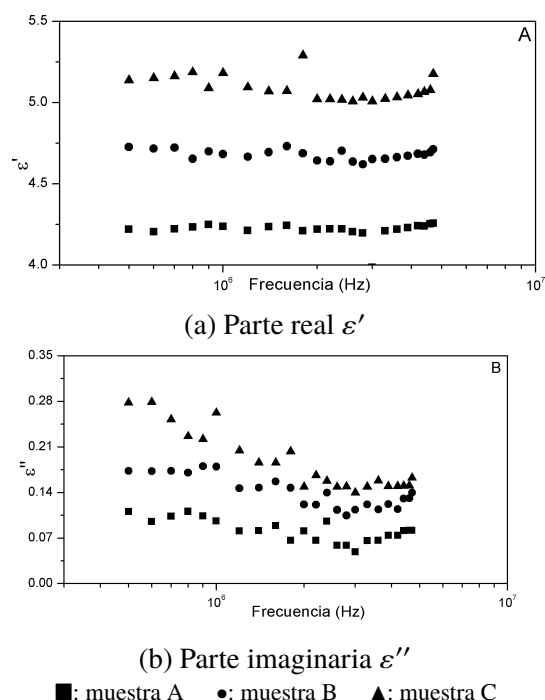


Figura 3: Permitividad eléctrica de las diferentes muestras.

prácticamente constante en todo el rango de frecuencias. Para las muestras A, B y C se obtiene un valor para la parte real de la permitividad eléctrica de alrededor de 4,28, 4,84 y 5,32, respectivamente. Se observa un aumento de (ϵ') con el aumento de la fracción volumétrica de agua.

En la Figura 3b, para las tres muestras se observa un decaimiento de la parte imaginaria de la permitividad eléctrica ϵ'' a medida que aumenta la frecuencia, obteniéndose valores más altos mientras crece la fracción volumétrica de agua.

La polarización dieléctrica describe cómo las cargas, dentro de un dieléctrico, responden a un campo eléctrico aplicado externamente. Las cargas que son libres de moverse en una escala macroscópica son las responsables de la conducción. Si el movimiento de las cargas está restringido, se dice que están polarizadas. La polarización puede ser expresada en términos de la permitividad compleja como la permitividad real ϵ' o constante dieléctrica, y el libre movimiento de cargas está relacionada como la parte imaginaria ϵ'' o pérdida dieléctrica (en inglés, *dielectric loss*). La permitividad eléctrica tiene dos contribuciones

que dependen de la frecuencia.

La dispersión dieléctrica en las emulsiones está caracterizada por un tiempo de relajación $\tau = \epsilon/\sigma$, que surge cuando una densidad de corriente J atraviesa dos medios con permitividad y conductividad eléctrica diferentes o tiempos de relajación diferentes $\tau_p \neq \tau_m$ o $\epsilon_p\sigma_m \neq \epsilon_m\sigma_p$, en estas condiciones se presenta una acumulación de carga en la interfase del material, la cual se conoce como efecto Maxwell-Wagner [7, 3]

Cuando una emulsión se encuentra dentro de un campo eléctrico uniforme establecido por una diferencia de potencial eléctrico que se aplica entre dos electrodos planos y paralelos, las cargas en la interfase y la polarización de las moléculas de agua se agrupan de acuerdo a la ley de Coulomb, en consecuencia, la suma de las fuerzas en las cargas debido al campo eléctrico externo es cero y las gotas de agua no se mueven. Si el campo eléctrico se invierte repentinamente, la polarización de las gotas de agua y las cargas superficiales se redistribuirán con un tiempo de retardo correspondiente al tiempo de relajación $1/\tau$. Este es un tipo de polarización conocida como polarización interfacial [8]. Existe una frecuencia de excitación alrededor de $1/\tau$ donde la contribución a la conductividad debido a la carga interfacial tiene una mayor contribución a la permitividad compleja de la emulsión.

Wagner demostró que, para un sistema de dispersión dieléctrica donde las partículas esféricas están distribuidas en el medio continuo, la permitividad y conductividad eléctrica dependen de la fracción volumétrica de la fase dispersa ϕ y de la frecuencia. Las ecuaciones están descritas en términos de la permitividad y conductividad para los límites de baja (ϵ'_l , σ'_l) y alta frecuencia (ϵ'_h , σ'_h) [3].

En la Tabla 2 se muestran los valores de la parte real de la permitividad eléctrica en el límite de baja y alta frecuencia ϵ'_l y ϵ'_h para las tres emulsiones.

En la Figura 4 se grafican los datos de la Tabla 2; la parte real de la permitividad eléctrica ϵ' para la frecuencia más baja del rango estudiado (400 kHz) ϵ'_l y a alta frecuencia (4,7 MHz) ϵ'_h en función de la fracción volumétrica de agua ϕ . Se observa un aumento de ϵ'_l y ϵ'_h con el aumento de la fracción

Tabla 2: Parte real de la permitividad eléctrica ε_l a 400 kHz y ε_h a 4,7 MHz.

	Proporción agua	ε'_l	ε'_h
A	0,05	4,21	4,25
B	0,10	4,74	4,71
C	0,15	5,32	5,17

volumétrica de agua. Para $\phi = 0,05$ los valores de ε'_l y ε'_h son muy cercanos. Para $\phi = 0,1$ ε'_l es un poco mayor que ε'_h y para $\phi = 0,15$ la diferencia entre ε'_l y ε'_h es aun mayor de acuerdo con la teoría de Wagner [3]. Ésta predice que para bajas fracciones volumétricas de agua menores a 0,2 ε'_l y ε'_h tienen comportamientos similares y a medida que aumenta ϕ , ε'_l crece más rápido que ε'_h . Esto se debe a que la parte real de la permitividad eléctrica disminuye al aumentar la frecuencia, disminuyendo la contribución a la permitividad compleja que se caracteriza frecuentemente con el nombre de constante dieléctrica.

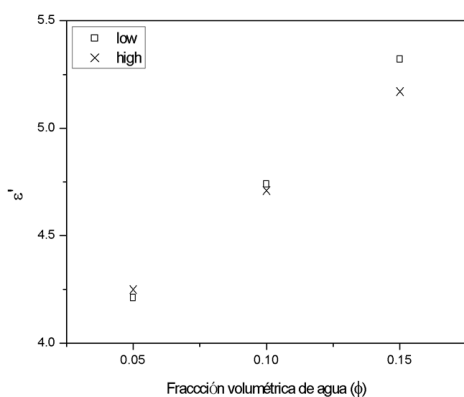


Figura 4: Parte real de la permitividad eléctrica para el límite de baja ε'_l y alta frecuencias ε'_h en función de la fracción volumétrica de agua de las emulsiones.

En la Figura 5 se grafican los datos obtenidos a través de la ecuación (3) para cada una de las emulsiones. Se observa que la conductividad crece a medida que aumenta la frecuencia, siendo mayores los valores de conductividad a medida que aumenta la fracción volumétrica de agua ϕ . En la Figura 6 se grafica la conductividad para los límites de baja σ'_l y alta frecuencia σ'_h . Se observa

como σ'_l y σ'_h aumentan con el incremento de la fracción volumétrica de agua, siendo mayor las conductividades para el límite de alta frecuencia de acuerdo con la teoría de Wagner, la cual predice que para una frecuencia de excitación mayor que $1/\tau$ disminuye la contribución de la permitividad como constante dieléctrica o polarización dieléctrica, y comienzan a tener mayor importancia los efectos conductivos. En la Tabla 3 se muestran los valores de la parte real de la conductividad eléctrica en el límite de baja y alta frecuencia σ'_h y σ'_l de las tres emulsiones [3].

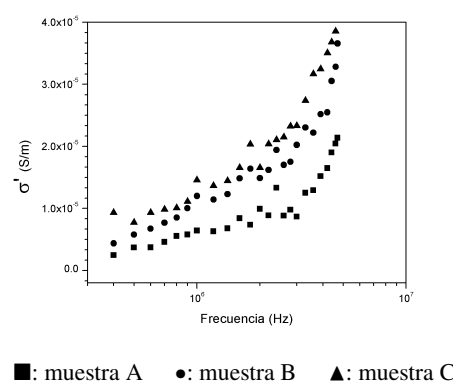


Figura 5: Parte real de la conductividad vs. frecuencia para las tres emulsiones.

Tabla 3: Parte real de la conductividad eléctrica σ'_l para 400 kHz y σ'_h 4,7 MHz.

	Proporción agua	σ'_l (S/m)	σ'_h (S/m)
A	0,05	2.49×10^{-6}	2.14×10^{-5}
B	0,10	4.70×10^{-6}	3.66×10^{-5}
C	0,15	9.32×10^{-6}	4.25×10^{-5}

La Figura 7 muestra una imagen de las tres emulsiones donde se observa claramente círculos de diferentes diámetros correspondientes a las gotas de agua como fase dispersa en el medio continuo. Se observa una distribución de tamaños de gota en las tres emulsiones. De acuerdo a la micromarca, se aprecia que el diámetro de las gotas es menor a 20 μm . Se observa que el tamaño de las gotas se mantiene constante en

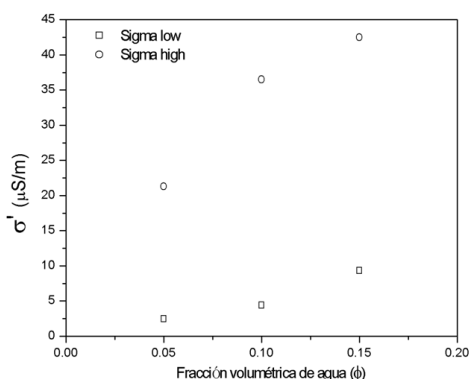


Figura 6: Parte real de la conductividad eléctrica para el límite de baja σ'_l y alta frecuencias σ'_h en función de la fracción volumétrica ϕ de agua de las emulsiones.

las muestras estudiadas, ya que las variaciones encontradas están en $\pm 1 \mu\text{m}$. Las micrografías indican emulsiones normales del tipo agua en aceite (W/O). Se observa ausencia de floculación y de emulsiones múltiples.

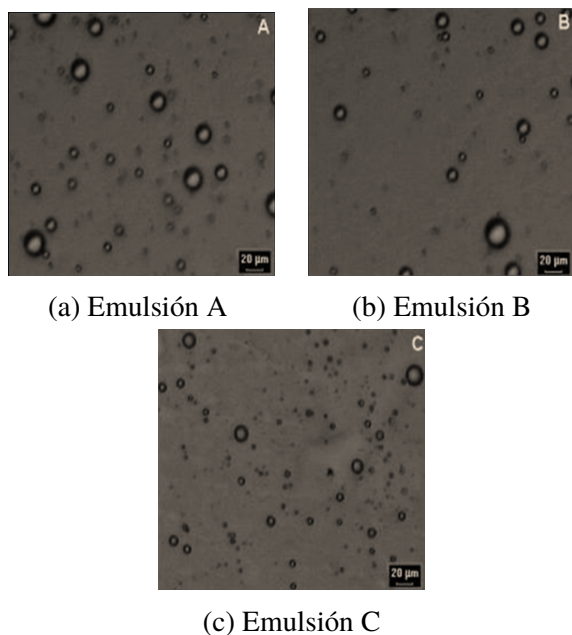


Figura 7: Micrografía de las emulsiones A, B y C.

En la Figura 8 se muestran las distribuciones log-normal del número de gotas en función del área de cada gota. El ancho a media altura de las distribuciones equivale al área promedio de las gotas correspondientes a cada emulsión, con este valor se calculó el diámetro promedio de las gotas.

En la Tabla 4 se reportan los valores del área y diámetro promedio, confirmando lo observado en la Figura 7.

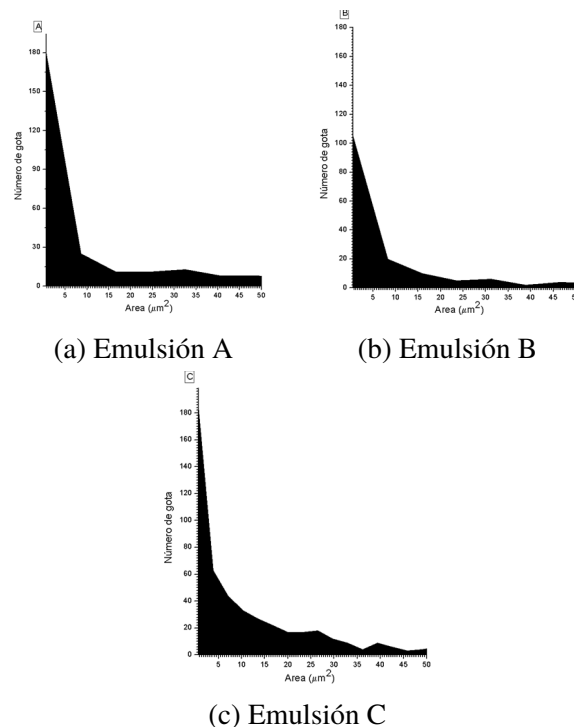


Figura 8: Distribución de gota en las emulsiones A, B y C.

Tabla 4: Área y diámetro promedio de las gotas de agua para cada muestra.

	Área (μm^2)	Diámetro (μm)
A	7,2	3,028
B	5,4	2,622
C	4,0	2,257

5. Conclusiones.

La espectroscopia de impedancia resulta ser un método sencillo y útil para investigar las propiedades eléctricas de emulsiones, en este caso de emulsiones W/O con baja fracción volumétrica de agua. El rango de frecuencias empleado fue determinado de acuerdo a las características del analizador de impedancia *HP 4193A* y de la celda, resultando un rango de 400 kHz a 4,7 MHz. De

acuerdo a las ecuaciones derivadas de la teoría electromagnética en la materia y del concepto de impedancia eléctrica es posible determinar la permitividad y conductividad eléctrica compleja en función de la frecuencia. En el intervalo de frecuencias estudiado, la parte real de la permitividad eléctrica disminuye ligeramente con la frecuencia tendiendo a un comportamiento casi constante y crece con el aumento de fracción volumétrica de agua. La conductividad eléctrica crece con el aumento de la frecuencia de acuerdo al proceso de dispersión dieléctrica debido a la polarización interfacial y también aumenta con la fracción volumétrica de agua. Tanto la parte real de la permitividad eléctrica como la conductividad obtenida a través de medidas de impedancia, empleando un analizador de impedancia y una celda de placas planas y paralelas en el rango de frecuencia estudiado, están en buen acuerdo con la teoría de Wagner. Con las imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico y la distribución log-normal del número de gotas en función del área de cada gota se determinó que el diámetro promedio de las gotas de agua en las emulsiones se encuentra entre 2,3 y 3,0 μm .

6. Referencias

- [1] Matheus Puttinati Casari, Niederauer Mastelari, Eugênio Spano Rosa, Vanessa Cristina Bizotto Guersoni, and Fabiana de Assis Perrechil. Determination of water concentration in water-in-oil emulsions by the impedance spectroscopy method. In *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.
- [2] Ingrid Velásquez and Juan C. Pereira. Emulsiones de agua en crudo. Aspectos generales. *Revista Ingeniería UC*, 21(3):45–54, 2014.
- [3] Tetsuya Hanai. Theory of the dielectric dispersion due to the interfacial polarization and its application to emulsions. *Kolloid-Zeitschrift*, 171(1):23–31, 1960.
- [4] Tetsuya Hanai and Naokazu Koizumi. Dielectric relaxation of w/o emulsions in particular reference to theories of interfacial polarization (commemoration issue dedicated to Professor Eiji Suito on the occasion of his retirement). *Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University*, 53(2):153–160, 1975.
- [5] F. Kremer and A. Schonhals, editors. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [6] Lamia Goual. Impedance spectroscopy of petroleum fluids at low frequency. *Energy & Fuels*, 23(4):2090–2094, 2009.
- [7] Bharat Bhushan, editor. *Encyclopedia of nanotechnology*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2012.
- [8] David J. Bakewell, Nuria Vergara-Irigaray, , and David Holmes. Dielectrophoresis of biomolecules. *JSM Nanotechnology & Nanomedicine*, 1(1):1–14, 2013.

Mechanical behavior model of stainless steel 304 H at high temperature

Franklin Acevedo^{*,a}, Laura Sáenz^b

^aÁrea de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bCentro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- The purpose of this research is to determine the precipitation degree of sigma and chi phases and their effect on the mechanical behavior of stainless steel 304 H with more than 15 years of service. Material verification was carried out using portable equipment for Positive Materials' Identification, a replication study was carried out on the external face of the element studied to measure the degree of precipitation of the sigma and chi phase using optical microscopy and an image analyzer. It evidenced that depending of to increase the presence of intermetallic phases for impact tenacity decreases, transforming stainless steel 304 H into a fragile material, likewise, manufactured components of 304 H that operate at high temperatures with identical service time may have different degrees of precipitation of the sigma and chi phases along it. Finally, it is proposed based on the results of metallographic replicas, a model that allows to predict the impact tenacity of degraded 304H steel in order to define the acceptance or non-acceptance of component in service without requiring destructive tests.

Keywords: stainless steel 304 H; intermetallic phases sigma y chi; embrittlement; impact toughness.

Modelo del comportamiento mecánico de un acero inoxidable 304 H expuesto a elevada temperatura

Resumen.- El propósito de la presente investigación es determinar el grado de precipitación de las fases sigma y chi y su afectación en el comportamiento mecánico del acero inoxidable 304 H con más de 15 años de servicio. Se realizó verificación del material mediante un equipo portátil para la Identificación Positiva del Material, se realizó estudio de replicado en la cara externa del elemento estudiado para medir el grado de precipitación de la fase sigma y chi mediante microscopía óptica y un analizador de imágenes. Se evidenció que en función al aumento de la presencia de fases intermetálicas disminuye la tenacidad de impacto, transformando el acero inoxidable 304 H en un material frágil, así mismo, componentes fabricados de 304 H que operan en elevadas temperaturas con tiempo en servicio idénticos pueden tener diferentes grados de precipitación de las fases sigma y chi a lo largo del mismo. Finalmente, se propone basado en los resultados de réplicas metalográficas, un modelo que permite predecir la tenacidad al impacto del acero 304 H degradado de manera de definir la aceptación o rechazo del componente para el servicio sin requerir realizar pruebas destructivas.

Palabras claves: acero inoxidable grado 304 H; fases intermetálicas sigma y chi; fragilización; tenacidad de impacto.

Recibido: julio 2018

Aceptado: octubre 2018

1. Introducción

La industria de refinación está compuesta de procesos complejos que ameritan materiales especiales para cumplir su función de producir derivados del petróleo. Comúnmente se utiliza acero inoxidable para aplicaciones cuya temperatura supera los 1000 °F, específicamente los aceros inoxidables austeníticos son los más utilizados

por su elevada resistencia a los mecanismos de degradación en elevada temperatura, tales como: termofluencia, corrosión bajo tensión, fragilización por fase sigma/chi, oxidación y ácidos polinitrónicos, tal y como lo describe los mecanismos de deterioro en la API 571 [1]. El mecanismo de degradación por fragilización (fase sigma/chi) en los aceros inoxidables austeníticos, debe ser monitoreada por los departamentos técnicos en las refinerías, a través de métodos destructivos que contemplan la extracción de muestras del metal base de tuberías y/o recipientes para realizar ensayos de impacto, de manera de determinar la capacidad de absorber energía [2], acción limitada por la

*Autor para correspondencia:

Correo-e:acevedofo@gmail.com (Franklin Acevedo)

inversión de tiempo y costos en parada de planta. En la Figura 1, se muestra una falla catastrófica por fragilización por fase sigma en la línea de tope de un regenerador de una unidad de FCC, fabricada de acero inoxidable austenítico SS 304 H, con tiempo de operación superior a 15 años [3].



Figura 1: Falla catastrófica en línea de tope de un Regenerador de la FCC [3].

Según Lo et al. [4], las condiciones para la formación de fase sigma ha sido estudiada por diferentes científicos, permitiendo definir que la fase sigma es enriquecida por el cromo, por lo que el control de la difusión del cromo es usualmente uno de los factores a controlar para su precipitación. Adicionalmente, estudios por Sasikala et al. [5] ha determinado que la difusión de otros elementos como el molibdeno han formado importante cantidades de fase sigma. Finalmente, se determinó que la nucleación de fase sigma es el paso limitante para la transformación de ferrita a sigma, mientras el enriquecimiento de la ferrita con cromo no es suficiente condición para la formación de sigma [5]. Haun et al. [2] determinaron que la formación de fase sigma es un proceso de envejecimiento que ocurre en el SS 304H y otros aceros inoxidable austeníticos expuestos a temperatura de 1300°F, siendo una cantidad significativa de fase sigma durante la primera corrida de las plantas de refinación. La recomendación para el monitoreo está asociada a colocar probetas de muestras soldadas en los ciclones del regenerador, para hacer pruebas destructivas y determinar las pérdidas de propiedades con respecto al tiempo, sin embargo no

está establecida una relación de la cantidad de fase sigma con el tiempo de operación de las unidades.

Un estudio realizado por Barcik [6] propone que la formación de fase sigma en aceros austeníticos está altamente relacionado con el tamaño de grano, por cuanto esto afecta los lugares de nucleación. Recientemente, Schwind et al. [7] concluyó que el tamaño de grano y la forma del grano influyen en la precipitación de la fase sigma.

Esta investigación tiene el propósito de determinar el grado de precipitación de las fases sigma y chi y su afectación en el comportamiento mecánico del acero inoxidable 304 H con más de 15 años de servicio.

2. Metodología

2.1. Material

El material utilizado corresponde a un acero inoxidable austenítico 304 H en forma de planchas, correspondiente a una tubería de 60 pulgadas de diámetro asociada al tope de un regenerador de una unidad de FCC con un tiempo en servicio de 15 años. Para verificar el tipo de material, se utilizará un equipo portátil de identificación positiva de materiales, marca Oxford, modelo PMI Master Pro.

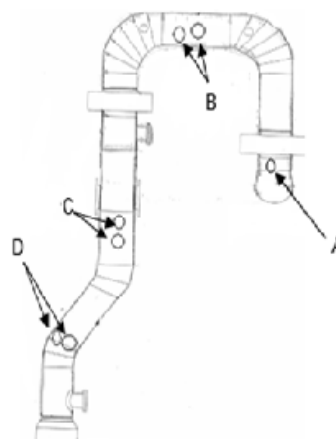


Figura 2: Estudio de tubería de pared caliente en tope de regenerador de planta FCC.

2.2. Réplicas Metalográficas

Se realizará un barrido con réplicas metalográficas en la tubería de 60 pulgadas de diámetro

asociada al tope del regenerador, tal y como se observa en la Figura 2. Se atacó el acero inoxidable con 10 % ácido oxálico.

2.3. Microscopia óptica

Las muestras serán preparadas metalográficamente por el método del desbaste grueso, medio y fino respectivamente para luego ser pulida por la pulidora metalográfica. El reactivo de ataque a utilizar es 45 gramos de KOH en 60 ml de agua, tal y como lo describe en la ASTM E 407 [8]. Las muestras fueron observadas al microscopio marca Buehler modelo Viewmet.

3. Resultados y discusión

3.1. Material

Se realizó la identificación positiva de materiales a través de un PMI marca Oxford, modelo PMI Master Pro, obteniéndose que el metal base presenta una composición química que corresponde a un acero inoxidable 304 H, tal y como se muestra en la Tabla 1. Es importante aclarar que los valores obtenidos del metal base están en el límite inferior del 304 H, sin embargo aun en el rango permisible, esto debido a que el material estuvo en operación por 15 años, y en función a su degradación metalúrgica en altas temperaturas, el carbono migra parcialmente para formar elementos nocivos como carburos y en el caso como el cromo, éste migra parcialmente para formar fase sigma/chi.

Tabla 1: Resultado de ensayo de identificación positiva en muestra.

Material	Elementos químicos (%) en peso			
	Carbono	Cromo	Níquel	Azufre
Diseño 304H	0,04- 0,10	18,0- 20,0	8,0- 10,50	0,03
Metal base	0,04	18,31	8,21	0,017

3.2. Réplicas Metalográficas

El perfil de las réplicas metalográficas a lo largo de la tubería indica mayor precipitación de fase sigma en el punto A, con un menor tamaño de

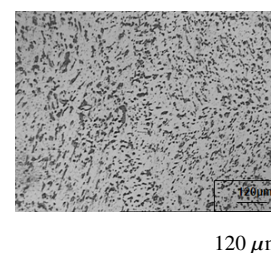


Figura 3: Micrografía al SS 304 H en el punto A de la Figura 2. Ataque con 10 % ácido oxálico. Porcentaje de sigma en 21,3 %.

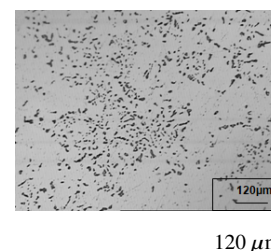


Figura 4: Micrografía al SS 304 H en el punto B de la Figura 2. Ataque con 10 % ácido oxálico. Porcentaje de sigma en 11,17 %.

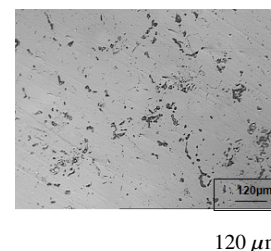


Figura 5: Micrografía al SS 304 H en el punto C de la Figura 2. Ataque con 10 % ácido oxálico. Porcentaje de sigma en 4,3 %.

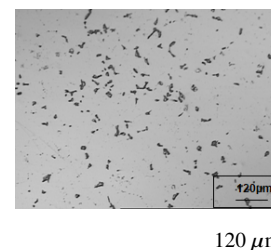


Figura 6: Micrografía al SS 304 H en el punto D de la Figura 2. Ataque con 10 % ácido oxálico. Porcentaje de sigma en 3,98 %.

la fase intermetálica pero mayor densidad con respecto a los puntos de estudio B, C y D. Aun

cuando la tubería fue confeccionada del mismo material, operó a una temperatura idéntica en todos sus puntos y un tiempo de operación similar, se evidenció diferentes grados de precipitación. En la Tabla 2, se presenta los resultados de la cuantificación de las fases. Así mismo, en las Figuras 3, 4, 5 y 6, se observan las micrografías y el porcentaje de fase sigma determinado en un analizador de imágenes.

Tabla 2: Grado de precipitación de fase sigma.

Punto	Tiempo en Servicio (años)	Promedio de % Fase sigma
A	14	21,3
B	14	11,17
C	15	4,3
D	15	3,98

Este estudio indica que la toma de decisiones sobre la condición de integridad de la tubería basada en probetas soldadas puede resultar una elevada incertidumbre, por cuanto la probeta no necesariamente representa la condición más crítica del componente. Para ello, es necesario realizar un barrido de réplicas metalográficas en el componente, para determinar la zona de mayor precipitación de fase sigma para posteriormente realizar la toma de la muestra del material base para hacer pruebas Charpy.

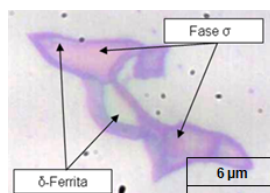


Figura 7: Micrografía en 500x. Ataque con KOH, solución electrolítica de 2,5 V en pocos segundos.

3.3. Microscopia óptica

Las micrografías realizadas muestran de color amarillo/marrón/rojo, las fases sigma y chi, y de color azul o gris, la ferrita, basado en el ataque definido en la ASTM E 407 [8].

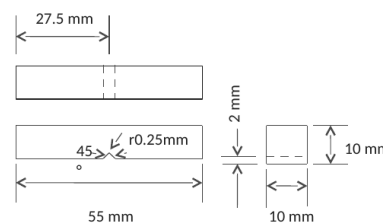


Figura 8: Dimensiones de las probetas de impacto Charpy según ASTM E-23 [9].

En la Figura 7, se muestra una fotomicrografía a 500X, indicando la delta ferrita y las fases sigma/chi.

Por otro lado, las probetas de impacto Charpy en V cumplieron las dimensiones definidas en la norma ASTM E 23-90 [9], tal y como se muestra en la Figura 8.

El ensayo Charpy, es el ensayo utilizado para determinar la capacidad de absorber energía de un material degradado metalúrgicamente, en la actualidad, este ensayo define el criterio de aceptación y rechazo para tuberías o recipientes a presión fabricados en acero inoxidable serie 300 que presenten fragilización por fase sigma [2]. Hau et al. [2] indican que el ensayo Charpy permite estimar el efecto general de las partículas o fases intermetálicas, así mismo se define que el criterio de aceptación es el siguiente: El resultado del ensayo Charpy no debe ser menor a 20 J (15 lbf-ft) para al menos un juego de 3 muestras, pero ninguno inferior que 13 J (10 lbf-ft). En la Tabla 3, se muestra la recopilación de los resultados de estudios similares en aceros inoxidables SS-304 H.

Se evidencia que a medida que aumenta el porcentaje de fase sigma, menor es la tenacidad de impacto (70°), permitiendo concluir que a medida que aumenta la presencia de fases intermetálicas duras disminuye la tenacidad, lo cual demuestra que existe una relación entre la estimación del porcentaje de fase sigma con el resultado del ensayo mecánico de impacto.

En la Figura 9 se observan los resultados de la estimación del porcentaje de fase sigma/chi con el resultado del ensayo Charpy, determinándose una clara disminución de la capacidad de deformarse plásticamente a medida que aumenta el porcentaje

Tabla 3: Resultado de ensayos Charpy (70°F/1300°F) de estudios similares.

Años en servicio	% sigma	Charpy @70°F	Charpy @1300°F	Referencia
0	0	90	104	Pérez [10]
17	4	63	107	Intevep [3]
21*	5	31	44	Pérez [10]
21*	8,3	23	37	Pérez [10]
17	8,7	27	74	Hau et al. [2]
19	11	4	11	Intevep [3]
19	11,6	3	11	Intevep [3]
19	12	9	32	Hau et al. [2]

*: SS 304 H modificado.

de fase sigma/chi.

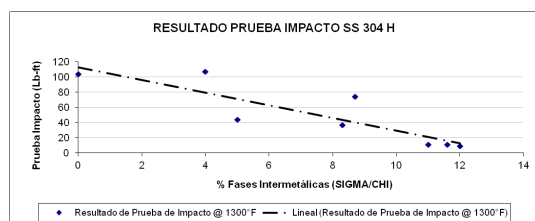


Figura 9: Relación prueba de impacto @70°F vs % de Fases intermetálicas.

Evidentemente, la Figura 9, muestra una relación lineal entre la cantidad de fases intermetálicas sigma/chi y la tenacidad de impacto. La condición de pérdida de ductilidad propicia un riesgo de integridad, por cuanto las fallas en sistemas de tuberías y en recipientes a presión pueden ser catastróficas, similar a la observada en la Figura 1.

Definitivamente se demuestra, la tenacidad de impacto presenta relación con el porcentaje de las fases intermetálicas en el acero inoxidable austenítico 304 H, lo que permitirá proponer un modelo de predicción en función del resultado del % de fases intermetálicas estimadas por las réplicas metalográficas determinadas en las zonas de estudio.

Otro aspecto interesante es la relación entre la energía absorbida a 1300°F contra la energía absorbida a 70°F, la cual presenta un comportamiento exponencial, resaltando que a medida que se precipita las fases intermetálicas en el acero

inoxidable SS304H, la relación se incrementa casi a 3 veces, tal y como se observa en la Figura 10.

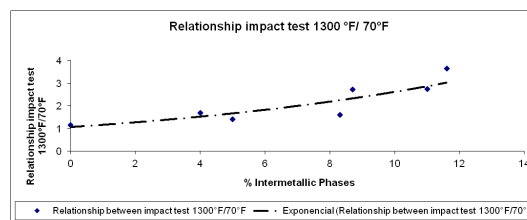


Figura 10: Relación entre energía absorbida 1300°F/70°F en función al porcentaje de fases intermetálicas.

Las plantas de refinación usualmente están diseñadas para un ciclo de corrida entre 4 a 5 años (tiempo entre paradas de planta), por lo que en cada parada se debe monitorear mediante réplicas metalográficas el grado de precipitación de la fase sigma y chi, de manera de determinar el punto más crítico para su estudio, seguidamente el custodio de la instalación puede tomar la decisión de extraer una muestra para ensayar destructivamente o estimar la capacidad de absorber energía mediante el siguiente modelo propuesto por los autores del presente trabajo. Se desarrolló un modelo de regresión, el cual supone que existe una variable respuesta que depende de k variables independientes. Éste se utiliza para analizar datos de experimentos no planeados, como es el caso de fenómenos no controlados o de registros históricos. En el diseño se consideró la tenacidad al impacto como variable respuesta y dos variables independientes, en este caso el porcentaje de fases intermetálicas y el tiempo de operación del componente, resultando esta última por encima del error permisible, 13,6 % (Valor P=0,136), por lo que no es significativa para determinar la tenacidad al impacto. El R² de predicción resultó en 29,27 %, estando muy por debajo del valor aceptable (85 %).

En lo sucesivo, se muestra el resultado del análisis de varianza del modelo de regresión realizado en el programa Minitab:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	6261,3	3130,67	48,89	0,001
%Fases	1	2006,9	2006,92	31,34	0,003
Tiempo	1	201,3	201,32	3,14	0,136
Error	5	320,2	64,03		

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad.(pred)
8,00196	95,14 %	93,19 %	29,27 %

En función a los resultados, se aplicó un nuevo diseño con la tenacidad de impacto como variable respuesta y una variable independiente que es el porcentaje de fases intermetálicas, resultando ser significativa y presenta una relación lineal con respecto a la variable respuesta. En análisis de varianza realizado en el programa Minitab, resultó lo siguiente:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	6060,0	6060,02	69,72	0,000
%Fases	1	6060,0	6060,02	69,72	0,000
Error	6	521,5	86,91		
Total	7	6581,5			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad.(pred)
9,32273	92,08 %	90,76 %	85,20 %

El modelo presenta un R^2 de predicción en 85,20 %, siendo éste por encima de lo aceptable, indicando que este modelo (ecuación (1)) presenta una alta probabilidad de predicción

$$I = 83,76 - 6,932\sigma \quad (1)$$

Donde:

I : Tenacidad al impacto (Lb-ft).

σ : Porcentaje (%) de fases intermetálicas (sigma/chi).

Considerando como límite para el reemplazo de 15 lb-ft, se estima un resultado de alarma de fases intermetálicas del 9,91 %.

Adicionalmente, el monitoreo de las fases intermetálicas en función al tiempo, no presenta una relación que permita ser insumo para el plan de mantenimiento en función del tiempo, por cuanto la zona de estudio debe ser adecuadamente seleccionada mediante un barrido de replicas metalográficas que especifique la zona crítica, esto con la finalidad de cerrar la brecha de diferentes autores que han planteado que se debe considerar el tiempo como una variable importante para definir el reemplazo del componente estudiado. La data manejada en el presente estudio indica

un incremento en la precipitación de fases intermetálicas en función al tiempo, sin embargo no debe ser utilizada para proyectar la precipitación en el futuro, resaltando lo indicado por Hau y Seijas [2] donde en los primeros años de puesta en servicio, se puede obtener altos porcentajes de precipitación de fase sigma.

4. Conclusiones

Componentes fabricados de 304 H que operan en elevadas temperaturas con tiempo en servicio idénticos pueden tener diferentes grados de precipitación de fase sigma/chi.

El monitoreo de la precipitación de fase sigma/chi mediante el uso de probetas no necesariamente representa la zona más crítica del sistema.

Un perfil de las réplicas metalográficas a lo largo de la tubería o recipiente es la manera más eficiente para determinar la zona de mayor precipitación de de fase sigma/chi.

En función al aumento de la presencia de fases intermetálicas disminuye la tenacidad de impacto, transformando el acero inoxidable 304 H en un material frágil, lo que en consecuencia propicia un riesgo de integridad, por cuanto las fallas en sistemas de tuberías y en recipientes a presión pueden ser catastróficas.

El modelo propuesto permite predecir la tenacidad de impacto basado en el porcentaje de fases intermetálicas determinado con la utilización de réplicas metalográficas.

La alarma para el reemplazo de componentes resultado del monitoreo de fragilización debido a fases intermetálicas en el SS 304 H, es del 9,91 %.

La relación entre la energía absorbida a 1300°F contra la energía absorbida a 70°F, presenta un comportamiento exponencial hasta alcanzar un máximo de 3 veces entre 11 % y 12 % de fases intermetálicas.

5. Recomendaciones

Monitorear la precipitación de fase sigma/chi mediante un perfil de réplicas metalográficas a lo

largo de la tubería o recipiente para determinar la zona de mayor precipitación de fase sigma/chi.

Utilizar el modelo propuesto para predecir la tenacidad al impacto del acero inoxidable 304 H fragilizado por fases intermetálicas.

Programar reemplazo del componente para la próxima parada en caso de obtener un porcentaje de fases intermetálicas (sigma/chi) superior a 9,91 %.

6. Referencias

- [1] American Petroleum Institute. API RP 571(2011), Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry, 2011.
- [2] Jorge L. Hau and Antonio Seijas. Sigma phase embrittlement of stainless steel in FCC service. In *CORROSION NACEpo 2006 61st Annual Conference & Exposition*, number 06578, pages 2–22. NACE International, 2006.
- [3] Refinería El Palito and INTEVEP. Evaluación integral de la falla ocurrida en la línea de gases de combustión del sistema de tope del regenerador de PDVSA catalizador de la Unidad de FCC de la refinería. Reporte técnico INT-8919,2001, INTEVEP, Venezuela, 2001.
- [4] K.H. Lo, C.H. Shek, and J.K.L. Lai. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 65(4):39 – 104, 2009.
- [5] G. Sasikala, S. K. Ray, and S. L. Mannan. Kinetics of transformation of delta ferrite during creep in a type 316 (N) stainless steel weld metal. *Materials Science and Engineering: A*, 359(1-2):86–90, 2003.
- [6] J. Barcik. Mechanism of σ -phase precipitation in Cr–Ni austenitic steels. *Materials Science and Technology*, 4(1):5–15, 1988.
- [7] M. Schwind, J. Källqvist, J. O. Nilsson, John Ågren, and H. O. Andrén. σ -phase precipitation in stabilized austenitic stainless steels. *Acta Materialia*, 48(10):2473–2481, 2000.
- [8] ASTM. ASTM E 407-07, Standard practice for microetching metals and alloys, 2011.
- [9] ASTM. ASTM E 23, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, 2014.
- [10] Yberth J. Pérez Brito. Estudio de la degradación por fase sigma del acero inoxidable 304H de la línea de CO de la FCCU. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2007.

Reformulation of latex flat paint class A for exterior use, through the partial replacement of titanium dioxide by new extenders

Belén María Paricaguán^{*,a}, José Luis Muñoz^b, Fabiola Sevilla^b, José Antonio Pérez^a

^a*Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Centro de Investigaciones Montana, Valencia, Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- In the formulation of the paints the use of TiO_2 is significantly influenced, however, it is expensive and imported, so the mass production of most of the national companies is limited, awakening the interest in the research as regards the reformulation of products and technologies, without harming the quality standards of the product. That is why it was proposed to reformulate class A matte latex paint for exterior use by partially replacing titanium dioxide (TiO_2) with new extenders. The behavior of the painting under study according to its current formula was evaluated. Subsequently tests were performed with the extensions, such as viscosity, pH, radio contrast or coverage, weight per gallon, indexes of whiteness and yellowness, degree of dispersion, color and sedimentation, following the test methods reflected in the Covenin Standards, in such a way that the most suitable mass / mass percentage concentration of partial substitution of TiO_2 could be selected by said extenders and thus establish 3 alternative formulas for this painting. Finally, the extension associated with aluminum silicate gave the best results in terms of coverage, percentage of whiteness and yellowness index.

Keywords: extenders; reformulation; latex; titanium dioxide.

Reformulación de pintura látex clase A mate de uso exterior, mediante la sustitución parcial del dióxido de titanio por nuevos exténderes

Resumen.- En la formulación de las pinturas influye significativamente el uso del TiO_2 , sin embargo, es costoso, por lo que la producción en masa de la mayoría de las empresas nacionales se ve limitada, despertando el interés en la investigación de lo relativo a la reformulación de productos y tecnologías, sin perjudicar los estándares de calidad del producto. Es por ello que se planteó, reformular pintura látex clase A mate de uso exterior mediante la sustitución parcial de dióxido de titanio (TiO_2) por nuevos exténderes. Para ello, se evaluó el comportamiento de la pintura en estudio según su fórmula actual, seguidamente se realizaron pruebas con los exténderes propuestos como viscosidad, pH, radio contraste, peso por galón, índices de blancura y amarillez, grado de dispersión, color y sedimentación, siguiendo los métodos de ensayo reflejados en las Normas Covenin, de forma tal que pudiera seleccionarse la concentración en porcentaje masa/masa más adecuada de sustitución parcial del TiO_2 por dichos exténderes y así establecer tres fórmulas alternativas para esta pintura. Finalmente, el extender asociado al silicato de aluminio arrojó los mejores resultados en cuanto a cubrimiento, porcentaje de blancura e índice de amarillez.

Palabras claves: exténderes; reformulación; látex; dióxido de titanio.

Recibido: junio 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

La existencia de una gran diversidad de pinturas suministrando una gama de productos, exige tener un control sobre la adquisición de la misma. Para

tener la certeza de cuál es la que necesita el consumidor, es necesario conocer su formulación, además de la calidad de los componentes y del proceso de fabricación, desenvolvimiento, aplicación, servicio y costo. Asimismo, en su formulación se deben cumplir con parámetros físicos, químicos y mecánicos, así como aspectos estéticos, y la clasificación dependerá de sus materias primas [1].

El destino principal de las pinturas látex en base acuosa es la decoración y protección de

* Autor para correspondencia:

Correo-e: belenparicaguan@gmail.com (Belén María Paricaguán)

elementos de mampostería, constituyen la mayor parte de los recubrimientos de tipo arquitectónico aportando un efecto estético a elementos de la vida cotidiana modificando la apariencia superficial de los mismos [2]. Para el desarrollo de esta investigación se toma la pintura látex clase A de uso exterior como objeto de estudio, la misma está compuesta por dispersiones acrílicas (resinas), pigmentos y aditivos que en conjunto, proporcionan un acabado de primera calidad en la pintura evaluada.

El dióxido de titanio (TiO_2), es globalmente considerado como el pigmento blanco de mayor importancia en la industria de los recubrimientos y su versatilidad para ser empleado en diferentes aplicaciones se debe a su alta eficiencia para dispersar la luz, proveer brillo y opacidad a las formulaciones, brindando la más excepcional blancura [3]. Es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV. Es anfotérico, muy estable químicamente y no es atacado por la mayoría de los agentes orgánicos e inorgánicos, disolviéndose en ácido sulfúrico concentrado y en ácido hidrofúrico. Básicamente tiene 3 clases de cristales; el Rutílico (tetragonal), el Anatásico (octahédrico) y Brookita (ortorrómbico); de los cuales es el Rutílico el de mayor índice de refracción, es decir, que provee una mejor opacidad a la película de pintura [4].

Yaprak y colaboradores [5] realizaron una sustitución parcial de TiO_2 en formulaciones arquitectónicas de pintura para interiores. Se intentó hasta un 30 % con mineral de carbonato llamado huntita, calcita y arcilla Neuburg, tierra silíceas. Se lograron incrementos en los valores de poder de ocultación, blancura y brillo exitosamente por diferentes cantidades de sustituciones de huntitas.

Naranyan y Raju [6] enfatizan en su investigación que la arcilla, es uno de los recursos naturales que abundan en la tierra, teniendo potencial uso como extender en recubrimientos. El uso de arcilla calcinada se ha reportado que es viable en el reemplazo parcial de TiO_2 en formulaciones de pintura de látex hasta un 20 % de TiO_2 . Sin tener efectos adversos sobre las propiedades

de recubrimiento. Del mismo modo, el uso de las arcillas Okposi y de Amankwo Afikpo en formulaciones de pintura alquídica fueron reportadas por Igwe y Ezeamaku [7]. Las pinturas formuladas que contenían 13.1 % a 36.0 % en peso de las arcillas exhibieron buenas propiedades en las pinturas en comparación con las fórmulas comerciales.

Bhoge y colaboradores [8] realizaron formulaciones con el reemplazo parcial del pigmento TiO_2 utilizando Mica- CaCO_3 en pintura decorativa. Propiedades de pintura tales como poder de ocultación, resistencia al frote, brillo, adherencia y resistencia al clima se han determinado para establecer el porcentaje óptimo de pigmento Mica- CaCO_3 en la formulación de la pintura. El porcentaje óptimo de la carga de Mica- CaCO_3 es aproximadamente 20-30 % en peso de TiO_2 . Las propiedades generales de la pintura son encontradas satisfactorias con la reducción de costos para pinturas decorativas.

A nivel mundial uno de los principales componentes para la producción de pinturas látex es el TiO_2 , sin embargo, en Venezuela por el alto costo y la dificultad que existe en el país para la obtención de divisas imposibilitan la adquisición de las cantidades necesarias de dicha materia prima truncando así la capacidad de producción de las empresas; buscando una alternativa de solución a esta problemática se propone la reformulación de las pinturas látex clases A, haciendo uso de exténderes de menor precio y fácil adquisición a nivel nacional, que sustituyan de forma parcial al pigmento TiO_2 en la fórmula utilizada actualmente, sin perjudicar los estándares de calidad del producto, siguiendo los métodos de ensayo reflejados en las Normas Venezolanas Covenin.

2. Materiales y Métodos

2.1. Muestras de exténderes

Se contaron con siete exténderes de distintas características tal como se observa en la Tabla 1 su forma y tamaño medio de partícula: cinco carbonatos de calcio (CaCO_3), un silicato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$) y un sulfato de bario

(BaSO₄) entre los cuales se realizó una selección de los tres que mejor se adaptaban a las características fisicoquímicas de la pintura látex clase A de uso exterior. Igwe y colaboradores [9] realizaron estudios sustituyendo cantidades en concentración en el rango 5 %-32 % del total del extender y pigmento TiO₂ en la pintura. Otros investigadores [5, 6, 7, 8], también basaron sus estudios en un rango similar descrito, es por ello que al haber un precedente, se decidió evaluar los diferentes exténderes a razón de 5 %, 10 % y 15 % en concentración masa/masa de sustitución del dióxido de titanio.

Tabla 1: Exténderes adquiridos para realizar ensayos.

E_i	Familia	Tamaño de partícula d50(μ m)	Absorción de aceite ($g_{ac}/100g_{ext}$)	Índice de refracción en seco(Adim)
E_1	CaCO ₃ (microniz)*	0,70	17,0	1,57
E_2	CaCO ₃ (microniz)*	1,00	24,0	1,57
E_3	CaCO ₃ (microniz)*	0,80	21,0	1,57
E_4	CaCO ₃ (microniz)*	3,05	22,1	1,57
E_5	CaCO ₃ (microniz)*	0,90	20,5	1,57
E_6	Al ₂ (SiO ₃) ₃ **	5,40	152,3	1,64
E_7	BaSO ₄ *	0,80	16,7	1,65

microniz: micronizado, *:Forma nodular, **:Forma laminar

E_i : extender i, d50: tamaño medio de partícula

2.2. Materias primas de la pintura clase A mate de uso exterior, según la fórmula actual y sus especificaciones

Se muestra en la Tabla 2 la fórmula actual de la pintura clase A mate de uso exterior a ser evaluada.

La pintura fabricada posee una hoja de especificaciones asociada, según lo establecido en la Norma Venezolana Covenin, en la cual son indicadas las propiedades fisicoquímicas de interés y los valores permitidos para cada una, fueron realizados una serie de ensayos tales como: no volátiles, pH, peso por galón, grado de dispersión, viscosidad, brochabilidad, resistencia al fregado, cuarteamiento, blancura, índice de amarillez, radio contraste, secamiento libre de huella.

Tabla 2: Fórmula actual para la fabricación de pintura látex clase A mate de uso exterior [1]

Materia prima	Porcentaje masa/masa
Agua tratada	28,0
Celulosa	0,5
*Tensoactivos	1,0
estabilizante de pH	2,0
Coalescente	1,0
Dióxido de titanio	28,0
Cargas varias	11,0
Co-solvente	2,0
Bactericida / Fungicida	0,5
Resina	26,0
TOTAL	100,0

*Tensoactivos:antiespumantes/dispersantes/humectantes

Nota:etapa de fabricación, dispersión y terminación

2.3. Selección de las pinturas a evaluar

Al existir poca disponibilidad de materia prima, en principio se fabricó un concentrado de dióxido de titanio (que en lo sucesivo se llamará intermedio), debido a que posee la mayor cantidad de TiO₂ entre los productos en estudio y, por ende, permitiría observar con mayor facilidad el efecto de los exténderes sobre la sustitución a porcentajes específicos del TiO₂; además, se determinaron propiedades tales como: peso por galón, no volátiles, viscosidad, pH, sedimentación y poder de tinte, según lo establecido en la Norma venezolana Covenin. Se evaluaron los intermedios para validar el comportamiento de los exténderes en los distintos porcentajes de sustitución del TiO₂.

2.4. Formulación, fabricación y diseño del producto

Una vez definidos los porcentajes de sustitución 5 %, 10 % y 15 % masa/masa de las cantidades de TiO₂ por exténderes, se desarrollaron las alternativas de pinturas a partir de la fórmula actual del concentrado de dióxido de titanio. En la Tabla 3 se obtuvieron las fórmulas alternativas una vez reemplazado parcialmente el TiO₂, donde las fórmulas 1, 2 y 3 corresponden con un 5 %($F_5\%$), 10 %($F_{10\%}$) y 15 %($F_{15\%}$) de sustitución de TiO₂.

Las alternativas de formulación presentadas en la Tabla 3 aplican de igual forma para todos los exténderes.

Tabla 3: Diseño de fórmula para el concentrado de Dióxido de Titanio

Materia prima	Porcentaje masa/masa			
	F_{actual}	$F_{5\%}$	$F_{10\%}$	$F_{15\%}$
Agua tratada	26,6	26,6	26,6	26,6
Espesante	0,2	0,2	0,2	0,2
*Tensoactivos	2,0	2,0	2,0	2,0
Co-solvente	1,0	1,0	1,0	1,0
Dióxido de titanio	70,0	66,5	63,0	59,5
Extender E_i	0,0	3,5	7,0	10,5
Bactericida	0,2	0,2	0,2	0,2

*Tensoactivos: antiespumantes/dispersantes/humectantes

$F_n\%$: Fórmula al $n\%$ de sustitución parcial de TiO_2 , E_i : extender i

Nota: Etapa de fabricación dispersión

2.5. Determinación de las cantidades adecuadas de exténderes a utilizar en las nuevas fórmulas de pintura látex clase A mate de uso exterior

Se decidió partir de un 15 % masa/masa de sustitución (porcentaje máximo utilizado) de forma tal, que se realizó un barrido decreciente en la reducción del TiO_2 , para así obtener el punto en el cual las propiedades críticas del producto evaluado se encontraron dentro de especificaciones a la mayor reducción posible del pigmento TiO_2 .

2.6. Estandarización de las fórmulas actuales y las reformulaciones con los exténderes alternativos en producto terminado

En la pintura clase A mate de uso exterior, se evaluaron: no volátiles [10], viscosidad [11], pH [12], peso por galón [13], poder colorante, brillo 60°, radio contraste [14], porcentaje blancura e índice de amarillez.

2.7. Evaluación de la influencia de la reducción del TiO_2 por los nuevos exténderes en las reformulaciones de la pintura látex clase A mate de uso exterior

Para analizar la influencia de la reducción del TiO_2 en las reformulaciones propuestas, se requirió la evaluación de tres escenarios los cuales son presentados en la Figura 1, de esta forma, los pasos para dicha evaluación se dividieron en: fabricación de pinturas con cantidades de TiO_2 reducidas, evaluación del cubrimiento proporcionado por dichas pinturas y análisis de la variación de

las propiedades en las pinturas alternativas con respecto a pinturas con TiO_2 reducido y fórmulas actuales.

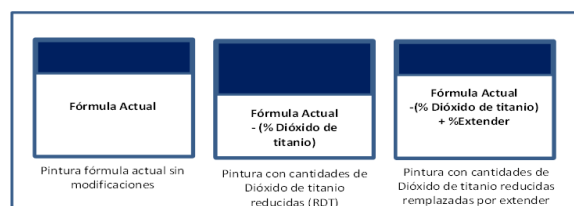


Figura 1: Esquema de las pruebas realizadas para la evaluación de la influencia de la sustitución parcial del dióxido de titanio por exténderes.

2.8. Análisis de la variación de propiedades en las pinturas alternativas con respecto a los productos estándar

Ahora, con las propiedades obtenidas para pinturas fabricadas con la fórmula actual, pinturas con reducción de TiO_2 sin sustitución del mismo y pinturas con reducción y sustitución parcial del TiO_2 por exténderes; se realizó un análisis en el cual se compararon los comportamientos de cada una de las variaciones, de esta manera se pudo conocer la influencia de la sustitución parcial del TiO_2 por los nuevos exténderes sobre las propiedades de la pintura.

3. Resultados y discusión

3.1. Analizar las propiedades fisicoquímicas de la pintura tipo A mate de uso exterior según la fórmula actual

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos durante la evaluación de la pintura clase A mate de uso exterior según fórmula actual.

Al observar los resultados obtenidos durante la evaluación de la pintura clase A mate de uso exterior, se tiene que ésta cumplió con todos los requerimientos exigidos por las especificaciones, indicando entonces que esta fórmula no requiere modificaciones previas a su reformulación.

Tabla 4: Propiedades de la pintura clase A mate de uso exterior según fórmula actual.

Propiedad	Unidad	Especificación	F. Actual
No volátiles[10]	%	Mín. 40,00	55,03
pH [12]	N/A	8,50-9,50	8,74
Peso por galón[13]	kg/gal	5,25 ±0,20	5,42
Grado de dispersión [15]	μm	45-50	45
Viscosidad[11]	KU	87,0-97,0	92,3
Brochabilidad [16]	N/A	Mín. fácil	Fácil
Resistencia al fregado	Ciclos	Mín. 100	482
CuarTEAMIENTO, 100mils	N/A	Mín. Muy bueno	Muy bueno
Blancura	%	(*)	84,54
Índice de amarillez	Adim	(*)	2,3
Radio contraste [14]	%	Mín. 96,5	97,61
Secamiento libre de huella [17]	Min	Máx. 60	60

N/A: no aplica, KU: Krebs-Stormer, Mín: mínimo, Máx.: máximo
s/norma: según norma, F: fórmula, (*):Comparar con F. actual.

3.2. Concentrado de dióxido de titanio según fórmula actual

En la Tabla 3 se encuentran establecidos los valores obtenidos para las propiedades del concentrado de dióxido de titanio según fórmula actual.

Tabla 5: Propiedades del concentrado de dióxido de titanio según fórmula actual.

Propiedad	Unidad	Especificación	F. Actual
Peso por galón [13]	kg/gal	7,90 ±0,60	7,91
No volátiles [10]	%	Mín. 68	71,4
Viscosidad [11]	KU	85-95	95
pH [12]	N/A	8,0-9,0	8,4
Sedimentación [18]	N/A	Mín. 6 (7 días al horno a 60°C)	Ausente

N/A: no aplica, KU: Krebs-Stormer, Mín.: mínimo, F: fórmula

Al observar su hoja de especificación, se tiene que ninguna propiedad se encuentra fuera de lo indicado en la misma, por ende, este concentrado cumplió con los requerimientos de calidad exigidos para él mismo.

3.3. Selección del tipo de extender a utilizar de acuerdo a las características fisicoquímicas del concentrado de dióxido de titanio

En la Tabla 6 se presentan las cantidades cargadas de TiO₂ y extender en el intermedio

para cada prueba realizada, con concentraciones en masa/masa de 5 %, 10 % y 15 %, respectivamente. Se observa que la cantidad total de TiO₂ y extender se mantiene constante, puesto que, se está evaluando la influencia de la sustitución parcial de TiO₂ por extenderes sin modificar la cantidad de sólidos totales contenidos en el intermedio.

Tabla 6: Cantidades cargadas de dióxido de titanio y extender para cada fórmula alternativa de concentrado de dióxido de titanio.

Materiales	Concentración en la Fórmula (% masa / masa)			
	F_{actual}	$F_{5\%}$	$F_{10\%}$	$F_{15\%}$
Dióxido de titanio	70,0	66,5	63,0	59,5
Extender	0,0	3,5	7,0	10,5
Total en fórmula	70,0	70,0	70,0	70,0

$F_n\%$: Fórmula al $n\%$ de sustitución parcial de TiO₂.

3.4. Evaluaciones del concentrado de dióxido de titanio

Una vez fabricadas las siete alternativas para el concentrado de TiO₂ se realizaron las evaluaciones correspondientes.

3.4.1. Fuerza de base

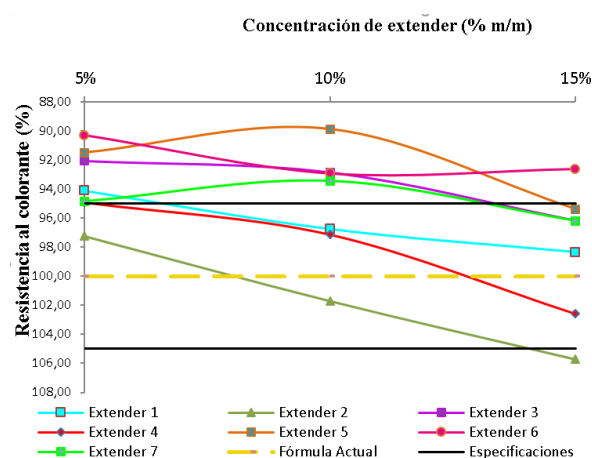


Figura 2: Variación de la resistencia al colorante en función del porcentaje de sustitución parcial de dióxido de titanio por cada extender evaluado.

En la Figura 2 se encuentran representados los valores obtenidos de la resistencia al colorante para cada prueba realizada y el rango de especificación

correspondiente, la resistencia al colorante es inverso al poder colorante o fuerza de tinte cuando el pigmento evaluado es el TiO_2 , es decir, a menor porcentaje de resistencia al colorante, mayor es el poder de tinte o la fuerza del TiO_2 , o la mezcla de TiO_2 más extender evaluado.

Al analizar los resultados obtenidos se observa que E_1 , E_3 , E_5 , E_6 y E_7 , presentan valores sobresalientes de poder colorante a un 15 % de sustitución, en el caso de los exténderes carbonatos micronizados E_5 y E_3 , su reducido tamaño medio de partícula se asemeja más al tamaño de partícula del TiO_2 , por lo que el efecto de dispersión es favorable. La misma interpretación aplica para E_7 que es de sulfato de bario. En el caso del silicato de aluminio, E_6 , la explicación va en otro sentido, su tamaño de partícula es mucho mayor que la del TiO_2 (5,4 micrones vs 0,3 micrones), sin embargo, debido a su proceso sintético de fabricación estrictamente controlado, se obtiene un extender del alta pureza e intensidad de blancura, que aunado, a su capacidad de evitar reaglomerados de TiO_2 , produce un efecto espaciador excepcional.

Por otro lado, E_4 tiene el mayor tamaño medio de partícula dentro de los carbonatos micronizados (3,05 micrones), genera un buen poder colorante en las sustituciones de 5 % y 10 % en concentración masa/masa, perdiéndose el efecto espaciador del TiO_2 cuando se sustituye en un 15 %, debido a que la dispersión pierde eficiencia.

El extender E_2 tiene un comportamiento aceptable cuando sustituye al TiO_2 en un 5 %, para sustituciones de 10 % y 15 % se pierde poder colorante, esto puede atribuirse a que la distribución real de tamaño de partículas de este extender en la dispersión se aleja del valor nominal (1,0 micrón), en consecuencia el espaciado del TiO_2 es menos eficaz.

En términos generales, estos ensayos demuestran la capacidad como exténderes de los distintos materiales evaluados, ya que la sustitución parcial del TiO_2 por otro tipo de carga (no extender) generaría una reducción importante del poder colorante del concentrado.

3.4.2. Relación de contraste

Se toman los intermedios preparados con fórmula actual y con sustituciones por los distintos exténderes y se incorporan a paridad de condiciones a una base estándar donde el aporte del TiO_2 al cubrimiento es máximo, esto con la finalidad de determinar el efecto de las sustituciones en la relación de contraste y otras propiedades colorimétricas como porcentaje de blancura e índice de amarillez. Para asegurar las mismas condiciones de estudio y garantizar reproducibilidad, las pruebas fueron evaluadas asegurando un espesor constante de 3mils en cartulinas barnizadas no absorbentes. En la Figura 3, se observan los valores de cubrimiento obtenidos por las distintas alternativas las cuales superan el mínimo requerido en especificaciones 95,0 %.

El extender E_6 correspondiente a un silicato de aluminio, proporcionó los valores más altos de cubrimiento, entre 97,3 % y 96,3 % respectivamente, disminuyendo a medida que incrementaba la concentración en porcentaje masa/masa del extender en sustitución parcial del TiO_2 , esto es debido, a su forma laminar, la cual le confiere una gran capacidad para reorganizar el TiO_2 impidiendo su reaglomeración [2]. Por su parte E_7 , asociado a un sulfato de bario, debido a su forma nodular y pequeño tamaño 0,80 μm tienden a ser semejantes a las partículas de TiO_2 por lo que posee la capacidad de posicionarse entre éstas; incrementando la distancia entre una partícula de pigmento y otra, trayendo en consecuencia que se obtuvieran valores de cubrimiento entre 96,1 % y 96,4 % [2].

Para los carbonatos de calcio micronizados E_1 , E_2 , E_3 , E_4 y E_5 , su forma es nodular y poseen tamaños de partícula distintos entre sí, existiendo variaciones entre 0,70 μm y 3,05 μm , debido a esa característica presentaron el comportamiento esperado, es decir, a mayor tamaño de partícula menor cubrimiento proporcionado a la película de pintura correspondiente, puesto que, a medida que se incrementa el tamaño de la partícula, esta se aleja de la similitud en tamaño al TiO_2 , por lo que los exténderes no logran posicionarse adecuadamente entre dichas partículas de TiO_2 , disminuyendo la capacidad espaciadora del extender y generando

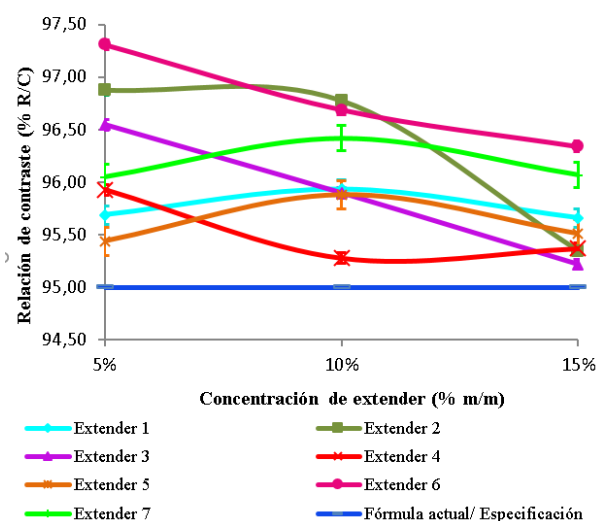


Figura 3: Variación de la relación de contraste en función de la concentración en porcentaje masa/masa de dióxido de titanio sustituido parcialmente por cada extender evaluado.

bajos valores de cubrimientos en las pinturas. El extender E_4 posee el mayor tamaño de partícula entre los carbonatos de calcio evaluados y sus alternativas presentaron el menor cubrimiento tomando valores entre 95,9 % y 95,3 %; por su parte E_1 y E_5 , con tamaños medios de partícula entre 0,70 μm y 0,90 μm , respectivamente, presentaron un comportamiento similar y acorde a lo esperado entre 95,4 % y 95,9 % respectivamente.

Los exténderes E_2 y E_3 aun cuando pertenecen también a la familia de carbonatos de calcio, mostraron comportamientos diferentes, en los cuales se observa, en la Figura 3, que para ambos casos ocurre una caída brusca en cuanto al cubrimiento proporcionado por las alternativas correspondientes y el efecto espaciador brindado por estos exténderes se pierde con rapidez a medida que incrementa el porcentaje de reemplazo del pigmento TiO_2 .

3.4.3. Porcentaje de blancura

El porcentaje de blancura e índice de amarillez no poseen valores de especificación establecidos, sino que se toma el valor arrojado por la fórmula actual y se compara con el obtenido para las distintas alternativas, en el caso del porcentaje de blancura el mejor comportamiento lo tendrá

la alternativa cuyo valor sea igual o superior al de la fórmula actual, caso contrario al índice de amarillez, el cual se considera como mejor comportamiento aquel que sea igual o menor al proporcionado por la fórmula actual.

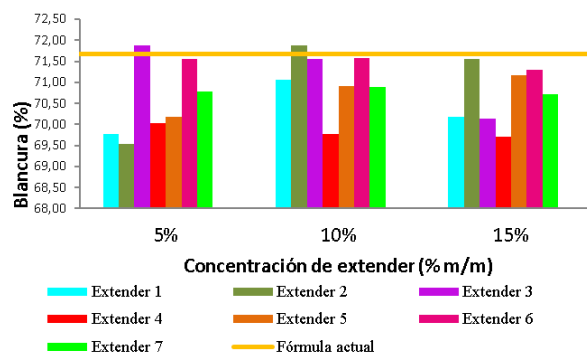


Figura 4: Variación de la blancura en función de la concentración en porcentaje masa/masa de TiO_2 sustituido parcialmente por cada extender evaluado.

La Figura 4 muestra como a medida que disminuye la concentración de TiO_2 en las alternativas fabricadas y es sustituido por exténderes, la blancura variará conforme a la luminosidad y pureza que posea cada uno de estos exténderes. El mejor comportamiento lo presentaron E_2 que es un carbonato de calcio micronizado, E_5 carbonato de calcio micronizado y E_6 silicato de aluminio, puesto que mantuvieron niveles de blancura relativamente altos a mayores porcentajes de sustitución parcial del TiO_2 , siendo 15 % masa/masa, tomando valores entre 71,17 % y 71,55 % respectivamente. El efecto favorable en esta propiedad depende directamente de la blancura de la piedra carbonatos micronizados y su proceso de obtención vía sintética en el caso del silicato de aluminio, exténderes más blancos generan productos más blancos cuando sustituyen parcialmente al TiO_2 .

3.4.4. Índice de amarillez

Con respecto al índice de amarillez, en la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas, y se observa que en su mayoría independientemente de

la concentración a la cual fue utilizado el extender, el índice de amarillez superó el valor arrojado por la fórmula actual, indicando que el uso de exténderes incrementa el índice de amarillez, esto viene a confirmar los resultados de porcentaje de blancura.

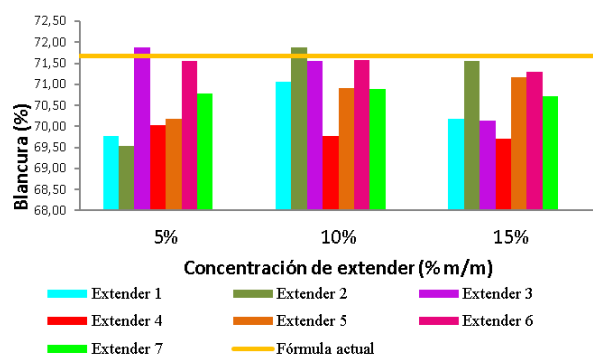


Figura 5: Variación del índice de amarillez en función de la concentración en porcentaje masa/masa de TiO_2 sustituido parcialmente por cada extender evaluado.

3.5. Determinar las cantidades adecuadas de exténderes a utilizar en las nuevas fórmulas de pintura látex clase A mate de uso exterior

Tal y como se muestra en la Tabla 7 al ser evaluada la reducción de la concentración de TiO_2 en un 15 % se observa que todas las alternativas están dentro de especificaciones en cuanto a la relación de contraste, sin embargo, el porcentaje de blancura presentado E_2 y E_5 , correspondientes a carbonatos de calcio, se encontró por debajo de lo requerido según la fórmula actual (F. actual: 84,5 %, E_2 : 78,6 % y E_5 : 78,97 %), esto ocurrió debido a que se redujo en un porcentaje muy alto la concentración del pigmento blanco, sustituyéndole por otro tipo de carga con un índice de refracción mucho menor, además la redistribución de las partículas de TiO_2 no ocurrió de forma uniforme, por lo que se realizó una segunda corrida a un 10 % de concentración masa/masa de extender en sustitución del TiO_2 , con la cual, si se observó una mejora considerable en las propiedades analizadas, acercándose al comportamiento de la fórmula actual y favoreciendo la blancura del mismo en los tres casos [19].

Tabla 7: Evaluación de propiedades críticas para pintura clase A mate de uso exterior.

Sustitución (masa/masa)	Propiedad	Alternativas					
		E_6	Δ_1	E_2	Δ_2	E_5	Δ_3
15 %	R/C (%)	96,8	0,80	96,5	1,10	96,7	0,85
	Blancura (%)	87,1	2,60	78,6	5,90	78,9	5,53
10 %	R/C (%)	97,4	0,19	97,7	0,10	97,5	0,07
	Blancura (%)	86,9	2,42	84,9	0,40	85,1	0,63

F.Actual: R/C: 97,6 %, Blancura: 84,5 %

Especificaciones: R/C: Mín. 96,5 %, Blancura: comparar con F.Actual

R/C: relación de contraste, Mín.: mínimo, F.Actual: fórmula actual

Δ_i : variación en alternativa E_i con respecto a F.Actual

En cuanto a los valores de cubrimiento obtenidos estos coinciden con lo esperado, en donde E_6 correspondiente al silicato de aluminio arroja la relación de contraste más alta 96,8 % y 97,4 % para sustituciones de 15 % y 10 % masa/masa respectivamente, esto es debido a que su forma de partícula laminar, le confiere la mayor capacidad para espaciar al TiO_2 evitando su aglomeración. En el caso de los carbonatos de calcio asociados a E_2 y E_5 , para sustituciones de 10 % y 15 % masa/masa, tienden a comportarse de forma similar entre ellos en cuanto a cubrimiento y blancura.

Por consiguiente, las cantidades adecuadas de extender a utilizar en cada una de las 3 alternativas son: E_6 al 15 % con una mayor reducción de TiO_2 , y exténderes E_2 y E_5 al 10 % de sustitución masa/masa del TiO_2 .

3.6. Formulación y evaluación de propiedades fisicoquímicas de las alternativas propuestas para la pintura látex clase A mate de uso exterior

En la Tabla 8 se muestran las fórmulas alternativas con los tres mejores extender para la pintura clase A mate de uso exterior.

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos durante la evaluación de la pintura clase A mate de uso exterior para la fórmula actual y sus alternativas respectivas.

Se puede observar que entre la fórmula actual y sus alternativas es poca la variación de algunas propiedades, como porcentaje de no volátiles, peso por galón, pH y grado de dispersión. Ahora

Tabla 8: Fórmulas alternativas para pintura látex clase A mate de uso exterior.

Materia prima	Alternativas porcentaje masa/masa		
	E_6	E_2	E_5
Agua tratada	28,0	28,0	28,0
Celulosa	0,5	0,5	0,5
Tensoactivos*	1,0	1,0	1,0
Estabilizante de pH	2,0	2,0	2,0
Coalescente	1,0	1,0	1,0
Dióxido de titanio	23,8	25,6	25,6
Extender	4,2	2,4	2,4
Cargas varias	11,0	11,0	11,0
Co-solvente	2,0	2,0	2,0
Bactericida / Fungicida	0,5	0,5	0,5
Resina	26,0	26,0	26,0
Total	100,0	100,0	100,0

*Tensoactivos: antiespumantes/dispersantes/humectantes.

Tabla 9: Propiedades de la pintura clase A mate de uso exterior.

Propiedad	Unidad	Alternativas		
		E_6	E_2	E_5
No volátiles	%	55,8	55,97	55,72
pH	N/A	8,83	8,79	8,8
Peso por galón	kg/gal	5,32	5,36	5,38
Grado de dispersión	μm	45	45	45
Viscosidad	KU	96,5	92,8	95,1
Brochabilidad	N/A	Fácil	Fácil	Fácil
Resistencia al fregado	Ciclos	435	443	480
Cuarteamiento, 100mils	N/A	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno
Radio contraste	%	96,8	97,7	97,5
Blancura	%	87,1	84,9	85,1
Índice de amarillez	Adim	1,94	2,67	2,02
Secamiento libre de huella	(min)	45	60	60

N/A: no aplica, KU: Krebs-Stormer, Mín.: mínimo, Máx.: máximo
 E_i : extender i, (min): minuto

bien, el grado de dispersión de la pintura es una propiedad dependiente del tiempo utilizado al dispersar la pintura en su fabricación, la correcta parametrización del proceso (viscosidad y velocidad periférica) y la dispersabilidad de las cargas y pigmentos, por lo que durante las pruebas realizadas se garantizaron las mismas condiciones de proceso y, por ende, no se

observaron variaciones en el grado de dispersión obtenido para cada caso, lo cual indica que los exténderes no modificaron la dispersabilidad del sistema, actuando según lo esperado, ya que entre sus funciones está mejorar la dispersión del TiO_2 .

En cuanto a la brochabilidad, la sustitución parcial del dióxido de titanio por exténderes no generó una modificación en las alternativas con respecto a la fórmula actual de la pintura clase A mate de uso exterior, por lo que se mantuvo una fácil aplicación con brocha del producto independientemente de la alternativa estudiada.

La variación de la resistencia al fregado se observa en la Figura 6, presentando desmejoras con respecto a la fórmula actual debido a que a menor cantidad de resina libre disponible, es decir, a mayor índice de absorción de aceite, menor será la resistencia a la abrasión de la película de pintura seca, tal y como se observa en los resultados obtenidos entre los cuales la fórmula actual resiste un total de 482 ciclos de fregado, seguido por la alternativa asociada al extender 5 con 480 ciclos, extender 2 con una resistencia a 443 ciclos, desgastándose la pintura, se observa un punto negro, por último, el extender 6 con una resistencia a 435 ciclos de fregado, observándose un mayor desgaste, se hace necesario mencionar que todas las pruebas realizadas a la pintura clase A mate de uso exterior superan la resistencia al fregado mínima requerida por especificaciones (100 ciclos), por lo que el impacto generado por la sustitución parcial del TiO_2 por estos exténderes no ocasionan una disminución significativa de la calidad en la pintura.

Con respecto al cuarteamiento, ninguna de las alternativas presentó un comportamiento distinto al de la fórmula actual, es decir, no se evidencia cuarteamiento tal como se observa en la Figura 7. Además, la fórmula de la pintura clase A mate de uso exterior posee una cantidad de resina lo suficientemente alta que le permite tolerar los cambios de TiO_2 por cada uno de los exténderes evaluados, sin generar una pérdida en la elasticidad de la película de pintura.

Al evaluar los valores de cubrimiento proporcionados por las distintas alternativas y compararlos con la fórmula original se tiene que el extender 2,

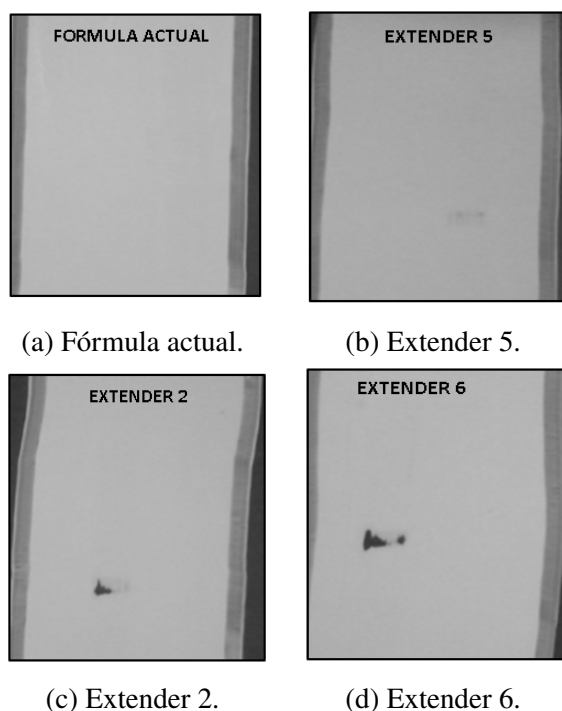


Figura 6: Prueba de resistencia al fregado aplicada a pintura de uso exterior clase A mate según fórmula actual y alternativas.

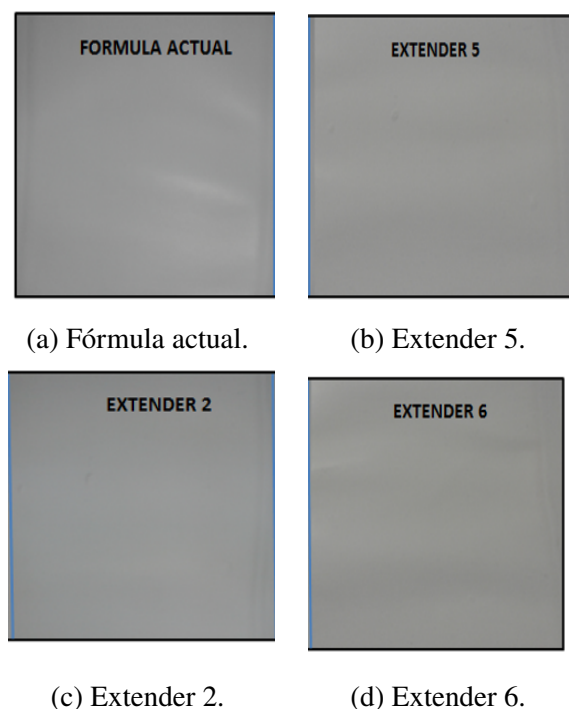


Figura 7: Prueba de cuarteamiento a 100mils aplicada a pintura de uso exterior clase A mate según fórmula actual y alternativas.

correspondiente a un carbonato de calcio, equipara la relación de contraste de la pintura con fórmula actual (extender 2: 97,7 %, fórmula actual: 97,6 %), seguido por el extender 5 con una relación de contraste de 97,53 % y por último, el extender 6 correspondiente al silicato de aluminio con un 96,8 % de cubrimiento, sin embargo, es necesario recordar que la concentración de los exténderes en las distintas alternativas son variables ya que para seleccionar el porcentaje de sustitución parcial del TiO_2 más adecuado, se aseguró el cumplimiento de especificaciones y no que las pinturas alcanzaran el comportamiento de la fórmula actual por lo que, el extender 6 se encuentra al 15 % de concentración masa/masa en sustitución parcial del TiO_2 y los exténderes 2 y 5 al 10 %, por lo que es razonable que el silicato de aluminio (extender 6) a pesar de sus características no presente el mejor cubrimiento.

3.7. Identificación del extender con mejor performance

De las tres alternativas propuestas para la pintura objeto de estudio clase A mate de uso exterior, la correspondiente al extender 6 silicato de aluminio, presentó el mejor comportamiento en cuanto a cubrimiento, porcentaje de blancura e índice de amarillez cuando se maximiza el porcentaje de sustitución parcial de TiO_2 . Este es el desempeño esperado ya que dicho extender posee un mayor índice de refracción y una forma de partícula laminar, siendo eficiente espaciando y redistribuyendo el dióxido de titanio en la pintura, a diferencia del resto de los exténderes estudiados los cuales poseen menor índice de refracción y una forma de partícula nodular. Referente al resto de las propiedades, las variaciones con respecto a la fórmula actual no generaron grandes impactos ya que en todos los casos se mantuvieron dentro de especificaciones. Debido a lo anterior, se considera que el silicato de aluminio es el extender con mejor performance en la pintura estudiada.

3.8. Evaluación de la influencia de la reducción del TiO_2 en la pintura látex clase A mate de uso exterior y de las sustituciones parciales estudiadas

La evaluación de la influencia de la reducción del dióxido de titanio en las reformulaciones propuestas se realizó con el fin de comprobar la funcionalidad de los exténderes como espaciadores del TiO_2 en la pintura objeto de estudio.

3.9. Evaluación del cubrimiento proporcionado por productos con cantidades de dióxido de titanio reducidas para Pintura clase A mate de uso exterior

Al reducir el contenido de TiO_2 en la formulación, sin incorporar los exténderes, se espera una reducción del poder cubriente, debido a que la pintura final se enriquece en cargas de bajo índice de refracción y tanto el cubrimiento en húmedo como en seco dependen de la diferencia existente entre los índices de refracción de los sólidos contenidos en la pintura y el medio, agua en el caso de la película húmeda y aire en la película seca [20].

La Tabla 10 presenta que el cubrimiento de la pintura clase A mate de uso exterior al reducirle un 10 % masa/masa de la concentración del dióxido de titanio, sin reemplazar por ningún extender en fórmula actual disminuye en un 5,1 % con respecto a la misma y un 4,0 % con respecto al valor mínimo requerido por especificaciones, mientras que al sustituir el pigmento blanco por alguno de los exténderes evaluados, la pintura mantiene un cubrimiento por encima de especificaciones, confirmando entonces que para esta pintura los exténderes utilizados cumplen sus funciones manteniéndolos dentro de requerimientos de calidad y proporcionándoles el cubrimiento adecuado.

4. Conclusiones

Los exténderes; E_2 carbonato de calcio, E_5 carbonato de calcio y E_6 silicato de aluminio presentaron los mejores índices de blancura y cubrimiento a mayor sustitución parcial del TiO_2 . Para las alternativas asociadas al uso de silicato de aluminio como extender de

Tabla 10: Comportamiento del cubrimiento proporcionado por la pintura de uso exterior mate clase A en las distintas pruebas realizadas.

Prueba	Propiedad	
	Radio contraste(%)	Δ (%)
RDT	92,5	5,1
E_6	97,40	0,2
E_2	97,70	0,1
E_5	97,50	0,1

Especificación: mínimo 96,5 %, F.actual: 97,6 %

RDT: reducción de TiO_2

Δ : variación del radio contraste respecto a la fórmula actual

la pintura clase A mate de uso exterior, la concentración adecuada en porcentaje masa/masa para sustituir el TiO_2 por dicho extender es de 15 %. Asimismo, para las alternativas asociadas al uso de carbonatos de calcio micronizado como extender de la pintura clase A mate de uso exterior, la concentración adecuada en porcentaje masa/masa para sustituir el TiO_2 por dicho extender es de 10 %. Finalmente al disminuir las concentraciones de TiO_2 en las pinturas, prueba RDT, sin realizar la sustitución parcial por algún extender, el cubrimiento proporcionado por estas se reduce hasta en un 5,1 % con respecto a la fórmula actual.

5. Recomendaciones

Aumentar la concentración en porcentaje masa/masa de TiO_2 a sustituir por el extender asociado al silicato de aluminio en la pintura clase A mate de uso exterior, con el fin de obtener el punto en el cual las propiedades comienzan a desmejorar puesto que durante esta investigación a concentraciones de 15 % masa/masa éste extender arrojó resultados muy favorables. Además realizar pruebas en las cuales se evalúe el comportamiento de los exténderes combinándose entre sí para conocer si es posible que los mismos puedan realizar entre ellos compensaciones en las propiedades fisicoquímicas de las pinturas, es decir, comprobar si la sinergia entre los materiales supera la individualidad.

6. Referencias

- [1] Fabiola Sevilla. Reformulación de pinturas latex clase A y B mediante la sustitución parcial de dióxido de titanio por nuevos exténderes. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Venezuela, 2018.
- [2] J. Calvo. *Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología*. Díaz de Santos. 1era edición, España, 2009.
- [3] A. Palet. *Tratado de Pintura. Color, Pigmentos Y Ensayo*. Ediciones Universidad de Barcelona, 1era edición, España, 2002.
- [4] J. Hill y D. Kolb. *Química para el nuevo milenio*. Editorial Pearson, 8va edición, España, 1999.
- [5] Yaprak Emek Inci, Koc Sibel, Eren Mesut and Gunbas I. Dogan. Effects of TiO₂ Partial Substitution by Various Extenders on Architectural Interior Paints. In *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Bostanci, 34742 Istanbul, Türkiye, 2017. (ISITES Baku-Azerbaijan) Nro.2.
- [6] R. Naranyan and K.V.S.N. Raju. *The Use of Calcined Clay in Organic Coatings and Polymers*. Indian Institute of Chemical Technology, Hyderabad, 1999.
- [7] I. Igwe and L. Ezeamaku. The use of local clays in alkyd paint formulations. *Malysian Polymer Journal*, pages 81–94, 2010.
- [8] Y. E. Bhoge, V. J. Patil, T. D. Deshpande, U. D. Patil and R. D. Kulkarni. Synthesis of Mica Doped Calcium Carbonate Filler for Partial Replacement of TiO₂ in Decorative Paint. In *India. International Conference on Global Trends in Engineering, Technology and Management (ICGTETM-2016)*, page 279, India, 2016.
- [9] Isaac O. Igwe, Gift Osuoha and Chinedu Nwapa. Characterization and Utilization of Eziulo Clay as an Extender in Emulsion Paint Formulations. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, pages 174–184, 2017.
- [10] Pinturas y productos afines. Determinación del contenido de material no volátil. 3^{ra} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 680. (Norma COVENIN 680:2008), Caracas, Venezuela, 2008.
- [11] Determinación de la viscosidad mediante el viscosímetro Stormer. Norma Venezolana FONDONORMA (NVF 684-2007), Caracas, Venezuela, 2007.
- [12] Sistemas acuosos. Determinación de pH. Norma Técnica FONDONORMA (NTF 676-2011), Caracas, Venezuela, 2011.
- [13] Pinturas, barnices, lacas y productos relacionados. Determinación de la densidad. 2^{da} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 737. (Norma COVENIN 737:1999), Caracas, Venezuela, 1999.
- [14] Pinturas y productos afines. Determinación de la relación contraste. 2^{da} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 3258. (Norma COVENIN 3258:1996), Caracas, Venezuela, 1996.
- [15] Pinturas y productos afines. determinación del grado de dispersión del sistema pigmento vehículo. 1^{era} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 1580. (Norma COVENIN 1580:1996), Caracas, Venezuela, 1996.
- [16] Pintura y barnices. Determinación de la brochabilidad y apariencia de la película. 3^{era} Revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 472. (Norma COVENIN 472-93), Caracas, Venezuela, 1993.
- [17] Pinturas y productos afines. Determinación de los tiempos de secamiento. Norma Venezolana FONDO-NORMA (NVF 690:2008), Caracas, Venezuela, 2008.
- [18] Pinturas. Determinación del grado de sedimentación. 2^{da} revisión. Comisión Venezolana de Normas Industriales 681. (Norma COVENIN 681:1996), Caracas, Venezuela, 1996.
- [19] W. Callister. *Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverté, 1era edition, 1996.
- [20] E. Schweigger. *Manual de pinturas y recubrimientos plásticos*. Editorial Díaz de Santos, 1era edition, 2005.

Characterization of an austenitic stainless steel AISI 304 H with 15 year in service exposed at high temperature

Franklin Acevedo^{*,a}, Laura Sáenz^b

^aÁrea de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bCentro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- The proposal of the present investigation is to characterize a stainless steel 304H exposed to high temperature (650 °C) for 15 years on service, highlighting Sigma phase precipitation study, changing the steel in an embrittlement material. We did a Charpy test, hardness evaluation of phase and matrix, as well as scanning electron microscopy (SEM) to evaluate the fracture surface, evaluation of the shape of the precipitate and X-ray energy dispersion spectrometry (EDX) to identify the chemical composition of phases and matrix. It have been determined in samples with the lowest impact toughness have elongated, grouped and very fine particles, evidencing that shape and its grouping, affects the tenacity, even the results of the impact toughness are above defined threshold for replacement, but the material presents zones of cleavage and secondary cracking, indicating that defined threshold does not guarantee to avoid a possible failure in service. The hardness in the precipitate is 33,2 % above of the austenite matrix that in addition to alignment of the particles and its shape, from the point of view of fracture mechanics, allows the formation and growth of cracks, affecting the impact toughness of the material, which it makes the stainless steel brittle. A grouping of the precipitates was evidenced, forming a kind of “rosary”, which progressively join and culminate forming a crack.

Keywords: stainless steel 304 H, intermetallic phases, sigma, embrittlement, impact toughness.

Caracterización de un acero inoxidable 304 H expuesto a elevada temperatura por 15 años de servicio

Resumen.- El propósito de la presente investigación es caracterizar un acero inoxidable 304H expuesto a elevada temperatura (650°C) por 15 años de servicio, resaltando el estudio de la precipitación de fase sigma, convirtiendo el acero en un material frágil. Se realizó ensayo Charpy para evaluar la tenacidad al impacto, se utilizó Microscopía Óptica para identificar los precipitados y medición de dureza tanto a la fase como a la matriz, así mismo, se realizó Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para evaluar la superficie de fractura, realizar evaluación de la forma del precipitado y Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX) para identificar la composición química de las fases y matriz. Se determinó que las muestras con la menor tenacidad de impacto tienen partículas alargadas, agrupadas y muy finas, evidenciando que la forma y su agrupación, afecta la tenacidad, incluso los resultados de la tenacidad de impacto están por encima del umbral definido para reemplazo, pero el material presenta zonas de clivaje y agrietamiento secundario, indicando que el umbral definido no garantiza evitar una posible falla en servicio. La dureza en el precipitado, es 33,2 % por encima de la dureza de la matriz austenita que en adición a la alineación de las partículas y su forma, desde el punto de vista de mecánica de la fractura, permite la formación y crecimiento de grietas, afectando la tenacidad al impacto del material, lo que hace el acero inoxidable frágil. Se evidenció un agrupamiento de los precipitados, formando una especie de “rosario”, los cuales progresivamente se unen y culminan formando una grieta.

Palabras claves: acero inoxidable grado 304 H; fase sigma; fragilización; tenacidad de impacto.

Recibido: septiembre 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

El acero inoxidable 304H es un material utilizado para aplicaciones de elevada temperatura (650°C), debido a su alta resistencia a mecanismos de deterioro como stress corrosion cracking, corrosión por ácidos poliónicos, creep, fragilización por fase sigma etc, los cuales son usualmente

*Autor para correspondencia:

Correo-e:acevedofo@gmail.com (Franklin Acevedo)

utilizados en la industria petrolera en las plantas de Craqueo Catalítico (FCC), específicamente en el circuito asociado al sistema de Regeneración. Para el desarrollo de esta investigación, se tomaron 5 muestras asociadas a una tubería fabricada de acero inoxidable 304 H que estuvo en servicio por 15 años a una operación continua a 650°C, de las cuales se mecanizaron 3 probetas por muestra para hacer ensayo de impacto, totalizando un universo de 15 probetas.

Chih-Chun Hsieh et al [1] indica que la fase Sigma puede incrementar la dureza y disminuir la tenacidad de impacto, así como también la deformación ingenieril. La fase σ , se origina por la transformación de la ferrita (δ ferrita a fase σ). Cuando la ferrita se transforma en σ , la fase σ precipita en la región de alta concentración de cromo en la δ -ferrita. La fase σ puede precipitar en la γ -austenita cuando no se tiene δ -ferrita. La fragilización por fase sigma ha sido profundamente estudiada, Calmunger et al [2] concluye que la iniciación y propagación de la fractura en aceros inoxidables austeníticos es muy local, y se comportan diferentemente en esos materiales a elevada temperatura debido a las diferentes composiciones químicas afectando nucleación, crecimiento y forma de los precipitados de segunda fase (fase sigma). La cantidad y forma, tienen efecto importante en la energía absorbida donde la forma de aguja propicia una baja tenacidad de impacto.

Un estudio anterior realizado por los autores, denominado: “Estudio de la fragilización de un acero inoxidable austenítico AISI 304 H con 15 años de servicio expuesto a elevada temperatura” [3] determinó que conociendo la cantidad y forma del precipitado, su agrupación y la dureza, se predice la tenacidad de impacto del acero inoxidable, lo que proporciona una herramienta valiosa para el estudio de integridad mecánica de componentes fabricados de acero inoxidable AISI 304H y que están expuestos a operación continua a elevada temperatura. La degradación metalúrgica del acero inoxidable debido a la precipitación de fase Sigma/Chi, presenta un comportamiento logarítmico indicando que la tenacidad de impacto presenta una disminución

brusca en función a la aceleración del deterioro, es decir pierde la capacidad de deformarse plásticamente y por ende una alta probabilidad de ocurrencia de una falla frágil en sistemas operacionalmente críticos, por tanto debe ser monitoreada rutinaria y rigurosamente en el ámbito industrial, resaltando su importancia de monitorear mediante una metodología “in situ” basados en ensayos no destructivos.

El propósito de la presente investigación es caracterizar un acero inoxidable 304H expuesto a elevada temperatura (650°C) por 15 años de servicio, resaltando el estudio de la precipitación de fase sigma, convirtiendo el acero en un material frágil.

2. Metodología

2.1. Ensayo Charpy

Se fabricaron 3 probetas de impacto Charpy en V de cada una de las 5 muestras tomadas, totalizando 15 probetas, las cuales cumplen con las dimensiones definidas en la norma ASTM E 23-90 [4], tal y como se muestra en la Figura 1.

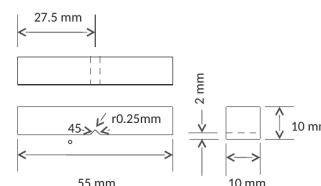


Figura 1: Dimensiones de las probetas de impacto Charpy según ASTM E-23.

2.2. Microscopía Óptica

Las muestras serán preparadas metalográficamente por el método del desbaste grueso, medio y fino respectivamente mediante Desbastadora gruesa marca LECO modelo BG-30 con lija de banda de 80 grit y Desbastadora fina marca LECO modelo DS-20 con lijas de: 240, 320, 400 y 600 grit y pulir mediante pulidora marca BUEHLER modelo Beta - Twin Variable Speed GrinderPolisher. El reactivo de ataque utilizado es NaOH, tal y como lo describe en la ASTM E 407 [5], atacando electrolíticamente a 2 V por 20 segundos. Para la microscopía óptica, se utilizó microscopio marca OLYMPUS modelo PMG3.

2.3. Dureza

Para la medición de dureza en la fase y la matriz, se utilizó durómetro Vickers marca BUEHLER, Modelo 1104, Carga: 10 – 1000 grF, Indentador: Vickers.

2.4. Microscopía Electrónica de Barrido

Mediante un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM-6390, se realizó análisis fractográfico a las zonas de fractura de las probetas Charpy y análisis de la forma del precipitado. Es importante aclarar que las muestras fueron preparadas con la misma metodología presentada para microscopía óptica.

2.5. Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX)

El microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM-6390 tiene instalado un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X marca Inca X sight modelo 7582, el cual permitió realizar análisis químico a las fases encontradas y a la matriz del material.

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayo Charpy

El ensayo de impacto es utilizado para medir la tenacidad del acero y a su vez para definir el grado de fragilización del material, en la Tabla 1, se muestra los resultados de impacto a las 15 probetas, siendo el mínimo resultado individual de 24,8 J en la muestra C, así mismo se obtuvo el menor promedio de las 5 muestras, con 27,40 J.

Tabla 1: Resultado de ensayos Charpy.

M	Energía absorbida en probeta (J)			
	1	2	3	Promedio
A	31,30	29,10	39,00	33,13
B	25,70	27,80	26,70	26,73
C	28,70	24,60	28,90	27,40
D	30,50	27,50	24,80	27,60
E	35,70	46,80	50,50	44,33

M: muestra

Estos resultados están por encima del umbral definido por Haun et al [6], el cual indica que

el criterio de reemplazo es el siguiente: el valor promedio de un juego de 3 muestras no debe ser menor de 20 J, pero ningún valor particular menor a 13 J.

3.2. Microscopía Óptica

Con el ataque utilizado (NaOH) a las probetas de acero inoxidable 304 H, en la microscopía óptica, se muestra la fase sigma, siendo ésta una fase FeCr de alta dureza que fragiliza el acero, tal y como se observa en las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6. En el análisis realizado a las micrografías en 100X de las muestras A, B, C, D, y E, se evidencia que los precipitados de las muestras B, C y D, las cuales presentaron la menor tenacidad de impacto, muestran precipitados agrupados, con una forma tipo aguja, es decir, partículas alargadas y muy finas que se alinean formando una especie de “rosario”, siendo en menor grado en la muestra A y aun menor en la muestra E, siendo correlativo con los resultados del ensayo Charpy, las cuales resultaron 33,13 J y 44,33 J respectivamente. El promedio de la tenacidad de impacto de las muestras B, C y D es de 27,24 J, estando la muestra A, 21,6 % por encima de este promedio y la muestra E, 62,71 %, indicando que la forma y la agrupación del precipitado afecta la tenacidad de impacto, evidentemente porque la fase sigma es una partícula muy dura que tiende a formar grietas y un plano de fractura.

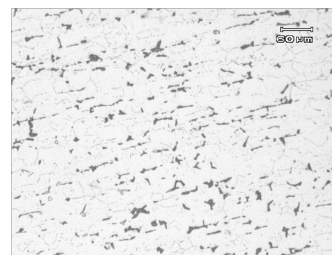


Figura 2: Micrografía muestra A (100x).

3.3. Dureza

Se midieron 3 valores de dureza en la matriz y 3 valores de dureza en la fase por cada muestra extraída, de manera de disponer la data suficiente para determinar la dureza de la fase

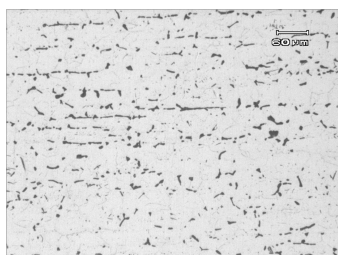


Figura 3: Micrografía muestra B (100x).

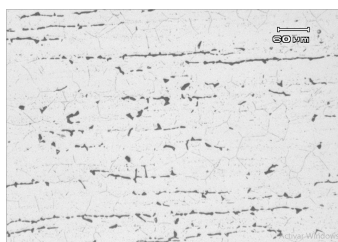


Figura 4: Micrografía muestra C (100x).

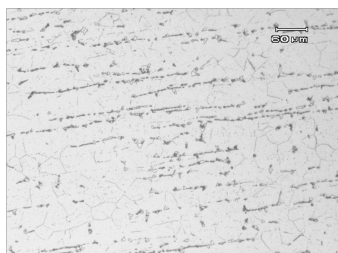


Figura 5: Micrografía muestra D (100x).

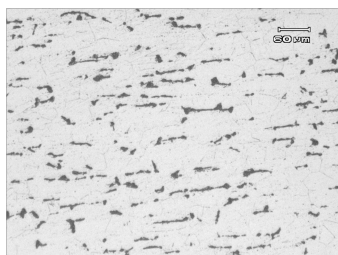


Figura 6: Micrografía muestra E (100x).

Tabla 2: Resultado de ensayos Dureza.

Muestra	Prom. Dureza Matriz (HV)	Prom. Dureza Fase (HV)
A	214,3	267,8
B	209,9	257,3
C	216,2	287,4
D	174,8	259,5
E	196,1	275,2

Sigma, obteniéndose en promedio los resultados mostrados en la Tabla 2.

En total la dureza en la fase se ubicó en el orden de 269,4 HV, estando 33,2 % por encima de la dureza de la matriz austenita de 202,3 HV. La máxima dureza obtenida, se obtuvo en la muestra C con 287,4 HV.

En las Figuras 7, 8, 9 y 10, se muestra algunas micrografías en el proceso de medición de dureza tanto en la matriz como en la fase.

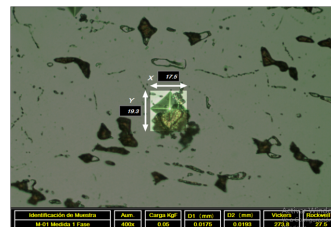


Figura 7: Medición de dureza en la fase de la muestra A.

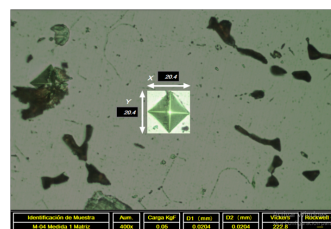


Figura 8: Medición de dureza en la fase de la muestra B.

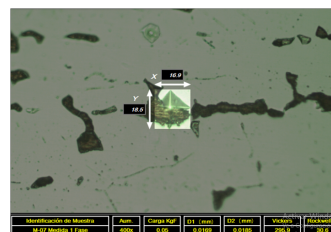


Figura 9: Medición de dureza en la fase de la muestra C.

Es importante acotar que aunque el promedio de dureza de la fase sigma es 33,2 % en todo el universo de identaciones realizadas por encima de la dureza de la matriz, la muestra D presenta la diferencia de dureza entre matriz y fase, por el orden del 48,5 %.



Figura 10: Medición de dureza en la matriz de la muestra C.

3.4. Microscopía Electrónica de Barrido

En el microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM-6390, se realizó análisis fractográfico a las zona de fractura de las probetas Charpy, obteniéndose tipo de fractura frágil debido a la presencias de zonas de clivaje y agrietamiento secundario. Este aspecto es de interés para la mecánica de la fractura, por cuanto los resultados del ensayo de impacto indican valores promedios sobre los 20 J y ningún valor individual menor o igual a 13 J, sin embargo, la fractografía evidencia agrietamiento que en función de su crecimiento, cambiará el resultado de la tenacidad y por ende un material más frágil.

Indiscutiblemente que un acero inoxidable degradado metalúrgicamente por fases intermetálicas, presente una tenacidad de impacto promedio superior a 20 J, no asegura que no esté en presencia de grietas, las cuales pueden colocar en riesgo la integridad física y funcional del activo, tal y como se evidencia en las Figuras 11, 12, 13, 14 y 15.

Es destacable que la muestra E que en promedio se obtuvo una tenacidad de impacto de 44,33 J, la fractografía muestra también microgrietas y zonas de clivaje (maclas), lo que manifiesta una situación compleja desde el punto de vista de integridad, por cuanto con resultados de tenacidad de impacto por encima del doble del umbral de referencia (20 J), existen microscópicamente agrietamiento y zonas de falla frágil.

Un aspecto que se profundizó en la presente investigación, hace referencia a la forma de la partícula, esta forma hace que el resultado de la tenacidad de impacto cambie, esto debe entenderse desde el punto de vista de mecánica de la fractura. El precipitado por su naturaleza, es más duro que la matriz, y su forma de aguja o puntiaguda favorece

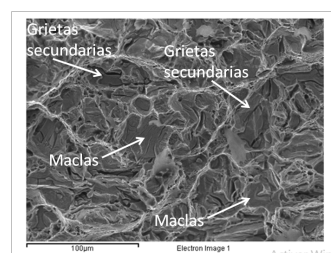


Figura 11: Fractografía Muestra A.

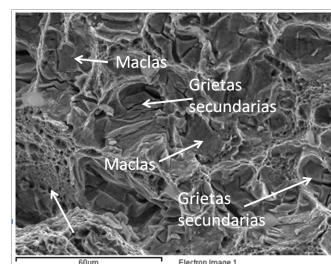


Figura 12: Fractografía Muestra B.

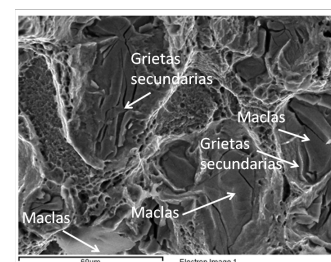


Figura 13: Fractografía Muestra C.

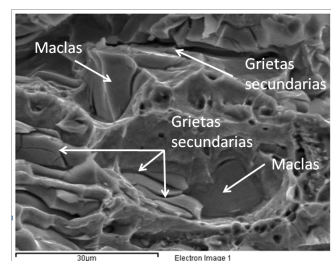


Figura 14: Fractografía Muestra D.

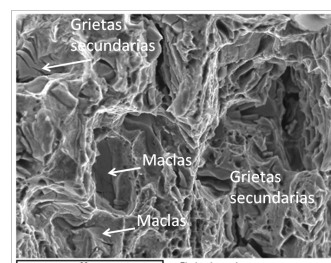


Figura 15: Fractografía Muestra E.

al plano de fractura, así mismo, en las micrografías se observa un agrupamiento de los precipitados, formando una especie de “rosarios”, este aspecto, propicia un interés especial en la investigación, por cuanto la agrupación de precipitados duros, en forma de aguja, que progresivamente, se unen, culminan formando una grieta y por ende una falla frágil en el sistema. En lo sucesivo, se mostrarán las tomas realizadas en el microscopio electrónico de barrido usando la metodología SEI (secondary electron image), éste provee información sobre la morfología y topografía de la superficie. El contraste es dominado por el efecto del resalte: muchos electrones secundarios pueden salir de la muestra en los resaltes que en las áreas planas donde se incrementa la brillantez, así mismo se utilizó la metodología BES (back scattered electron), la cual provee una interacción de un haz de electrones sobre la muestra que produce una variedad de colisiones elásticas e inelásticas entre electrones y átomos, permitiendo la identificación de fases en el material estudiado, complementando de esta manera el estudio realizado por Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX). En las Figuras 16 y 17, se observa la misma captura, aplicando del microscopio electrónico de barrido, la metodología BES y SEI, en ambas se puede observar la agrupación y alineación de los precipitados, la Figura 16 se observa mediante BES, partículas de color blanco, siendo predominante una fase y que posteriormente en las figuras subsiguientes, se observará detalladamente los precipitados.

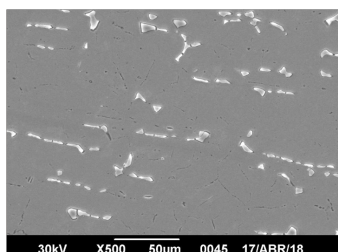


Figura 16: Micrografía de muestra A evaluada mediante back scattered electron (500x).

En la Figura 17, se observa mediante SEI, partículas de color negro, mostrando la topografía

de la zona estudiada, resaltando la zona delimitada entre la partícula y de la matriz.

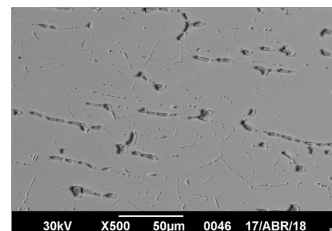


Figura 17: Micrografía de muestra A evaluada mediante secondary electron image (500x).

En la Figura 18, se observa una micrografía a 3500X de una partícula en la muestra A, la partícula es alargada, con extremos puntiagudos, y muestran un claro proceso de alineación. Otro aspecto importante, es que existe preponderancia de una zona color blanco y existe en menor área, en el límite de la partícula, una zona de color negro, evidentemente con una composición química diferente que posteriormente, se identificará en el EDX.

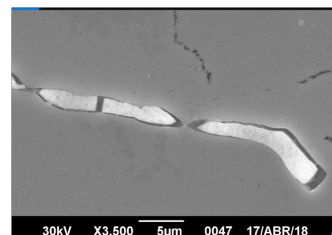


Figura 18: Micrografía de muestra A evaluada mediante back scattered electron (3500x).

La alineación de las partículas y su forma, en adición con la alta dureza de la partícula, desde el punto de vista de mecánica de la fractura, permite la formación y crecimiento de grietas, afectando la capacidad de absorber energía o la tenacidad al impacto del material, lo que hace el acero inoxidable frágil.

En la Figura 19, se muestra otra partícula, esta vez, de la muestra B, se observa un comportamiento similar a la partícula presentada de la muestra A. Es importante prestar la debida atención a la zona donde se unen las partículas, mostradas de color negro en el BSE.

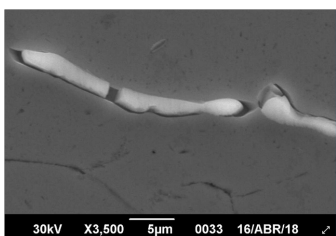


Figura 19: Micrografía de muestra B evaluada mediante back scattered electron (3500x).

En una captura realizada en el estudio de la muestra D (ver Figura 20), se observó mediante SEI, dos partículas con los extremos puntiagudos, especialmente un filamento, con tendencia a unirse a la partícula vecina, esto nos permite indicar que la tendencia de las partículas es a unirse, como un proceso similar al conocido en termofluencia como la formación del rosario.

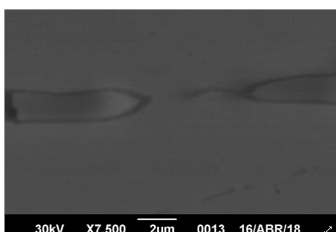


Figura 20: Micrografía de muestra D evaluada mediante secondary electron image (3500x).

En la Figura 21, se observan tres partículas de la muestra C a 3500X, estas partículas se unen, y la zona oscura de forma puntiaguda une las zonas claras. En la Figura 22, se observa con un acercamiento de 10000X, para una mejor visualización de la unión de ambas zonas.

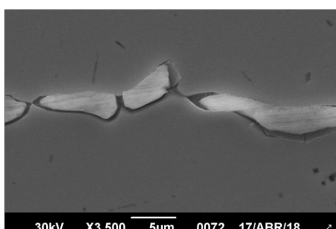


Figura 21: Micrografía de muestra C evaluada mediante back scattered electron (3500x).

Para identificar la composición química de la zona clara y oscura, así como la matriz del acero

inoxidable 304 H, se realizó espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX).

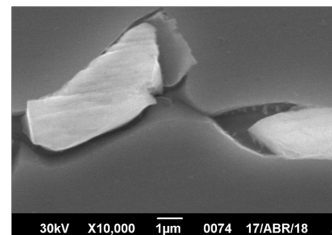


Figura 22: Micrografía de muestra C evaluada mediante back scattered electron (10000x).

3.5. Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX)

Para realizar una apropiada aproximación de la composición química de las zonas, se tomaron 17 partículas, de las cuales cuatro (4) están asociadas a la muestra D, tres (3) a la muestra C, tres (3) a la muestra A, tres (3) a la muestra B y cuatro (4) a la muestra E y en cada partícula, se midieron entre 10 a 15 puntos, por lo que se analizaron más de 200 puntos, distribuidos entre la zona clara, oscura y matriz, la zona clara es predominante y la zona oscura se ubica en el límite de la partícula. En las Figuras 23, 24 y 25, se observa a manera de ejemplo, la ubicación de los puntos analizados.

En la Tabla 3, se detallan los resultados de la composición química de la zona clara, así mismo, en la Tabla 4, se muestra los resultados de la zona oscura.

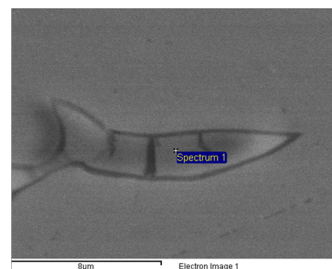


Figura 23: Zona clara de la partícula en muestra D, evaluada mediante espectrometría de dispersión de energía de rayos X.

La zona clara y oscura, sumando el Cr y Fe, se obtienen 93,32 % y 93,16 % respectivamente, adicionalmente las cantidades de Níquel y

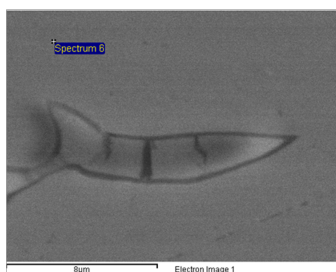


Figura 24: Matriz en muestra D evaluada mediante espectrometría de dispersión de energía de rayos X.

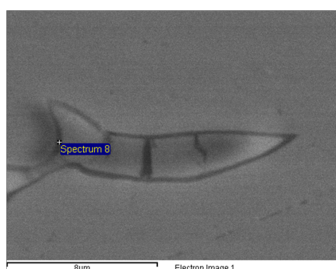


Figura 25: Zona Oscura en muestra D evaluada mediante espectrometría de dispersión de energía de rayos X.

Tabla 3: Composición química de la zona clara.

Elemento	Promedio (%)
Cr	24,09
Fe	69,23
Ni	5,38
Mo	1,30
Total	100,00

Tabla 4: Composición química de la zona oscura.

Elemento	Promedio (%)
Cr	26,56
Fe	66,59
Ni	5,81
Mo	1,03
Total	100,00

Molibdeno son muy similares en ambos casos. Analizando la composición química de la zona clara, detallada en la Tabla 3, la composición corresponde a ferrita, que presenta mayor cantidad de Fe y menos cantidad de Cr que la zona oscura ubicada en los límites de la partícula, siendo

ésta correspondiente a la fase Sigma. Villalobos et al [7], describe el cambio microestructural en un acero inoxidable dúplex SAF 2507 producido ciclos térmicos, en donde se caracterizó la fase ferrítica, la fase austenítica y la fase Sigma, presentando un análisis por BSE y EDX, logrando determinar la composición química de la ferrita y de la fase Sigma, siendo similares a los resultados del presente trabajo. La fase Sigma nuclea en el límite de grano, condición observada en el análisis de las partículas por microscopia electrónica de barrido (MEB). Es importante resaltar que la fase Sigma es una fase intermetálica que aparecen en el acero inoxidable austenítico 304 H, en un rango de temperatura de formación de 600 a 1000°C, coincidiendo con la temperatura de operación de la tubería donde se extrajeron las muestras (650°C).

La Figura 26, muestra el comportamiento del Fe a lo largo de la partícula, la cual es máxima en la matriz austenita con 73,18 %, disminuye en la ferrita hasta 69,23 % hasta alcanzar 66,59 % en la fase sigma. Igualmente, el comportamiento del Cr, se muestra en la Figura 27, siendo máxima en la fase sigma con 26,56 %, disminuye en la ferrita a 24,06 % y es mínima en la matriz austenita con 18,16 %.

En la Figura 28 y 29, se observa el comportamiento del Níquel y del Molibdeno, resaltando que el Molibdeno tanto de la ferrita como de la fase sigma, presentan valores similares (1,3 % vs 1,03 %). En la Tabla 5, se indica la composición química de la matriz, siendo demostrativa de un acero inoxidable austenítica.

Tabla 5: Composición química de la matriz.

Elemento	Promedio (%)
Cr	18,16
Fe	73,18
Ni	8,38
Mo	0,28
Total	100,00

4. Conclusiones

Las muestras con la menor tenacidad de impacto tienen partículas alargadas, agrupadas y muy finas,

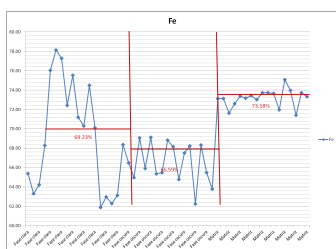


Figura 26: Resultados Fe- Zona Clara, Zona Oscura, Matriz.

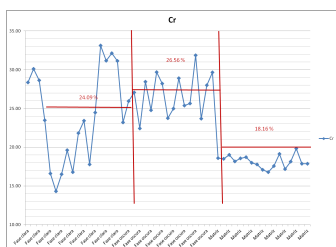


Figura 27: Resultados Cr- Zona Clara, Zona Oscura, Matriz.

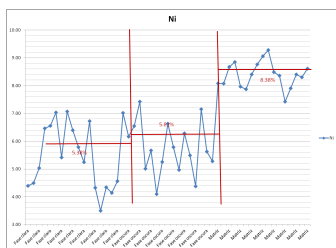


Figura 28: Resultados Ni- Zona Clara, Zona Oscura, Matriz.

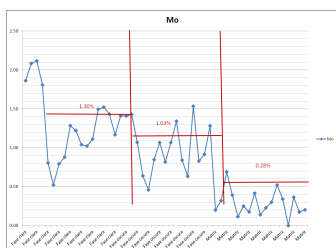


Figura 29: Resultados Mo- Zona Clara, Zona Oscura, Matriz.

evidenciando que la forma y su agrupación, afecta la tenacidad.

Los resultados de la tenacidad de impacto están por encima del umbral definido para reemplazo, aun cuando el material presenta zonas de clivaje y agrietamiento secundario, indicando que el umbral definido no garantiza evitar una posible falla en

servicio.

La dureza en el precipitado, se ubicó en el orden de 269,4 HV, estando 33,2 % por encima de la dureza de la matriz austenita de 202,3 HV, que en adición a la alineación de las partículas y su forma, desde el punto de vista de mecánica de la fractura, permite la formación y crecimiento de grietas, afectando la tenacidad al impacto del material, lo que hace el acero inoxidable frágil.

Se evidenció un agrupamiento de los precipitados, formando una especie de “rosarios”, los cuales progresivamente se unen y culminan formando una grieta, fragilizando en material.

Se utilizó la metodología BES y EDX para identificar las fases, determinándose que la partícula es fundamentalmente ferrita con fase sigma en el límite de grano.

5. Referencias

- [1] Chih-Chun Hsieh and Weite Wu. Overview of intermetallic sigma. *ISRN Metallurgy*, 2012:1–16, 2012.
- [2] Mattias Calmunger, Guocai Chai, Sten Johansson, and Johan Moverare. Influence of high temperature ageing on the toughness of advanced heat resistant materials. In *13th International Conference on Fracture (ICF13)*, pages 1–8, Beijing, China, 2013.
- [3] Franklin Acevedo and Laura Sáenz. Estudio de la fragilización de un acero inoxidable austenítico aisi 304h con 15 años de servicio expuesto a elevada temperatura. *DYNA - Ingeniería e Industria*, 93(4):428–434, 2018.
- [4] ASTM. ASTM E 23, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, 2014.
- [5] ASTM. ASTM E 407-07, Standard practice for microetching metals and alloys, 2011.
- [6] Jorge L. Hau and Antonio Seijas. Sigma phase embrittlement of stainless steel in FCC service. In *CORROSION NACExpo 2006 61st Annual Conference & Exposition*, number 06578, pages 2–22. NACE International, 2006.
- [7] D. Villalobos, A. Albiter, and C. Maldonado. Microstructural changes in SAF 2507 superduplex stainless steel produced by thermal cycle. *Revista Matéria*, 14(3):1061–1069, 2009.

Study of the useful life of a submerged cutting tool to a cryogenic treatment in the machining of parts of steel AISI 1045.

Luis Sidorovas^{*,a}, Ron Francisco^b, Ivan Ramones^b.

^aCentro de Investigación de Materiales CIM, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo.

^bEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

Abstract.- The effect of the cryogenic thermal treatment with Liquid Nitrogen at -194°C was studied in the useful life of a cutting tool (VUHC) T-2000. Starting from the theoretical foundation, that the cryogenic thermal treatment improves the mechanical properties of hardness, maximum resistance and impact resistance of the material; with a slight decrease in the tenacity of impact, negligible before the improvements produced to the HC. The methodology is to perform the machining tests on the AISI 1045 steel specimens with a diameter of 2 inches. With a HC of T-2000 fast steel until reaching the criterion of wear in all possible arrangements to determine the VUHC according to ISO 3685- 1993. The results showed how the mechanical properties of the HC are improved with a cryogenic treatment. There was a prolongation of the VUHC in HC that previously had a cryogenic thermal treatment in relation to HC without treatment. In conclusion, the results are consistent with the wear theory of the HC and also showed an improvement in the mechanical properties of the HC where increases were achieved up to four times of the VUHC with a cryogenic thermal treatment.

Keywords: thermal treatment; cryogenics; useful life; machining.

Estudio de la vida útil de una herramienta de corte sometida a un tratamiento criogénico en el mecanizado de piezas de acero AISI 1045

Resumen.- Se estudió el efecto del tratamiento térmico criogénico con Nitrógeno Líquido a -194°C , en la vida útil de una herramienta de corte (VUHC) T-2000. Partiendo del fundamento teórico, de que el tratamiento térmico criogénico mejora las propiedades mecánicas de dureza, resistencia máxima y resistencia al impacto del material; con una leve disminución en la tenacidad de impacto, despreciable ante las mejoras producidas a la HC. La metodología para realizar los ensayos de mecanizado a las probetas del acero AISI 1045 con un diámetro de 2 pulgadas. Con una HC de acero rápido T-2000 hasta alcanzar el criterio de desgaste en todos los arreglos posibles para determinar la VUHC según la Norma ISO 3685- 1993. Los resultados demostraron como se mejoran las propiedades mecánicas de la HC con un tratamiento criogénico. Se evidenció una prolongación de la VUHC en la HC que tenían previamente un tratamiento térmico criogénico en relación con las HC sin tratamiento. Como conclusión los resultados son consistentes con la teoría de desgaste de las HC y además se evidenció una mejora en las propiedades mecánicas de la HC donde se lograron aumentos hasta de cuatro veces la VUHC con un tratamiento térmico criogénico.

Palabras claves: tratamiento térmico; criogenia; vida útil; mecanizado.

Recibido: julio 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

Actualmente es importante no sólo el uso racional de los recursos en los procesos de producción, donde se relacionan los costos

de operación con la competitividad, eficiencia, productividad y estos factores inciden en la eficacia y en uso de una manufactura de calidad y oportunidad. En los procesos de fabricación de piezas y partes por un proceso de mecanizado en tornos, donde la vida útil de la herramienta de corte (VUHC) incide directamente en los costos de estos procesos de mecanizado. La presente investigación se basa en el estudio de la influencia en la VUHC de un acero extra rápido (HSS, T-2000), al ser sometida a un tratamiento térmico criogénico en

* Autor para correspondencia:

Correo-e:lsidorovas@gmail.com (Luis Sidorovas)

el mecanizado de piezas de acero AISI 1045, el cual ofrece ventajas de prolongar su vida útil y por consiguiente se puede garantizar menores costos en procesos de fabricación de elementos y piezas mecánicas, con un menor esfuerzo del operario al mejorar las condiciones del corte, influyentes entre otros en el proceso industrial.

Al revisar las investigaciones sobre el efecto de un tratamiento térmico criogénico, con el cual se mejoran las propiedades de resistencia al desgaste, abrasión y dureza de la HC utilizada en el proceso de mecanizado, se pudo obtener evidencia sustentable al comparar los resultados de los ensayos experimentales utilizando una HC con recubrimiento de cobalto sin tratamiento térmico criogénico (STTC) y otra igual pero con un tratamiento térmico criogénico (CTTC), por lo que al comparar los resultados, permitirá interpretarlos para realizar la discusión de donde se construirán las conclusiones de la investigación al observar y analizar el comportamiento de la HC en el proceso de mecanizado según la Norma ISO 3685. 93 [1]. Los ensayos de VUHC se realizaron en un taller metalmecánico, con un torno paralelo donde se obtuvieron los datos sobre la VUHC sin y con tratamiento térmico criogénico.

De tal modo que el presente trabajo estuvo orientado a contribuir con la optimización de procesos de mecanizado, debido a que el tiempo de mecanizado guarda una relación directa con el costo de producción, la VUHC es un parámetro importante al momento de determinar el costo del proceso, hoy en día difícil de mantener y obtener en óptimas condiciones. Así como también un aporte significativo a las teorías de las propiedades de los materiales, como mejorarlos al comportamiento y desgaste de las HC de aceros extra rápidos (HSS).

2. Metodología o Desarrollo de la Investigación

Para el estudio se utilizó un acero al carbono AISI 1045, la composición química del material se muestra en la Tabla 1, en barras de 2 pulgadas de diámetro y 3 metros de longitud.

El objetivo principal fue evaluar el efecto de un tratamiento térmico criogénico en la vida útil

Tabla 1: Propiedades químicas del acero al carbono AISI 1045.

	Porcentaje de cada elemento				
	C	S	P	Si	Mn
Mínimo	0,43	---	---	0,15	0,60
Máximo	0,50	0,35	0,040	0,35	0,90

de una herramienta de corte (VUHC) para ser utilizada en el mecanizado de piezas de acero AISI 1045. Según Groover define la VUHC es el periodo de tiempo de corte en el cual se puede utilizar la herramienta de corte en operación hasta que falla [2]. Previamente se le realizó un tratamiento térmico criogénico a la HC para mejorar las propiedades de resistencia al desgaste, a la abrasión y dureza del material de la herramienta de corte [3].

Para evaluar la VUHC fue preciso realizar una serie de procedimientos los cuales se describen a continuación.

a.1 Se realizó una investigación bibliográfica y documental sobre la VUHC, para establecer los parámetros del proceso experimental.

a.2 Adquisición del material a ensayar. Se considero un acero AISI 1045 por su disponibilidad, costo y propiedades.

a.3 Los ensayos de vida útil se realizaron en un torno paralelo marca “VOEST”. Con una longitud de bancada de 3,5 metros, un ancho de 1,5 metros, una altura de 1,7 metros y un peso de 7000 kg, mediante un proceso de manufactura en el cual se usa una HC para remover material de una pieza de trabajo: La acción de corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta, que produce la geometría final, las dimensiones y el acabado de la pieza [2].

a.4 Se hizo una revisión general del estado del Torno. Después se realizó una prueba piloto para establecer los parámetros adecuados para el ensayo de VUHC. Esta prueba piloto consistió en torneear mediante un proceso de cilindrado la pieza de acero AISI 1045 durante un intervalo de 10 minutos y luego para medir el desbaste de Flanco (V_B), se requiere desmontar la HC para observarla en un Perfilómetro marca MITUTOYO, modelo PJ2500, con aumento de 20X a 50 X. Este procedimiento

se realizó tantas veces como fue necesario hasta alcanzar el criterio de desgaste de flanco de la HC T-2000 en condiciones originales. Posteriormente se realizan los ensayos de mecanizados con una HC del mismo material pero con un tratamiento térmico criogénico adicional para determinar la VUHC con tratamiento criogénico y comparar los dos resultados hallados.

a.5 Con los resultados anteriores se determinan los parámetros de corte definitivos: velocidad de corte (V_c), avance (f) y profundidad de corte (d) que se usaron en los diferentes ensayos de VUHC. Se realizó un ensayo preliminar de VUHC para establecer una referencia general del tiempo de duración de la HC.

a.6 Se inspeccionó el estado de la HC de acero extra rápido T-2000, con ángulos de: incidencia (α): 5 grados, filo o talla (β): 73 grados y ataque (γ): 12 grados, cuyos valores estándares son asignados para el mecanizado de acero al carbono, este procedimiento se efectuó antes del inicio de cada prueba, lo cual sirvió de referencia en posteriores mediciones del desgaste de flanco (V_B), debido a que se hizo a partir del filo original de corte.

a.7 Se realizaron los mecanizados con los valores previamente asignados de los parámetros de corte establecidos, se asignaron valores iniciales al experimento tomando en cuenta el criterio de desgaste de la HC previamente establecido. Se desarrolló el procedimiento experimental del mecanizado de las piezas de acero AISI 1045 para el caso con una HC con recubrimiento de cobalto en su estado original y en el otro caso con tratamiento térmico criogénico en el mecanizado de acero 1045.

a.8 Durante el procedimiento experimental del mecanizado de las piezas se llevó a cabo la respectiva tabulación de resultados del ensayo, a través de los datos arrojados por el experimento.

a.9 Al disponer de los resultados de los ensayos de VUHC para el caso de la herramienta de corte en estado original y de la herramienta de corte con tratamiento térmico criogénico se realizó la comparación de los mismos para interpretar y analizar estos resultados obtenidos en el ensayo VUHC.

a.10 Las conclusiones se forman del proceso de comparar, interpretar, discutir y analizar los resultados obtenidos del estudio.

3. Análisis y Discusión de los Resultados

Inicialmente se consideró un criterio de desgaste de 0,3 mm [4], con tres niveles de velocidades: $V_{c1} = 26,394$ m/min; $V_{c2} = 36,380$ m/min y $V_{c3} = 38,380$ m/min. Además de un avance de la HC ($f = 0,08$ mm/rev) y una profundidad de corte ($d = 1,5$ mm). Con estos parámetros se realizó el ensayo de mecanizado con f y d constantes para cada nivel de velocidad de corte V_c y se obtuvieron los siguientes datos que se registran en la Tabla 2. Desde la cual se parte para graficar los datos y obtener las gráficas de la Figura 1.

Tabla 2: Desgaste en función de la velocidad de corte y el tiempo para $f = 0,08$ mm/rev y $d = 1,5$ mm.

Tiempo (min)	Velocidad (m/min)		
	26,394	36,380	38,902
0	0,0	0,0	0,0
10	0,09	0,145	0,208
20	0,11	0,239	0,369
30	0,19	0,364	---
40	0,27	---	---
50	0,338	---	---

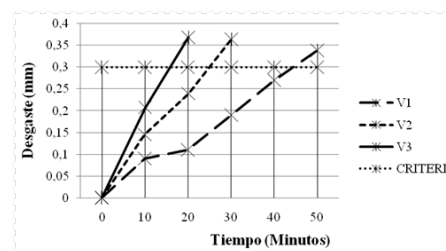


Figura 1: Desgaste en función de la Velocidad de Corte ($f = 0,08$ mm/rev y $d = 1,5$ mm).

Se observa en la Figura 1 que para una $V_c = 26,394$ m/min, el criterio de desgaste se alcanza a los 45 minutos por lo que la VUHC tiene un tiempo de 45 minutos de duración. En el caso de una $V_c = 36,380$ m/min, el criterio de desgaste se alcanza a los 25 minutos por lo que la VUHC es de 25

minutos de duración. Y en el último caso una $V_c = 38,902$ m/min, el criterio de desgaste se alcanza a los 16 minutos por lo que la VUHC tiene un tiempo de 16 minutos de duración.

Esto es consistente con los fundamentos teóricos [5, 6, 4] que establecen que al disminuirla velocidad de corte se incrementa la VUHC y al aumentar la velocidad de corte se disminuye la VUHC [2]. Donde se observó que al aumentar la velocidad de corte en el proceso de mecanizado se evidenció una disminución proporcional de la VUHC relacionada con la velocidad de corte, en este caso disminuye de 45 a 25 y luego hasta 16 minutos.

Luego se realizó el mismo procedimiento para todas las combinaciones posibles, fijando la velocidad de corte y variando la profundidad de corte $d = 1,5$ mm; $d = 2,5$ mm y $d = 2,5$ mm. De donde se obtuvieron las siguientes curvas que se representaron en la siguiente Figura 2.

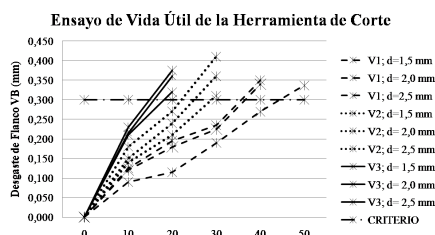


Figura 2: Ensayo de la vida útil de la herramienta de corte.

En la Figura 2 las diferentes curvas para las diferentes combinaciones de las variables se comprobó el efecto de la velocidad de corte (V_c) en el proceso de mecanizado donde al aumentar la V_c disminuye proporcionalmente la VUHC. Así como también en la medida que aumenta la profundidad de corte también disminuye la VUHC. Al mismo tiempo se observó que al aumentar el avance en los mecanizados también se evidencia una disminución de la VUHC en los ensayos. En general este comportamiento es consistente con los fundamentos teóricos relacionados con la vida útil de una herramienta de corte de aceros rápidos T-2000 durante el proceso de mecanizado.

Considerando que la VUHC se determina tomando los puntos de intersección entre el criterio de desgaste y las diferentes curvas de las

velocidades presentes en cada gráfico, según las condiciones de las mismas.

De los puntos de intersección de la Figura 1 gráfico desgaste vs. tiempo, para $f = 0,08$ mm/rev y $d = 1,5$ mm se obtuvo que para $V_1 = 26,394$ m/min el valor de $T_1 = 45$ min y para $V_3 = 38,902$ m/min el valor de $T_3 = 16$ min.

Cálculos tipo para n y C , valores clave en la determinación de la ecuación de Taylor.

$$n = \frac{(\ln(V_3) - \ln(V_1))}{(\ln(T_1) - \ln(T_3))} = 0,375$$

Como la ecuación de Taylor [4] dice que

$$VT^n = C$$

Sustituyendo, se obtiene la constante C .

$$C = 110,070$$

Ahora bien, construyendo la ecuación de Taylor:

$$VT^{0,375n} = 110,07$$

Este proceso se realizó para cada una de las operaciones de mecanizado, de donde se obtuvo la siguiente Tabla 3 de valores de C y n .

Tabla 3: Valores de “ n ” y “ C ” para cada Variable.

n	C	f (mm/rev)	d (mm)
0,383	166,024	0,08	1,50
0,463	224,091	0,08	2,00
0,583	353,527	0,08	2,50
0,280	112,160	0,12	1,50
0,458	219,976	0,12	2,00
0,512	270,000	0,12	2,50
1,044	2021,048	0,16	1,50
0,458	237,749	0,16	2,00
0,560	323,374	0,16	2,50

3.1. VUHC con tratamiento térmico criogénico

En el ensayo de la VUHC se hicieron dos pruebas pilotos para estimar el tiempo de VUHC con parámetros de corte promedios (V_c , f y d). Para realizar el mecanizado hasta el criterio de la norma 0,3 mm. Se observó que al determinar la VUHC, esta se manifestó con un alto valor

con relación a la HC sin tratamiento térmico criogénico, siendo este uno de los hallazgos más importantes de la investigación. Este tiempo de mecanizado de la pieza para alcanzar el criterio de VUHC en el proceso (ver Figuras 3 y 4) implica un proceso largo, por lo que en función de los costos implícitos y de la disponibilidad del Torno. Se analizó la situación y se determinó que como el comportamiento de la HC es aceptable y consistente con los fundamentos teóricos. Se decidió disminuir el criterio de desgaste de flanco de 0,30 mm a 0,15 mm, con lo cual se asumirá esto como un criterio más exigente para un tipo de ejes especiales que permitirá desarrollar los ensayos de VUHC en un tiempo considerable y dentro de las expectativas de la investigación, así como de la disponibilidad de recursos económicos de los investigadores.

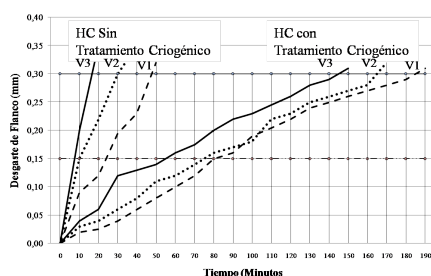


Figura 3: Ensayo de VUHC (S/TTC) y (C/TTC).

En la gráfica de la Figura 3 se puede ver cómo influye el tratamiento térmico de criogenia en las propiedades mecánicas de tenacidad, dureza y desgaste, esto debido a que para una HC sin tratamiento térmico de criogenia la VUHC fue de aproximadamente:

VUHC = 48 min	$V_{c1} = 26,394$ m/min
VUHC = 25 min	$V_{c2} = 36,380$ m/min
VUHC = 15 min	$V_{c3} = 38,380$ m/min

Y para la HC con tratamiento térmico de criogenia la VUHC fue de aproximadamente:

VUHC = 180 min	$V_{c1} = 26,394$ m/min
VUHC = 165 min	$V_{c2} = 36,380$ m/min
VUHC = 150 min	$V_{c3} = 38,380$ m/min

Donde se revela que para la V_{c1} el tratamiento térmico criogénico originó un rendimiento de 3,75

veces el tiempo de mecanizado VUHC. En el caso de la V_{c2} se el rendimiento fue 6,6 veces el tiempo de mecanizado VUHC. Y para el caso de la V_{c3} el incremento fue de 10 veces el tiempo de mecanizado VUHC.

Esto demostró que el tratamiento térmico mejora notablemente las propiedades de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste del material (HC), con lo que al aumentar el tiempo de mecanizado con el aumento de la VUHC se pueden fabricar más piezas con la misma HC de corte lo que incide directamente en los costos de producción.

En la Figura 4 se evidencia la diferencia entre una HC en su estado natural sin tratamiento térmico criogénico, donde en la gráfica le corresponde un valor de la VUHC = 45 minutos aproximadamente contra de la que tiene tratamiento térmico criogénico donde se observó una VUHC de alrededor de 180 minutos, que representa un aumento en la VUHC de cuatro veces más para la herramienta con tratamiento térmico.

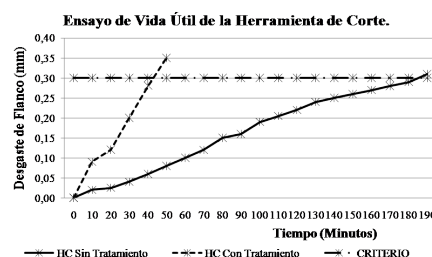


Figura 4: Ensayo de VUHC (S/T) y (C/T).

Para la evaluación de la VUHC se mecanizó la probeta (eje de acero AISI 1045) y se obtuvieron los siguiente resultados al alcanzar el criterio asumido de desgaste de flanco de 0,150 mm, estos resultados se presentan en las gráficas de las velocidades $V_{c1}=26,394$ m/min; $V_{c2} = 36,380$ m/min y $V_{c3} = 38,902$ m/min respectivamente para avances de $f = 0,08$ mm/rev; $f = 0,12$ mm/rev y $f = 0,16$ mm/rev y para profundidades de pasadas $d = 1,5$ mm; $d = 2,0$ mm y $d = 2,5$ mm. En las Figuras 5, 6 y 7 se presentan las curvas del desgaste de flanco para el avance fijo de $f = 0,08$ mm/rev, con profundidades de corte de $d = 1,5$ mm; $d = 2,0$ mm y $d = 2,5$ mm respectivamente.

En las curvas de las Figuras 5, 6 y 7 se apreció como disminuye la VUHC al aumentar la velocidad

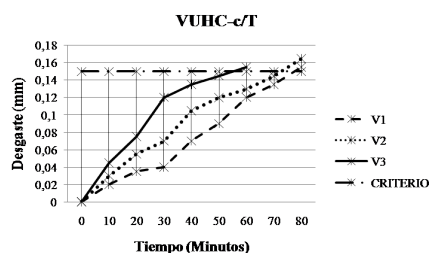


Figura 5: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,08$ mm/rev, $d = 1,5$ mm].

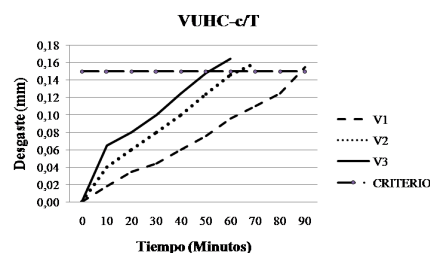


Figura 8: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,12$ mm/rev, $d = 1,5$ mm].

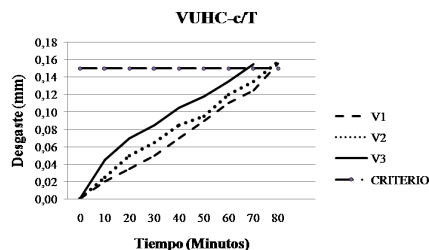


Figura 6: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,08$ mm/rev, $d = 2,0$ mm].

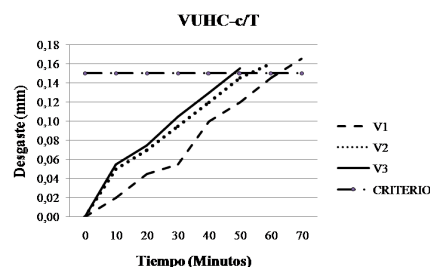


Figura 9: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,12$ mm/rev, $d = 2,0$ mm].

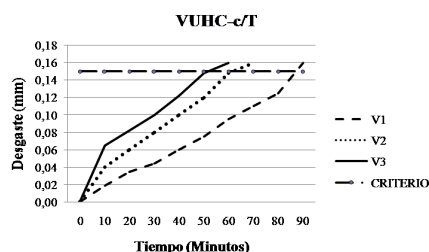


Figura 7: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,08$ mm/rev, $d = 2,5$ mm].

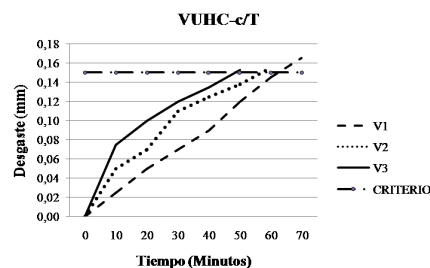


Figura 10: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,12$ mm/rev, $d = 2,5$ mm].

de corte de $V_{c1}=26,394$ m/min; $V_{c2} = 36,380$ m/min y $V_{c3} =38,902$ m/min con relación a las profundidades de corte de $d = 1,5$ mm; $d = 2,0$ mm y $d = 2,5$ mm, esto es consistente con el comportamiento de la HC y se observó que la VUHC es más extensa con relación a la HC en su estado original, esto con seguridad es porque el tratamiento criogénico mejora las condiciones del material.

En las Figuras 8, 9 y 10 se presentan las curvas del desgaste de flanco para el avance fijo de $f = 0,12$ mm/rev, con profundidades de corte de $d = 1,5$ mm; $d = 2,0$ mm y $d = 2,5$ mm respectivamente.

En las curvas de las Figuras 8, 9 y 10 se consideró como la VUHC se reduce al aumentar la velocidad

de corte de $V_{c1} = 26,394$ m/min; $V_{c2} = 36,380$ m/min y $V_{c3} = 38,902$ m/min en cada uno de las diferentes profundidades de corte $d = 1,5$ mm; $d = 2,0$ mm y $d = 2,5$ mm, esto es consistente con el comportamiento de la HC y se observó que la VUHC de la HC se incrementa cuando se aplica previamente un tratamiento térmico de criogenia con referencia a una HC sin ningún tratamiento. Por lo que se establece la condición mejorada del material de la HC con el tratamiento criogénico.

En las Figuras 11, 12 y 13 se presentan las curvas del desgaste de flanco para el avance fijo de $f = 0,16$ mm/rev, con profundidades de corte de $d = 1,5$; $d = 2,0$ y $d = 2,5$ mm respectivamente.

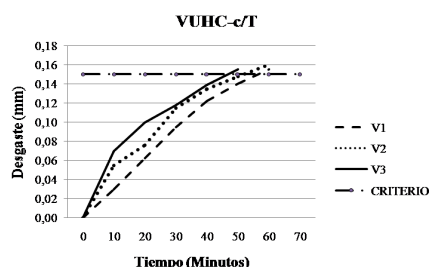


Figura 11: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,16$ mm/rev, $d = 1,5$ mm].

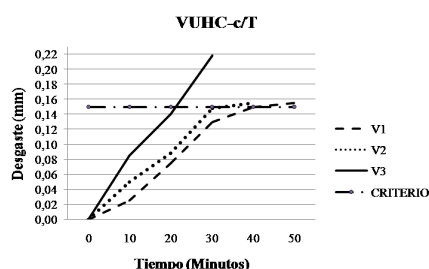


Figura 12: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,16$ mm/rev, $d = 2,0$ mm].

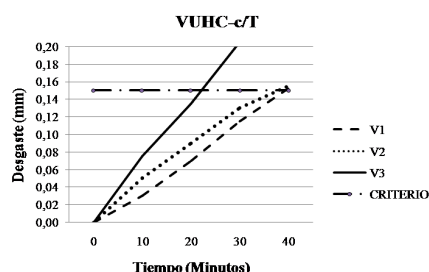


Figura 13: Desgaste de flanco vs tiempo [$f = 0,16$ mm/rev, $d = 2,5$ mm].

En las curvas de las Figuras 11, 12 y 13 se evidenció la reducción de la VUHC con el aumento de la velocidad de corte de $V_{c1} = 26,394$ m/min; $V_{c2} = 36,380$ m/min y $V_{c3} = 38,902$ m/min con relación a las profundidades de corte de $d = 1,5$ mm; $d = 2,0$ mm y $d = 2,5$ mm, esto además de estar en consonancia con el comportamiento de la HC y se destaca la condición mejorada del material de la HC con el tratamiento criogénico por lo que se incremento la VUHC.

El tiempo de la VUHC en función de los parámetros que influyen de manera directa en su durabilidad, sumados a la interpretación de estos

resultados obtenidos de los respectivos ensayos de mecanizado hasta alcanzar el criterio de desgaste de flanco establecido por la norma ISO 3685-1993 de 0,3 mm y del criterio asumido de 0,150 mm.

Las curvas de las gráficas arrojan diferencias pero en la medida que el desgaste de flanco fue haciéndose más grande paulatinamente hasta alcanzar el criterio establecido.

Cuando se estableció el criterio de 0,150 mm se evidenció un comportamiento similar de la VUHC similar al del criterio de la norma 0,300 mm, donde se observó una pendiente inclinada lo que indicó un desgaste acelerado, se estableció que a medida que los parámetros de corte aumentan, el tiempo de VUHC decrece paulatinamente.

El criterio de desgaste para $f = 0,16$ mm/rev y $d = 2,5$ mm y $N = 250$ RPM que se consideró una condición extrema para la HC que no tenía tratamiento térmico criogénico se logró a los 20 minutos aproximadamente, mientras que en la HC con tratamiento criogénico se consiguió alrededor de los 50 minutos. De la misma forma en las condiciones más leves del ensayo para $f = 0,08$ mm/rev y de $d = 1,5$ mm se logró el criterio de desgaste a los 50 minutos y en caso de la HC con tratamiento criogénico esta tiempo de VUHC se extendió hasta alrededor de los 190 mm, con lo que se demostró las mejoras inducidas en el tratamiento criogénico, donde la austenita retenida del temple convencional se transforma en martensita, usando una escala Rockwell C (HRC), siendo ese aumento el 1,42 de dureza con respecto a la HC sin tratamiento. Mejora su dureza y reduce la posibilidad de fractura y deformación, así como absorbe menos energía en impacto, como consecuencia disminuye su ductilidad y la posibilidad de grietas también disminuye [1].

Según concluye Rojas et al, 2016 en su investigación el aumento de la resistencia al desgaste abrasivo puede ser explicado por la presencia de una estructura formada por ferrita que se deforma antes de ser removida y martensita que es muy dura mostrando las ventajas de trabajar con este tipo de aceros. El tratamiento criogénico refina el grano y se forman micro carburos brindándole al material mayor resistencia al desgaste [7], esta conclusión coincide la presente

investigación y se refleja en el comportamiento favorable de la HC con el tratamiento térmico criogénico donde el efecto del tratamiento mejoró varias veces el tiempo de mecanizado aumentando la VUHC más de cuatro veces con relación a la HC en su condición original sin tratamiento térmico criogénico.

En la presente investigación se demostró el incremento en la VUHC debido a la mejora en las propiedades del material de la herramienta de corte T-2000 por el tratamiento térmico criogénico al que fue sometido, por lo que se coincide con la conclusión de Trillo et al en su investigación cuando expresa “Que en general, el tratamiento criogénico mejora los valores de dureza y resistencia frente al desgaste de los aceros DIN 1.3243 y 1.3294”. Esta variación probablemente está asociada a la transformación de la austenita retenida en martensita y en menor medida a la precipitación de carburos de muy pequeño tamaño que ocurre a temperaturas criogénicas (-196 °C) [8].

4. Conclusiones

La aseveración de Morales y Sidorovas, 2014, según la cual el tratamiento térmico criogénico al sumergir las probetas en Nitrógeno líquido a una temperatura criogénica de -196 °C mejora notablemente las propiedades de dureza, tenacidad y resistencia a la tensión, así como la resistencia al desgaste y la deformación en las herramientas de corte, se evidenció al obtener mecanizados de más de cuatro veces el tiempo de duración en la VUHC.

Se estableció un método para el estudio de la maquinabilidad del acero AISI 1045 en función de la VUHC, llevando el criterio de desgaste de flanco hasta un criterio asumido de 0,150 mm partir de la Norma ISO 3685.

Se obtuvieron los valores de C y K para establecer la ecuación de Taylor en el mecanizado del Acero AISI 1045 con herramientas de corte sin tratamiento.

Se constató el incremento en el tiempo de mecanizado con una herramienta con tratamiento criogénico donde se estableció un tiempo de mecanizado cercano a los 190 minutos en

comparación con una herramienta de corte sin tratamiento con un tiempo de mecanizado de 45 minutos, lo que representó un incremento en la vida útil de la herramienta de corte con tratamiento térmico criogénico de más de cuatro veces.

Se determinó que mientras más tiempo de mecanizado (debido al aumento de la VUHC) se revela como un menor tiempo de cambio de herramientas y esto representa un mayor aprovechamiento del recurso tiempo del mecanizado.

La variable más influyente fue la velocidad de corte, la cual incide directamente en la VUHC, seguido de la profundidad de corte y el avance.

Se estipuló un incremento en los costos de 151 % mayor para la herramienta de corte sin tratamiento térmico criogénico en comparación con la herramienta de corte tratada criogénicamente, por lo que se justifica implementar esta técnica para mejorar el acero AISI 1045.

Como una recomendación concluyente se sugiere realizar el ensayo con una mayor cantidad de probetas para establecer un nivel de confiabilidad mayor.

5. Referencias

- [1] ISO. ISO 3685:1993, Tool-life testing with single-point turning tools, 1993.
- [2] Mikell P. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.
- [3] Joan Morales and Luís F. Sidorovas. Influencia de un tratamiento criogénico en las propiedades mecánicas de un acero para herramientas AISI T-2000. *Revista Ingeniería UC*, 21(3):24-32, 2014.
- [4] Juan C. Pereira. Procesos de fabricación por arranque de viruta. Trabajo de Ascenso, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2004.
- [5] Steve F. Krar and Albert F. Check. *Tecnología de las máquinas herramienta*. S.A. Marcombo, 2003.
- [6] Serope Kalpakjian. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, México, 5 edition, 2008.
- [7] María Angélica Vacca García and Miguel Leonardo Zabala Ortiz. Influencia de los tratamientos a temperaturas intercríticas IHT y tratamientos criogénicos DC y un posterior revenido de 15, 30 y 45 minutos a la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI/SAE 1045. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Colombia, 2016.
- [8] S. Trillo, G. Castro, A. Fernández-Vicente, and P. Vázquez. Efecto del tratamiento criogénico en las

propiedades de dos aceros de herramientas para trabajo en frío (DIN 1.3243 y DIN 1.3294). *Trater Press*, (17):25–32, 2010.

Review: Piezoelectric sensors applications in the detection of Contaminants in food

Cristina De Sousa^a, Lisbeth Manganiello^{*,b}

^aDepartamento de Química Tecnológica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bCentro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.- This paper presents a review on piezoelectric sensors, specifically quartz crystal microbalances (QCM) and the application of these sensors, mainly to the food industry. In this area, the qualitative and quantitative analysis has been strengthened by the development of powerful instrumental analysis techniques; however, the cumbersome procedures, the long analysis times and the high technological costs, call attention to propose innovative strategies parallel to the existing techniques. Sensors are tools that have mechanisms for the analysis of food composition, residues of agrochemicals, toxins, the presence of pathogens, the presence of genetically modified organisms, process control and environmental contaminants, among others, in real time.

Keywords: sensors; piezoelectric; quartz crystal microbalance (QCM); food; contaminants.

Estado del Arte: Aplicaciones de los sensores piezoeléctricos en la detección de elementos contaminates en alimentos

Resumen.- Este trabajo expone una revisión sobre los sensores piezoeléctricos, específicamente de las microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM) y la aplicación de dichos sensores, principalmente a la industria alimentaria. En esta área, el análisis cualitativo y cuantitativo ha sido fortalecido por el desarrollo de potentes técnicas instrumentales de análisis; sin embargo, motivado a lo engorroso de los procedimientos, los largos tiempos de análisis y los altos costos tecnológicos, llaman la atención para plantear estrategias innovadoras paralelas a las técnicas existentes. Los sensores son herramientas que disponen de mecanismos para el análisis de la composición de los alimentos, residuos de agroquímicos, toxinas, presencia de patógenos, presencia de organismos genéticamente modificados, control de procesos y contaminantes ambientales, entre otros, en tiempo real.

Palabras claves: sensores; piezoeléctrico; microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM); alimentos; contaminantes.

Recibido: septiembre 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción

Uno de los principales objetivos de la Química Analítica Moderna es la determinación selectiva de los analitos a bajos niveles de concentración y en presencia de sustancias que producen interferencia. Los considerables avances acontecidos en la instrumentación analítica han dado lugar a una mejora en la selectividad, incluso en el análisis de trazas, debido al desarrollo de técnicas tales como: cromatografía de gases, HPLC, espectrometría de

masas, entre otras; pero son técnicas de elevado costo y en general requieren del tratamiento previo de la muestra. El desarrollo de sistemas de sensores altamente sensibles, específicos y resistentes a las condiciones donde serán empleados constituye un tópico de gran interés de investigación en las últimas dos décadas. Este interés está fundamentado por la necesidad vigente de contar con sistemas analíticos confiables de respuesta rápida para la cuantificación de determinados elementos y compuestos en diversas áreas, tales como biología, medicina, procesos industriales, contaminación ambiental, entre otros [1].

Los sensores químicos se presentan como una herramienta de alta utilidad en el diseño de sistemas de control y monitoreo, ya que

*Autor para correspondencia: L. Manganiello lmanganiello@uc.edu.ve

pueden ser colocados en el sitio donde se está produciendo el evento, generando lecturas a tiempo real permitiendo de esta manera una evaluación inmediata de la problemática existente. Los sensores químicos basados en transductores piezoeléctricos, electroquímicos y ópticos, permiten interesantes arreglos analíticos para el desarrollo de soluciones efectivas en el ámbito de la ingeniería ambiental, alimenticia, farmacéutica, entre otras [2].

Los sistemas de detección piezoeléctrica fundamentan su funcionamiento en la propiedad que presentan determinados materiales de polarizarse eléctricamente cuando son deformados por la acción de una fuerza. Esta polarización genera un campo eléctrico en la superficie que puede usarse para transformar la energía mecánica en energía eléctrica. A su vez, el efecto puede revertirse, de tal forma que aplicando un campo eléctrico a un material piezoeléctrico éste se deforma [3].

Los sensores piezoeléctricos, comúnmente llamados, microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM, por sus siglas en inglés) con electrodos de oro, son usados para el estudio de interacciones moleculares y el desarrollo de sistemas de sensores para la aplicación en diferentes áreas de investigación, tales como: alimenticia, médica, ambiental, entre otras. La operación de una QCM se basa en el efecto piezoeléctrico, en el cual un sensor de cristal de cuarzo es inducido a vibrar mecánicamente a una frecuencia de resonancia específica, a través de la aplicación de un campo eléctrico alternado a los electrodos metálicos. Una frecuencia de resonancia del cristal es proporcional a la masa dislocada en la vibración, y consecuentemente a la variación de masa en la superficie del sensor [4]. En este mismo orden de ideas, cabe señalar que los sensores químicos, basados en las microbalanzas de cristal de cuarzo, son dispositivos que transforman una información química en una señal analítica útil. Estos sensores pueden dar información de las concentraciones de las especies con las cuales están en contacto y tienen la ventaja que poseen una alta sensibilidad y bajos costos de instrumentación [5].

Relacionando lo anteriormente expuesto con el área de interés, cabe señalar, que la industria de alimentos, bebidas y afines requiere métodos

analíticos para el aseguramiento de la calidad fisicoquímica, microbiológica, bromatológica, sensorial y la estabilidad de materias primas, procesos y productos terminados. Estos métodos deben brindar datos en tiempo real, que permitan ejercer control y trazabilidad de cada uno de los procesos implicados y que garanticen seguridad e inocuidad de los productos alimenticios. Los métodos analíticos tradicionales implican determinaciones gravimétricas, volumétricas y colorimétricas con niveles de sensibilidad limitados para la determinación de trazas, y con poca especificidad. Aunque los métodos cromatográficos y espectrométricos constituyen herramientas robustas, reproducibles y con capacidad de alcanzar niveles altos niveles de detección, son costosos e implican tratamientos muy exhaustivos de la muestra. Los sensores bio-químicos, son dispositivos analíticos conformados por un elemento biológico o químico de reconocimiento asociado a un mecanismo de detección e interpretación de la señal obtenida de la interacción entre el analito y el dispositivo analítico, constituyéndose en una herramienta para inspeccionar la calidad y los procesos con un panorama prometedor con respecto a los métodos tradicionales, en cuanto a especificidad, sencillez, respuesta clara y real [6].

En este mismo orden de ideas, cabe mencionar que la detección y monitoreo de contaminantes, tales como, compuestos químicos, las toxinas y los patógenos en los alimentos son importantes para la salud humana. Los contaminantes pueden provenir de una vasta variedad de fuentes, tales como el uso inapropiado de medicamentos veterinarios y pesticidas, la formación de micotoxinas y toxinas marinas, y contaminación bacteriana. Los contaminantes, tales como patógenos, toxinas, pesticidas, y los antibióticos contribuyen a estos problemas de contaminación. La detección y el monitoreo de estas moléculas en los alimentos se puede hacer por métodos analíticos convencionales, pero requieren mucho tiempo, son costosos y requieren especialización de personas; sin embargo, los sensores son detectores baratos, rápidos y portátiles que proporcionan análisis in situ y en tiempo real y sin dificultad en la preparación de la muestra [7].

2. Antecedentes

Lamuta *et al.* [8], en su investigación expresan que hasta el 2016 ha sido diseñado un gran número de materiales inteligentes, desarrollados y aplicados a una variedad de dispositivos en las áreas de biomédica y electromecánica. Los materiales piezoeléctricos han tenido gran atención debido a su impacto tecnológico, y los más comúnmente usados son titanato zirconato de plomo, un piezoeléctrico o piezocerámico conocido como PZT, así como también, polímeros piezoeléctricos a base de poli fluoruro de vinilideno (PVDF). El efecto piezoeléctrico de PZT se debe a la deformación elástica de su estructura cristalina no centro simétrica, mientras que en los PVDF se debe a su estructura molecular y orientación. También existen los materiales piezoeléctricos naturales, los cuales son: turmalina, cuarzo, topacio, azúcar de caña y sal de Rochelle.

Lal y Tiwari [9] presentan un sensor químico con diferentes porcentajes en peso de películas poliméricas cubiertas o impregnadas con nano arcilla para modificar el cristal piezoeléctrico para la detección de productos químicos tóxicos en diferentes entornos o ambientes. Las microestructuras de la película recubierta sobre el cristal de cuarzo obtenidas por la técnica de evaporación del solvente se evaluaron utilizando Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Dichos materiales de interfaz con nano arcilla fueron estudiados para diferentes aplicaciones.

Cabe destacar, que en los últimos años, la tecnología ha avanzado mucho en el campo de la nanotecnología lo que facilita el desarrollo de varios dispositivos de detección electrónicos para el control de los gases presentes en el medio ambiente. Los sensores de microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) son sensores de masa altamente precisos para la detección de analitos en fases gaseosas y líquidas, incluida la detección de sustancias químicas y biológicas como agentes de guerra. Su principio de detección es la variación de la frecuencia de un cristal circuito oscilador basado en la deposición de masa en el cristal.

Manganiello [10] desarrolló sistemas analíticos

de respuesta rápida (screening) para muestras líquidas y sólidas, basado en el uso de sensores piezoeléctricos como sistemas de detección, resaltando así la importancia de dichos sensores en las nuevas tendencias en la Química Analítica, hacia la automatización, simplificación y miniaturización, así como también su influencia en los procesos de medidas. Las aplicaciones han sido para análisis de muestras gaseosas y líquidas, tanto en sistemas manuales o discontinuos como de inyección de flujo. Describe las formas para el tratamiento automático de las muestras, con los métodos más relevantes acoplados a sistemas de flujo y para tratamiento de muestras complejas.

Escalona *et al* [2] presentan una extensa revisión de las principales investigaciones desarrolladas en el área de los sensores químicos y su aplicación en el control de gases en ambientes sensibles a la contaminación. Los gases considerados en este estudio como contaminantes de referencia son: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂), así como otros compuestos de impacto como CO₂, los compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno y de azufre en general (NO_x y SO_x). Se han desarrollado equipos de medición de contaminantes basados en diversos tipos de sensores y sistemas de monitoreo necesarios para que puedan utilizarse en el control y la evaluación de la contaminación. Entre estos equipos se encuentran los sensores químicos basados en transductores piezoeléctricos, electroquímicos y ópticos, los cuales, a diferencia de los métodos analíticos tradicionales, estos permiten medir de modo continuo y en el lugar donde se producen las emisiones atmosféricas los agentes contaminantes que se encuentran asociados a estas.

El desarrollo de los sensores piezoeléctricos presenta especial interés, por tratarse de sensores de relativa facilidad de fabricación y tamaño compacto, empleados en aplicaciones para la medición cualitativa o semi-cuantitativa de especies químicas como son los compuestos orgánicos volátiles (COV) en su mayor medida y gases de CO_x con una alta sensibilidad en la respuesta. Estos tipos de dispositivos, presentan una oportunidad

para el desarrollo de futuras investigaciones que permitan mejorar su funcionamiento en aspectos como la selectividad y la reversibilidad de su respuesta, y puede decirse que todavía hay mucho camino por recorrer, dejándose ver el desarrollo de sistemas multi-sensores, formados por arreglos que conformen narices electrónicas.

Escalona *et al* [11] proponen un prototipo para la medición de H_2S basado en sensores piezoeléctricos para la evaluación de la halitosis. El diseño y construcción de la celda donde se ubica el sensor piezoeléctrico fue planteado para el desarrollo de la investigación. El sensor piezoeléctrico es el dispositivo responsable de la medición de los niveles de H_2S . El sistema químico utilizado se basó en la reacción del H_2S en medio acuoso acidificado y en presencia de mercurio inorgánico dando lugar a un precipitado estable de HgS . Este sistema provee la selectividad del dispositivo, ya que las otras especies que pueden estar presentes permanecen en solución. Por lo tanto el sensor piezoeléctrico o microbalanza de cuarzo registra únicamente el micro-precipitado de HgS formado, el cual representa la medida indirecta del H_2S . La formación de los micro-precipitados fue verificada empleando la técnica de microscopía invertida. Para calcular la densidad de cada uno de los micro-precipitados fueron utilizadas técnicas fotométricas e integración numérica.

Babar *et al* [12] desarrollaron un sensor de microbalanza de cristal de cuarzo recubierto con poli-dimetilsiloxano (PDMS), para detectar el aroma de 3-Carene volátil en las variedades Indian Mango particularmente de Langda y Chausa. La exigente tecnología de un sensor piezoeléctrico ha generado una gran esperanza para determinar el aroma de maduración del mango (*Mangifera indica* L). 3-Carene es uno de los más importantes aromas que indican la madurez del mango, y su detección es básica para las características de aroma y sabor de la fruta, lo cual es fundamental para la aceptación del consumidor en los mercados comerciales de fruta.

La microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) traduce cambios en la masa sobre la superficie del cristal medibles en la frecuencia de resonancia

debido a su sensible capacidad de medición en la interface superficie-solución. El rendimiento del sensor ha sido validado empíricamente mediante su caracterización a través de la sensibilidad, selectividad, repetibilidad, reproducibilidad, periodo de reutilización, entre otros, resultando que el sensor era selectivo para 3-carene principalmente, a diferencia de otros aromas dominantes presentes en el mango. La validación del sensor propuesto con mangos reales se lleva a cabo correlacionando la desviación de frecuencia del sensor con las estimaciones de 3-carene obtenidas por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GCMS).

3. Piezoelectricidad

La piezoelectricidad, es la carga eléctrica que se acumula en ciertos materiales sólidos (tales como: cristales, ciertas cerámicas y la materia biológica, como el hueso, el ADN y diversas proteínas) en respuesta a la tensión mecánica aplicada. La palabra significa electricidad resultante de la presión. Se deriva del griego piezo o piezein, lo que significa apretar o prensar [13].

Los hermanos Curie, descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste, lo cual se conoce como “efecto piezoeléctrico” [14], y es la interacción electromecánica lineal entre la mecánica y el estado eléctrico en materiales cristalinos sin simetría de inversión. Es un proceso reversible en que los materiales que exhiben el efecto piezoeléctrico directo (la generación interna de carga eléctrica resultante de una fuerza mecánica aplicada) también exhiben el efecto piezoeléctrico inverso (la generación interna de una tensión mecánica resultante de un campo eléctrico aplicado) [15].

4. Sensores

Los términos detector, transductor y sensor se utilizan con frecuencia como sinónimos, pero tienen un significado con matices diferentes. El detector, se refiere a un dispositivo mecánico, eléctrico o químico que identifica, registra o indica un cambio en algunas de las variables de su entorno.

El transductor se refiere a los dispositivos que convierten la información en dominios no eléctricos a dominios eléctricos y viceversa. Asociado a este término se encuentra la función de transferencia del transductor que se define como la relación matemática que existe entre la salida eléctrica y la entrada (señal) de la potencia radiante, temperatura, tensión o fuerza del campo magnético.

El sensor se utiliza para el tipo de dispositivos analíticos que son capaces de medir determinadas especies químicas o familias de estas de manera continua y reversible. Los sensores constan de un transductor que esta acoplado a una fase de reconocimiento que responde específicamente a una propiedad física o química concreta del analito. Los sistemas de detección son el conjunto completo de dispositivos que indican o registran cantidades físicas o químicas [10].

4.1. Sensores (Bio)–Químicos

Un sensor se puede definir como una microzona sensible donde tiene lugar la interacción química o bioquímica que está conectada o integrada con un traductor físico que puede ser óptico, electroquímico, térmico o másico. Esta permite transformar la respuesta del sistema en información analítica que se genera “in situ” y a tiempo real. La Figura 1, muestra las partes de un sensor químico y bioquímico. Estos sensores proporcionan bajos límites de detección y determinación, alta sensibilidad, precisión elevada y fiabilidad de respuesta generada. Además deben ser reversibles, es decir, que la respuesta desaparezca en ausencia de analitos. La respuesta debe obtenerse a tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones a tiempo [10].

4.2. Sensores piezoeléctricos

Los sistemas de transducción piezoeléctricos, basan su funcionamiento en la propiedad que presentan determinados materiales de polarizarse eléctricamente cuando son deformados por la acción de una fuerza. Esta polarización genera un campo eléctrico en la superficie que puede usarse para transformar la energía mecánica en energía eléctrica. A su vez, el efecto puede revertirse, de

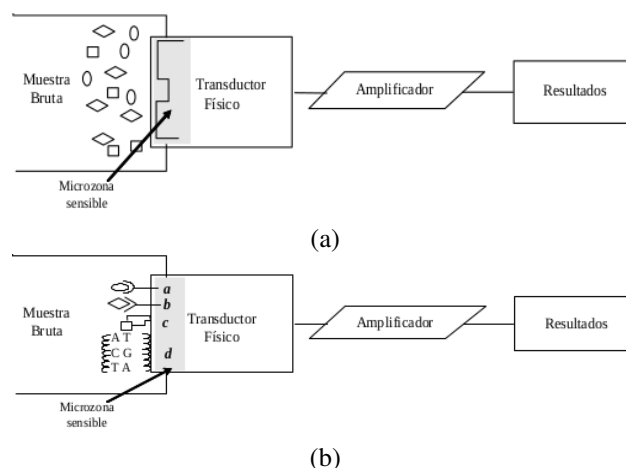


Figura 1: Representación gráfica de un sensor químico (a) y bioquímico (b). La microzona sensible es una capa química y/o bicapa que contiene las moléculas que participan en el reconocimiento de los analitos de interés. En el caso del sensor bioquímico la bicapa puede tratarse de: una enzima, un anticuerpo, célula o cadena de ADN, Fuente: [10].

tal forma que aplicando un campo eléctrico a un material piezoeléctrico este se deforma.

Este último efecto permite que estos materiales vibren por la aplicación de un campo eléctrico externo, generando ondas acústicas que se propagan e interactúan con el medio que les rodea, de tal forma que, el grado de interacción o las propiedades del medio pueden ser medidas a partir de las características del campo eléctrico del propio sensor. Estos sensores se comportan como guía de ondas acústicas y pueden responder a la variación de un amplio abanico de cantidades físicas como presión, temperatura, masa añadida en la superficie, densidad o viscosidad de los fluidos en los que se encuentren sumergidos. Además, al aplicar en su superficie un recubrimiento que actúa como receptor selectivo de determinadas sustancias, permite su amplia utilización como biosensores, en los que suele aprovecharse su sensibilidad a los cambios de masa o de densidad–viscosidad en líquidos [3].

Los transductores piezoeléctricos se utilizan como sensores químicos desde el descubrimiento por Sauerbrey de la relación entre el cambio de

masa y la frecuencia de resonancia del cristal; lo cual muestra la ecuación (1)

$$\Delta F = \frac{-2f_0^2}{A\sqrt{\rho\mu}}\Delta m, \quad (1)$$

donde:

ΔF es el cambio en la frecuencia de resonancia del cuarzo debido a la carga másica Δm en la superficie; f_0 es la frecuencia de resonancias del QCM;

A es el área activa de cristal;

ρ es la densidad del resonador o material piezoeléctrico y μ es el módulo de corte [16, 17, 18].

El signo negativo indica que un incremento de la masa en la superficie del cristal, por ejemplo por la adsorción de una molécula, da lugar a una disminución en su frecuencia de resonancia, y viceversa [19].

Microbalanzas de cuarzo. Son dispositivos en los que el efecto piezoeléctrico se usa como herramienta para detectar cambios muy pequeños de masa. La frecuencia de resonancia del cristal depende de la masa total resonante. La variación de la frecuencia es proporcional a la cantidad de masa añadida y el sensor tipo microbalanza opera como una balanza sensible. Por otro lado, la microbalanza tiene incorporado un circuito oscilador donde la frecuencia de oscilación va disminuyendo conforme se va acumulando masa sobre la superficie del diseño [18]. Estos dispositivos están formados por una delgada lámina circular de cristal piezoeléctrico, en la que se han depositado por ambas caras recubrimientos metálicos que actúan a manera de electrodo. El oro es el recubrimiento más ampliamente utilizado. En la Figura 2, se muestra el esquema del diseño típico de una microbalanza de cuarzo [10].

La frecuencia de resonancia de los cristales utilizados como QCM f , se encuentra entre 5 y 30 MHz, dicha frecuencia puede expresarse tal como se muestra en la ecuación (2)

$$f = n \frac{V_0}{2h_q}, \quad (2)$$

donde:

V_0 es la velocidad de propagación de la onda

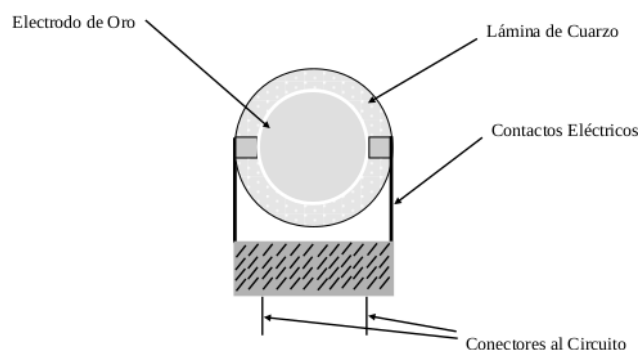


Figura 2: Esquema de diseño típico de una microbalanza de cuarzo (QCM). Fuente: [10].

acústica a través del cuarzo;

h_q es el espesor del cristal, y

n es el número de armónico.

La frecuencia fundamental de resonancia (f_0) se obtiene para $n = 1$ y la ecuación de propagación de onda predice que solo son posibles los armónicos impares ($n = 1, 3, 5, \dots$). Puesto que la frecuencia depende exclusivamente de propiedades físicas intrínsecas del cristal y de su espesor, si consideramos que las propiedades físicas del material son constantes, entonces, la frecuencia vendrá determinada por su espesor, y se expresa según la ecuación (3)

$$f_0 = \frac{K}{h_q}, \quad (3)$$

donde K es la constante de frecuencia y depende de las propiedades del cuarzo y de la geometría del corte.

Por lo tanto, un cambio en el espesor del cristal, supone una variación en la frecuencia de resonancia del sistema, o lo que es lo mismo, si depositamos una película fina de cualquier material sobre la superficie del cristal, lo suficientemente uniforme y rígida como para que pueda considerarse como una extensión de su espesor, se puede estimar el efecto de carga que produce a partir del desplazamiento que sufre la frecuencia de resonancia. Este es el principio en el que se basan las microbalanzas de cristal de cuarzo. La ecuación desarrollada por Sauerbrey (ecuación (1)) refleja matemáticamente este principio, y establece una relación lineal entre la masa depositada sobre el cristal y la variación en la frecuencia de resonancia.

Se ha observado que las vibraciones del cristal se concentran en el centro del disco, perdiendo amplitud más allá de las dimensiones de los electrodos, y por tanto el cristal es más sensible en la parte central del cristal. A la vista de esta expresión se puede deducir que para aumentar la sensibilidad de una microbalanza de cuarzo debe aumentarse su frecuencia de resonancia, y a su vez esto implica disminuir su espesor, por ello en la práctica es difícil trabajar con cristales con frecuencias por encima de los 30 MHz ya que son muy frágiles [20].

La ecuación (1) es válida para capas uniformes, finas y rígidas perfectamente acopladas sobre la superficie del resonador de cuarzo, se utiliza en sistemas de deposición en vacío, y detección en fase gaseosa (humedad etc.), sin embargo, fue a mediados de los 80, con la contribución de Kanazawa, que amplía el modelo para aplicaciones en líquidos Newtonianos, cuando se abren nuevos campos de aplicación para el QCM (sensores químicos, biosensores). La ecuación (4) describe el desplazamiento de la frecuencia de resonancia cuando la superficie del sensor está sumergida en un líquido

$$\Delta f = -f_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{\eta_L \rho_L}{\pi \mu_q \rho_q}} \quad (4)$$

donde

ρ_L es la densidad del líquido,

η_L es la viscosidad del líquido,

μ_q es el módulo de corte del cuarzo y

ρ_q es la densidad del cuarzo.

Las Ecuaciones (1) y (4) muestran la capacidad del resonador de cristal de cuarzo como sensor, ambas se aplican para calcular la masa adsorbida en aplicaciones de sensores químicos o para determinar la densidad/viscosidad de líquidos [20, 21].

Para medir los cambios que ocurren en la frecuencia de resonancia de un sensor piezoeléctrico como resultado de los cambios de masa en su superficie, el sensor se incorpora a un circuito oscilatorio. El sensor piezoeléctrico incorporado a este circuito controla la frecuencia de oscilación que se produce. El cristal piezoeléctrico de cuarzo debe ser colocado en una celda apropiada donde

ambos lados del cristal estén protegidos, pues se trata de un dispositivo muy frágil y que a su vez permita poner en contacto la muestra con la superficie del cristal de la manera más adecuada. La frecuencia de la señal de salida procedente del circuito oscilatorio puede medirse mediante un medidor de frecuencia. Los contadores de frecuencia pueden ser conectados a un ordenador equipado con la interfase electrónica adecuada y de esta forma el sistema puede registrar los cambios de masa en la microbalanza de cuarzo en tiempo real [10].

5. Contaminantes de los alimentos

La contaminación de los alimentos puede provenir de varias fuentes diferentes, como los tóxicos naturales (fitotoxinas), contaminación bacteriana, el uso inadecuado de pesticidas y medicamentos veterinarios y la adición de productos químicos durante las técnicas de procesamiento. La detección de contaminantes alimentarios es esencial para la salud humana. Los contaminantes se pueden dividir en

- a) contaminantes biológicos, como toxinas y patógenos y
- b) contaminantes químicos, tales como pesticidas, residuos de medicamentos veterinarios y aditivos alimentarios.

Estos contaminantes pueden llevar a problemas de salud graves, particularmente enfermedades relacionadas con la resistencia a los medicamentos que reducen la eficacia de estos, específicamente para los residuos de medicamentos veterinarios.

En realidad, la industria alimentaria necesita métodos analíticos adecuados para el procesamiento y control de calidad de los productos alimenticios. La determinación de contaminantes químicos y biológicos en los alimentos es de suma importancia para la calidad de los alimentos, ya que a diferencia de los contaminantes físicos, no son visibles. Aparte de algunos analitos importantes, como azúcares, alcoholes, aminoácidos, sabores y edulcorantes, las aplicaciones alimentarias se centran principalmente en la detección de contaminantes biológicos y químicos. Por lo

tanto, es necesario invertir en el desarrollo de sensores (sensores químicos y biosensores) para la determinación de la calidad de los alimentos, ya que han demostrado ser una alternativa extremadamente viable con respecto a las técnicas de análisis tradicional, tales como la cromatografía y la espectroscopía. Sin embargo, muy pocos nanosensores juegan un papel destacado en el procesamiento o control de calidad de los alimentos [22].

Chiou *et al* [23] expresan que la seguridad alimentaria siempre es una preocupación importante para todos los países y China no es la excepción. En las últimas dos décadas, China ha puesto gran atención a la seguridad alimentaria debido a la frecuente ocurrencia de incidentes internacionales en los alimentos, tales como el brote de Salmonella, el uso de carne de caballo en la hamburguesa, el uso ilegal de ftalatos como agente de turbidez, la contaminación de leche de fórmula por melamina, entre otros.

En vista de los incidentes alimentarios ocurridos en todo el mundo, China ha estado haciendo enormes esfuerzos para garantizar la seguridad alimentaria desde la aprobación de la Ordenanza Provisional de Higiene de los Alimentos en 1965. Esta ordenanza fue modificada en la Ley de Higiene de los Alimentos de China en 1995. En 2003, se aprobó la Ley de Agricultura de China para implementar normas de calidad, sistemas de inspección y supervisión para Productos agrícolas. Posteriormente, hubo el paso de la Ley de Calidad y Seguridad de los Productos Agrícolas de China en 2006, la Ley de Seguridad Alimentaria de China en 2009, el establecimiento de la Administración de Alimentos y Medicamentos de China en 2013 y el Anuncio del nuevo 12º Plan Quinquenal Nacional de Sistemas de Control de Seguridad Alimentaria. El seguimiento y el sistema de vigilancia debe cubrir todas las diferentes partes de la cadena de suministro de alimentos, desde la producción agrícola, alimentaria, procesamiento y almacenamiento, hasta la importación, exportación y consumo de los alimentos con el fin de proporcionar una transparencia de la cadena alimentaria.

Un sistema de control exhaustivo de seguridad

alimentaria requiere un buen control de calidad de las empresas que a su vez requieren pruebas estandarizadas de seguridad alimentaria de pruebas confiables de los laboratorios. Sin embargo, esto provoca una gran presión financiera a las pequeñas empresas. La tecnología actual es capaz de proporcionar métodos robustos y sofisticados que requieren equipos costosos y en algunos casos un tratamiento largo de la muestra. La demanda actual de contaminante alimentario requiere una detección más rápida e in situ, lo cual acorta el tiempo hasta de un día para microorganismos o 30 minutos para productos químicos. A pesar de que la precisión de las pruebas rápidas generalmente no es tan buena como la de los métodos de prueba convencionales, su límite de detección (LOD) es mucho más bajo que el límite máximo de residuos regulado (MRL) y es competente en análisis semi-cuantitativo para propósito de la detección.

En este mismo orden de ideas con respecto a la contaminación de los alimentos, Rumiato y Monteiro [24] enfatizan el consumo de frutas, verduras y legumbres antes que los alimentos industrializados, que por contener mayor cantidad de azúcar, sodio y calorías, aumentan peso corporal. Sin embargo, cuando se lee acerca de las formas de cultivo de los alimentos frescos y sobre la calidad de los alimentos cárnicos y pescados, destinados al consumo de la población, surge la duda de si hay coherencia entre la orientación y el consumo, dado que hay relatos de contaminación de esos alimentos por residuos de pesticidas, contaminación del suelo, del agua, poco atendido por los órganos estatales.

En la revista PubMed, hay artículos sobre la contaminación por metales pesados, residuos industriales y agrotóxicos. En Wisconsin (EUA), se observó una contaminación en inmigrantes de Asia por metales pesados; la contaminación de alimentos por cadmio fue la causa de cáncer de mama en un estudio poblacional realizado con mujeres en postmenopausia, en Suecia. También fue encontrado en alimentos marinos, vegetales y cereales. En los niños la contaminación con cadmio puede afectar el desarrollo neurológico. Entre otros contaminantes se encuentran el mercurio, los nitratos y arsénico. Es responsabilidad guber-

namental la implementación de una legislación más rígida para el uso de pesticidas en alimentos y en la industrialización de los mismos, con un cambio en el tipo de descarga que podría evitar la contaminación de las aguas de los ríos y mares, como solución para un futuro más saludable.

6. Aplicaciones

Gomes *et al* [25] propusieron un sensor para determinar sodio basado en un cristal piezoeléctrico de cuarzo. El cristal de cuarzo fue recubierto con 5 % de bis [(12-crown-4) metil] dodecilmethylmalonato, 33 % de PVC y 62 % de NPOE, las cantidades de revestimiento que producen una disminución de frecuencia alrededor de 18 kHz muestran rangos óptimos de calibración lineal para el análisis de sodio en aguas minerales comerciales. Los resultados obtenidos en las aguas minerales por el método propuesto no fueron significativamente diferentes de los obtenidos por absorción atómica.

Cabe destacar que el sodio está presente en la mayoría de los alimentos, así como en el agua potable y es requerido por el cuerpo para regular la presión sanguínea y para su correcto funcionamiento de músculos y nervios. El sodio es normalmente analizado por espectrometría atómica, sin embargo en una búsqueda de bajo costo y rapidez en métodos de análisis, así como también obviar la necesidad de gases inflamables, la construcción de un sensor piezoeléctrico es una alternativa para la determinación del sodio así como de otros metales, tales como potasio y calcio. Las microbalanzas de cristal de cuarzo raras veces son aplicadas al análisis de metales, aunque tienen ciertas ventajas sobre los dispositivos potenciómetros, en cuanto a la respuesta lineal de la concentración, independencia de los coeficientes de actividad y la carga iónica, además de la facilidad de construcción.

Compagnone *et al* [26] han realizado un análisis del sabor del chocolate a través de matrices de sensores de gases. Probaron dos conjuntos diferentes de sensores para evaluar el rendimiento de dichas matrices: microbalanza de cristal de cuarzo recubiertas con a) porfirinas de metalo

y b) con péptidos de nanopartículas de oro. Se han analizado dos series de muestras de chocolate que contienen productos formulados de manera diferente (oscuro, blanco y leche): la primera hecha de muestras obtenidas en condiciones de proceso estándar, la segunda incluye muestras agregadas con algunos compuestos volátiles asociados a procesos de degradación y/o materias primas de baja calidad para obtener muestras con sabor artificialmente fuera de sabor. El análisis con ambas matrices de sensores de gas resultó tener buen rendimiento entre las muestras de chocolate con sabor estándar y con sabor artificial, sin embargo, el mejor resultado se obtuvo utilizando los sensores cubiertos con nanopartículas de péptido con más del 90 % de las muestras asignadas correctamente.

Es importante mencionar que para los productos de chocolate, el sabor es uno de los aspectos sensoriales más importantes que afectan a la aceptación por parte de los consumidores. La presencia de compuestos aromáticos que varían en cantidad según el genotipo del grano de cacao y varios procesos que ocurren durante la producción de chocolate (fermentación, secado, tostado) contribuyen a la fracción volátil compleja del producto final. Sin embargo, los compuestos no volátiles y las características de la fase grasa continua también influyen en gran medida en la liberación de sustancias volátiles en la percepción del gusto. El desarrollo de un sabor particular está estrictamente relacionado con el proceso de fabricación (y en particular con todos aquellos que envuelven calor), el método de fermentación y el origen del cacao. Las clases típicas de compuestos que forman el patrón de aroma de chocolate son alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas, furanos, piranos, pirazinas, piridinas, pirroles, fenoles, pironas y tiozoles.

El objetivo de esta investigación fue explorar la posibilidad de evaluar la calidad de un producto alimenticio, como el chocolate, que rara vez se prueba con sensores de gas, a través de la detección de sabores desagradables. Para este propósito, se han utilizado dos tipos diferentes de matrices de sensores de gas, que llevan diferentes ligandos para comparar sus rendimientos. Las porfirinas exhiben

propiedades de unión únicas que son ampliamente explotadas en la naturaleza para cumplir funciones esenciales para la vida. El marco molecular de la porfirina ofrece una amplia gama de mecanismos de interacción para la unión del analito, que abarca desde las fuerzas débiles de Van der Waals hasta el enlace de hidrógeno, y finalmente, la coordinación con el ion metálico central. Por otro lado, la capacidad de las nanopartículas de oro modificadas con oligopéptidos se ha propuesto recientemente. Se han obtenido resultados alentadores debido a la facilidad de la derivación, el alto número de configuraciones posibles y la posibilidad de diseñar a través del modelado molecular de los ligandos.

Taneja *et al* [27] expresan que el cadmio forma complejos con un grupo amina y también tiene buena afinidad hacia los nanotubos de carbono. La octadecilamina funcionalizada con nanotubos de carbono (ODACNT) de una sola pared se pueden emplear para detectar el ion cadmio en medio acuoso. Una película delgada de ODACNT no solo ofrece fuertes propiedades de adsorción hacia ion cadmio, sino también proporciona una enorme ganancia en la relación superficie–volumen y buena estabilidad mecánica y química. Fue diseñada una configuración experimental para grabar las respuestas piezoeléctricas y electroquímicas simultáneamente, las cuales se encontraron lineales en el rango de concentración dado. Curiosamente, la piezo–respuesta modula sistemática y repetidamente desde un valor máximo hasta el mínimo debido al barrido de voltaje durante la voltametría cíclica, indicando el fenómeno interfacial de adsorción y desorción.

La detección de analitos a través de la piezoelectricidad es muy simple, económica, sensible y de alta resolución. En estudios anteriores, se ha empleado una microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) para detectar metales pesados en medios acuosos en un rango de concentración de 10 a 1000 ppm. El cristal de cuarzo se funcionalizó depositando una película de derivados de bipyridinio y la piezorespuesta se encontró en el rango de 10 a 50 Hz. La funcionalización de la superficie es crucial para el desarrollo de los sensores. En general, el área activa del transductor está funcionalizada para mejorar

el valor cuantificable de las actividades físicas o químicas en su área activa.

Los iones metálicos pueden formar complejos fácilmente con los grupos amina, carboxilo, hidroxilo y mercaptanos y, por lo tanto, han demostrado una gran afinidad entre sí. Por ejemplo los iones metálicos Cd (II), Cu (II) y Zn (II) forman un complejo hiperramificado con polietileimina. Además de esto, los nanotubos de carbono (CNT) han demostrado gran afinidad con el metal debido a sus fuertes propiedades de adsorción, gran relación superficie–volumen, buena estabilidad química y mecánica y prometedoras propiedades eléctricas. Se ha encontrado que los nanotubos de carbono de pared simple funcionalizados con octadecilamina (ODACNT) tienen una notable capacidad para atraer el ion cadmio. Fue fabricada una película delgada de ODACNT sobre los cristales de cuarzo y empleada para detectar el ión de cadmio en el medio acuoso. Esta película proporciona no solo una capa altamente mesoporosa sino también un gran número de sitios de aminas para facilitar el acomplejamiento y atrapamiento de los iones cadmio.

Es importante mencionar que los investigadores integraron un potenciostato a un QCM y grabaron simultáneamente la respuesta piezoeléctrica y la corriente durante la voltametría cíclica. Estas mediciones las realizaron en el rango de concentración de 180–670 ppb de ion cadmio en medio acuoso. La voltametría cíclica no mostro una respuesta apreciable para concentraciones inferiores a 180 ppb; sin embargo, obtuvieron respuesta piezoeléctrica para un rango de concentración de ión cadmio en agua de 5 a 142 ppb. Debido al barrido de voltaje de -1 a 1 V y de 1 a -1 V durante la medición simultánea, la respuesta piezoeléctrica indica claramente la desorción y adsorción de los iones cadmio en el electrodo de trabajo, respectivamente. La medición simultánea permite entender claramente el fenómeno interfacial. La morfología y la composición de las películas de ODACNT antes y después de la interacción con el ión cadmio fueron estudiadas por microscopía electrónica de barrido por emisión de campo y espectroscopía de energía dispersiva.

Etorki *et al* [28] describen los estudios de un

sensor combinado de ondas electroquímicas y acústicas para la detección de iones metálicos en soluciones acuosas. El sensor está basado en el acomplejamiento superficial de los iones metálicos con ácido tiodisuccínico (TDS) funcionalizado en una monocapa autoensamblada con electrodos modificados en un resonador de cuarzo AT-cut de 10 MHz, que funcionan como una microbalanza de cristal de cuarzo (QCM). Estos electrodos modificados fueron empleados para la detección de iones cadmio en soluciones simples y mixtas con plomo (II) o cobre (II) como interferencias. La determinación acústica se basó en el cambio de frecuencia de QCM asociado a la unión del ligando en la superficie inmovilizada con los iones metálico en función de su concentración. Los datos de respuesta de frecuencia se adquirieron en condiciones sumergidas e inmersas para el ligando unido a un electrodo de Au y posteriormente la unión del ion metálico al ligando. En este último caso, los datos fueron interpretados de acuerdo a un rango de isotermas, de las cuales la isoterma de Temkin fue la que empíricamente mejor describió la dependencia de la concentración. Los datos de onda acústica proporcionaron información sobre la estequiometría y la energía de unión en el equilibrio. También se determinó la extensión de la unión de iones metálicos por ensayo coulométrico (tras la reducción del metal a valencia cero) después de la transferencia a una solución de electrolito libre de iones metálicos.

Cabe señalar que la contaminación del medio ambiente con metales pesados, como el cadmio, el plomo y el cobre representan una amenaza para los sistemas vivos, sobre todo porque tienden a acumularse hacia arriba en la cadena alimentaria. La innovación y el desarrollo de pruebas suficientemente sensibles para el Cd (II) son por lo tanto de considerable interés y relevancia. Los electrodos modificados químicamente han sido ampliamente explorados en el desarrollo de sensores químicos y biológicos y han sido acoplados con resonador de onda acústica para la detección en la microbalanzas de cristal de cuarzo.

Karczmarczyk *et al*[29] desarrollaron un biosensor para la detección de ocratoxina A (OTA) en vino tinto, debido a la necesidad de métodos

precisos, rápidos y simples para la detección de esta micotoxina altamente toxica, que contamina gran variedad de productos agrícolas y su presencia en la cadena alimentaria impone un peligro tanto en la salud humana y animal. Este sensor está basado en una microbalanza de cristal de cuarzo con monitoreo de disipación (QCM-D) y se desarrollaron anticuerpos para el reconocimiento de analitos específicos para la detección rápida y sensible de OTA en vino tinto. La combinación del ensayo competitivo indirecto con QCM-D proporciona un dispositivo sencillo que puede medir simultáneamente los cambios de frecuencia (Δf) y disipación (D), lo que da como resultado información detallada sobre la masa adherida a la superficie del sensor, así como los cambios conformacionales, las propiedades viscoelásticas y el estado de hidratación de la película.

Se ha alcanzado una buena sensibilidad QCM-D con el formato de detección específico de ensayo competitivo indirecto. Para aumentar la sensibilidad, la señal era amplificada aún más por la implementación de un anticuerpo secundario con nanopartículas de oro. Con este sistema se pudo alcanzar un límite de detección en un nivel de ng mL^{-1} . Además, al combinar el monitoreo simultáneo de los cambios de frecuencia y disipación, se caracterizaron las propiedades mecánicas y viscoelásticas de la biopelícula.

Sharma *et al* [30] realizaron un estudio sobre el monitoreo del proceso de fermentación del té negro utilizando un dispositivo electrónico basado en un sensor QCM, debido a que en la fabricación del té negro, la fermentación desempeña un papel importante para determinar la calidad del té terminado, teniendo lugar una compleja cadena de reacciones bioquímicas y las hojas verdes se transforman de aroma floral a dulce. Es necesario el monitoreo y la detección del tiempo óptimo de fermentación para controlar los grados del té. Esta investigación presenta un método de monitoreo en tiempo real para detectar el tiempo óptimo de fermentación del té negro utilizando un dispositivo electrónico que consta de ocho sensores de microbalanza de cristal de cuarzo (QCM). El sensor está recubierto con materiales de recubrimiento derivados de la glucosa, tales como maltosa

(MAL), maltodextrina (MDEX), ciclodextrina (-CD), D-glucosa (D-GLU) y polietilenglicoles (PEG) con diferentes pesos moleculares, 200, 1500, 4000 y 6000. Se determinaron los tiempos óptimos de fermentación para doce muestras de té negro y los resultados muestran una buena concordancia con las estimaciones del método de referencia basado en espectrofotometría ultravioleta–visible (UV).

Se ha reportado un dispositivo electrónico que consta de sensores MOS para detectar el tiempo óptimo de fermentación para el té negro. Sin embargo, el conjunto de sensores estaba compuesto por sensores de gas de semiconductores de óxido metálico (MOS) disponibles comercialmente. Los sensores MOS tienen una selectividad limitada; además, necesitan ser operados a temperaturas elevadas, para facilitar la absorción de los gases de interés. Por lo tanto, su consumo de energía también es alto, lo que limita su portabilidad para las pruebas de campo. La menor selectividad hacia los compuestos de los aromas del te puede conducir a errores en los tiempos de fermentación óptimos predichos. En este sentido, el uso de sensores QCM puede ser explorado, ya que son comunes entre los investigadores debido a su bajo precio, su sensibilidad a la medida, su facilidad de fabricación y sus funciones de recuperación rápida de respuesta. Los sensores de QCM se desarrollan a partir de los espacios en blanco de cuarzo recubiertos con materiales apropiados sensibles al analito que ofrecen muchos sitios de adsorción activa para las moléculas de gas.

El aroma del té está determinado por sus constituyentes volátiles. Se ha establecido que las oxidaciones acopladas de los aminoácidos, con los polifenoles que funcionan como portadores, dan como resultado la formación de aldehídos volátiles, que presumiblemente hacen alguna contribución hacia el aroma. Se supone que estos aldehídos, se transforman en otros productos responsables del sabor del té. El sabor del té negro está, por lo tanto, relacionado con los componentes polifenólicos. La variación de la concentración de teaflavina con la duración de la fermentación forma la base del método instrumental para la detección del tiempo óptimo de fermentación.

En este trabajo, se evaluaron los tiempos de fermentación óptima utilizando un dispositivo electrónico. Los resultados se validaron con las concentraciones de teaflavina estimadas en diferentes etapas de fermentación para detectar el tiempo óptimo de fermentación del té negro utilizando un espectrofotómetro visible UV como método de referencia.

Deng *et al* [31] fabricaron una matriz de sensores QCM con cuatro sensores QCM modificados en la superficie, es decir, nanotubos de carbono de paredes múltiples, grafeno, óxido de cobre y polianilina y se aplicó para evaluar la vida útil de los huevos al detectar los volátiles. Las morfologías de los materiales sensibles en los electrodos se analizaron con un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE–SEM), y las respuestas de los sensores fueron controladas por un sistema de medición de frecuencia de fabricación propia. En particular, estos cuatro sensores mostraron una sensibilidad, reversibilidad, repetibilidad y estabilidad a largo plazo relativamente buenas. Luego, la matriz de sensores se aplicó para detectar volátiles de huevos con diferente vida útil. El resultado del análisis discriminante lineal (LDA) superó al análisis de componentes principales (PCA) y mostró una excelente precisión de clasificación. Se empleó la regresión cuadrada parcial (PLSR) para predecir la vida útil de los huevos. Se podría concluir que la matriz de sensores QCM es efectiva para la detección de huevos con diferente vida útil, ofreciendo una estrategia alternativa para estimar la frescura de los huevos.

Entre los diversos tipos de sensores de gas, los de resistencia al gas basados en semiconductores de óxido metálico (MOS) se han utilizado ampliamente en la evaluación de la calidad de los productos alimenticios, como la carne, la fruta y la leche en forma de un conjunto de sensores. Sin embargo, la mayoría de los metalóxidos tienen una sensibilidad relativamente baja a temperatura ambiente. Alcanzan la sensibilidad deseada a aproximadamente 300–400 °C, resultando en una temperatura de funcionamiento alta y un alto consumo de energía.

Para mejorar la sensibilidad cruzada y eliminar

la correlación de la matriz de sensores, eligieron cuatro tipos diferentes de materiales sensibles para la modificación superficial de los cuatro sensores, que son nanotubos de carbono (CNT), grafeno, óxido de cobre (CuO) y polianilina (PANI). Los principales propósitos de ese estudio fueron

1. fabricar sensores de QCM con buenas propiedades de detección mediante el uso de métodos de modificación de la superficie,
2. para caracterizar las películas sensibles depositadas en los sensores de QCM y probar las propiedades de detección de gases, como sensibilidad, reversibilidad, repetibilidad, selectividad y estabilidad a largo plazo de la matriz de sensores QCM y
3. para discriminar los huevos con diferente vida útil y para predecir la vida útil de los huevos con la matriz QCM sensor fabricada.

Veríssimo *et al* [32] realizaron una evaluación de la contaminación de los alimentos con cobre usando un resonador de cristal de cuarzo piezoeléctrico, debido a que este metal es tóxico para los humanos en altos niveles y se debe controlar su consumo. Se utilizó un sensor de cobre basado en un cristal de cuarzo piezoeléctrico recubierto para seguir la contaminación de los alimentos cocinados en recipientes de cobre. Los resultados mostraron que los líquidos neutros, como el agua, no experimentan ninguna contaminación notable, sino que los ácidos, como el tomate, mostraron que extraían aproximadamente 17,5 microgramos de cobre por gramo, del recipiente donde se cocinaron durante 1 hora.

Los sensores piezoeléctricos para la determinación de cobre se han basado en la electrodeposición de este metal sobre los electrodos de cristal, o en la adsorción del ion cobre, o un complejo de cobre. Se han usado los cristales de cuarzo recubiertos y no recubiertos. Los cristales de cuarzo de electrodo recubierto no fueron selectivos y fueron utilizados como un detector después de una cromatografía de separación, o recubiertos con polímeros que contienen ligandos con cierta selectividad. Además de la falta de selectividad de algunos sensores, todos ellos, excepto el usado después de la HPLC, requería que los metales

fueran electroquímicamente eliminados, con una solución de 50 % de 2-propanol/agua o con una solución de EDTA durante los procesos de limpieza.

7. Conclusiones

En la presente revisión bibliográfica se trató los aspectos más relevantes de los sensores piezoeléctricos o másicos, específicamente en su modalidad de microbalanza de cristal de cuarzo (QCM) y sus aplicaciones en diferentes áreas, tales como ambiental, alimentaria, farmacéutica, médica, entre otras. El desarrollo de los sensores piezoeléctricos presenta especial interés, por tratarse de sensores de relativa facilidad de fabricación y tamaño, empleados en aplicaciones para la medición cualitativa o cuantitativa de especies químicas, además que permite monitorear análisis in situ y en tiempo real. Un estudio detallado de los microsensors es pertinente para el desarrollo de instrumentales económicos y portátiles para el análisis de muestras en tiempo real.

8. Referencias

- [1] Conrado Camacho. Los biosensores en la química analítica moderna. Monografía, Facultad de Agronomía, Centro de Tecnología Enzimática, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Cuba, 2009.
- [2] Luís Escalona, Lisbeth Manganiello, Martha López-Fonseca y Cristóbal Vega. Los sensores químicos y su utilidad en el control de gases contaminantes. *Revista Ingeniería UC*, 19(1):74–88, 2012.
- [3] Andrés Piñón. *Implementación de un nuevo método de caracterización de biosensores basados en balanza de cristal de cuarzo (QCM) mediante instrumentos virtuales multipropósito*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica. Universidad Da Coruña, A Coruña, España, 2014.
- [4] João Encarnação. *Development of biosensors for molecular analysis*. Tesis doctoral, Centro de Biomedicina Molecular e Estructural, Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia, Universidade do Algarve, Algarve, Portugal, 2007.
- [5] M. Vaz Angelico. *Desarrollo de un sensor para una especie de azufre en muestras ambientales*. Tesis doctoral, Departamento de Química, Universidad de Aveiro, Alveiro, Portugal, 2006.

- [6] Carlos Jiménez y Daniel León. Biosensores: Aplicaciones y perspectivas en el control y calidad de procesos y productos alimenticios. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 16(1):144–154, 2009.
- [7] Elif Burcu Bahad and Mustafa Kemal Sezgentürk. *Nanobiosensors*, chapter 8 – Biosensor Technologies For Analyses Of Food Contaminants. Academic Press, Bucharest, Romania, 2017.
- [8] Caterina Lamuta, Sebastiano Candamano, Fortunato Crea, and Leonardo Pagnotta. Direct piezoelectric effect in geopolymeric mortars. *Materials and Design*, 102:57–64, 2016.
- [9] Gobardhan Lal and D.C.Tiwari. Investigation of nanoclay doped polymeric composites on piezoelectric quartz crystal microbalance (QCM) sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 262:64–69, 2018.
- [10] Lisbeth Manganiello. *Desarrollo de sistemas de screening de muestras líquidas y sólidas basado en el empleo de sensores piezoeléctricos*. Tesis doctoral, Departamento de Química Analítica y Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Córdoba, Córdoba, España, 2002.
- [11] Marielis Escalona, Elinor Mejías, Cristóbal Vega y Lisbeth Manganiello. Prototipo para la medición de H₂S, basado en sensores piezoeléctricos para la evaluación de la halitosis. *Revista Ingeniería UC*, 23(3):351–375, 2016.
- [12] Sk Babar Ali, Barnali Ghatak, Sudipto Dutta Gupta, Nilava Debabhuti, Parthojit Chakraborty, Prolay Sharma, Arunangshu Ghosh, Bipan Tudu, Souvik Mitra, Mousumi Poddar Sarkar, Nabarun Bhattacharyya, and Rajib Bandyopadhyay. Detection of 3-Carene in mango using a quartz crystal microbalance sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 230:791–800, 2016.
- [13] Hernando Leyton y Néstor Roa. Representación matemática y técnicas de caracterización para celdas piezoeléctrica. *Revista Inventum*, 12(22):66–75, 2017.
- [14] Miguel Cúpich y Fernando Elizondo. Actuadores piezoeléctricos. *Ingenierías*, 3(6):22–28, 2000.
- [15] Paul P.L. Regtien and Edwin Dertien. *Sensors for Mechatronics*, chapter 8 – Piezoelectric sensors, pages 245–266. Elsevier, New York, second edition, 2018.
- [16] Georgia-Paraskevi Nikoleli, Dimitrios P. Nikolelis, Christina G. Siontorou, Stephanos Karapetis, and Theo Varzakas. *Advances in Food and Nutrition Research*, volume 84, chapter 2 – Novel Biosensors for the Rapid Detection of Toxicants in Foods, pages 57–102. Elsevier, New York, 2018.
- [17] Usman Latif, Serpil Can, Oliver Hayden, Paul Grillberger, and Franz L.Dickert. Sauerbrey and anti-sauerbrey behavioral studies in QCM sensors – detection of bioanalytes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 176:825–830, 2012.
- [18] E. Flores , J. Flores, M. Morín, E. Gutiérrez, M. Mendoza y S. Alcántara S. Construcción y caracterización eléctrica de una microbalanza con Bi₄Ti₃O₁₂. *Superficies y Vacío*, 23:153–160, 2010.
- [19] J. Hernández, C. Mendoza, V. Altuzar, S. Muñoz, S. Mendoza y A. Saucedo. Fabricación de biosensores piezoeléctricos para la lectura de interacciones antígeno–anticuerpo. *Revista Mexicana de Física*, 28(1):67–74, 2012.
- [20] Andrés Piñón. *Implementación de un nuevo método de caracterización de biosensores basados en balanza de cristal de cuarzo (QCM) mediante instrumentos virtuales multipropósito*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica. Universidad Da Coruña, A Coruña, España, 2014.
- [21] C. O’Sullivan and G. Guilbault. Commercial quartz crystal microbalances – Theory and applications. *Biosensors y Bioelectronics*, 14(8–9):663–670, 1999.
- [22] B. Kuswandi1, D. Futra, and L. Heng. *Nanotechnology Applications in Food, Flavor, Stability, Nutrition and Safety*, chapter 15 – Nanosensors for the Detection of Food Contaminants, pages 307–333. Academic Press, Bucharest, Romania, 2017.
- [23] Jiachi Chiou, Arthur Ho, Hang Wai, and Wing tak Wong. Rapid testing methods for food contaminants and toxicants. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(11):2243–2264, 2015.
- [24] Anne C. Rumiato e Inês Monteiro. Contaminantes em alimentos e orientação nutricional: reflexão teórica. *Revista Salud Pública*, 19(4):574–577, 2017.
- [25] M.Teresa Gomes, J.Rui Costa, and João Oliveira. The quantification of sodium in mineral waters using a quartz crystal microbalance. *Talanta*, 59(2):247–252, 2003.
- [26] D. Compagnone, M. Faieta, D. Pizzoni, C. Di Natale, R. Paolessec, T. Van Caelenberg, B. Beheydt, and P. Pittia. Quartz crystal microbalance gas sensor arrays for the quality control of chocolate. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 207:1114–1120, 2015.
- [27] Taneja P, V. Manjuladevi, K. Gupta, and R. Gupta. Detection of cadmium ion in aqueous medium by simultaneous measurement of piezoelectric and electrochemical responses. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 268:144–149, 2018.
- [28] Abdunasser M.Etorki, A. Robert Hillman, Karl S. Ryder, and Andrew Glidle. Quartz crystal microbalance determination of trace metal ions in solution. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 599(2):275–287, 2007.
- [29] Aleksandra Karczmarczyk and Karsten Haupt AMD Karl-Heinz Feller. Development of a QCM–D biosensor for ochratoxin. A detection in red wine. *Talanta*, 166:193–197, 2017.
- [30] Prolay Sharma, Arunangshu Ghosh, Bipan Tudu, Santanu Sabhapondit, Binoti Devi Baruah, Pradip Tamuly, Nabarun Bhattacharyya, and Rajib Bandyopadhyay. Monitoring the fermentation process of black tea using qcm sensorbased electronic nose. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 219:146–157, 2015.

- [31] Fanfei Deng, Wei Chen, Jun Wang, and Zhenbo Wei. Fabrication of a sensor array based on quartz crystal microbalance and the application in egg shelf life evaluation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(20):292–299, 2017.
- [32] Marta Veríssimo, João Oliveira, and M.Teresa Gomes. The evaluation of copper contamination of food cooked in copper pans using a piezoelectric quartz crystal resonator. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 111–112:587–591, 2005.

Breve reseña de las autoras

Profesora Cristina De Sousa

Magister en Ingeniería Ambiental. Candidata a Doctora por la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad de Carabobo. Adscrita al Departamento de Química Tecnológica de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Profesora Lisbeth Manganiello

Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad de Córdoba – España. Investigadora Adscrita al Centro de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Revisora de productos de I+D+i del Centro Nacional de Tecnología Química

Erratum

Comité de Edición Técnica

Revista Ingeniería UC, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

This erratum corrects an error in the paper Revista Ingeniería UC, 24(2), August 2017, 196–203

The title in English says

Tech note: Hydraulic evaluation of the bridges over La Guardia creek using a two-dimensional model with live-bed Carlos Freitez*, Fabiana Martínez, Jean Carlos Rincón

Should say

Hydraulic evaluation of the bridges over La Guardia creek using a two-dimensional model with live-bed Carlos Freitez*, Fabiana Martínez, Jean Carlos Rincón

The correction

The phrase “Tech Note:” should not appear in the title.

The title in spanish says

Nota técnica: Evaluación hidráulica de los puentes sobre la quebrada La Guardia aplicando un modelo bidimensional con fondo móvil

Should say

Evaluación hidráulica de los puentes sobre la quebrada La Guardia aplicando un modelo bidimensional con fondo móvil

The correction

The phrase “Nota técnica:” should not appear in the title.

Fe de errata

Comité de Edición Técnica

Revista Ingeniería UC, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Esta fe de errata corrige un error en el artículo Revista Ingeniería UC, 24(2), agosto 2017, 196–203

El título en inglés dice

Tech note: Hydraulic evaluation of the bridges over La Guardia creek using a two–dimensional model
with live–bed

Carlos Freitez*, Fabiana Martínez, Jean Carlos Rincón

Debe decir

Hydraulic evaluation of the bridges over La Guardia creek using a two–dimensional model with live–bed
Carlos Freitez*, Fabiana Martínez, Jean Carlos Rincón

La corrección

En el título no debe ir la frase “Tech note:”.

El título en castellano dice

Nota técnica: Evaluación hidráulica de los puentes sobre la quebrada La Guardia aplicando un modelo
bidimensional con fondo móvil

Debe decir

Evaluación hidráulica de los puentes sobre la quebrada La Guardia aplicando un modelo bidimensional
con fondo móvil

La corrección

En el título no debe ir la frase “Nota Técnica:”.

Índice de materias

A

absorbancia, 158
acero AISI 1045, 99
acero de refuerzo, 93
acero inoxidable dúplex, 194
acero inoxidable dúplex SAF 2304, 338
acero inoxidable grado 304 H, 396, 415
ácido poliláctico, 184, 248
adaptación con un stub en paralelo, 381
alimentos, 291, 433
Alto-Santa, 347
AM, 221
análisis espectral de torque electromagnético, 213
antenas de banda ultra ancha, 134
aplicaciones de la colofonia, 325
arbitration, 4
asfaltenos, 120
automatización, 69

B

banda de microondas, 134
Bixa Orellana L., 291
bixina, 291

C

cáscara de huevo de gallina, 61
calcinación, 86
calentamiento, 338
cambio climático, 307
caracterización, 86
caracterización de antenas, 134
carga fresca, 31
carta de Smith, 381
ciclo rankine regenerativo, 204
cluster, 108
coeficiente de los gases residuales, 31
coeficiente de rugosidad de Manning, 43
coeficientes de Fourier, 276
colorantes naturales, 291
comercio, 10
comportamiento mecánico, 184, 248, 338

composición de la mezcla de servicio, 31
conductividad, 388
contaminantes, 433
control, 69
criogenia, 424

D

dedos, 69
demanda bioquímica de oxígeno, 369
demanda de agua, 307
demanda química de oxígeno (DQO), 61
demulsificantes, 120
desechos, 369
desplazamiento, 10
detección de cambios, 19
dióxido de titanio, 357, 403
dimensión fractal, 276
discriminante canónico, 213
disminución de demanda de calor, 204
disponibilidad, 108
disponibilidad Hídrica, 307

E

ecuación de Manning, 43
edition, 4
eficiencia de remoción, 61
emulsiones agua:aceite, 388
encadenamiento, 10
ensayo de torsión, 99
esfuerzo de corte, 99
espectroscopia, 388
estudio de tendencia, 325
evaporadores verticales, 149
excentricidad estática y dinámica, 213
exposición al fuego, 93
exténderes, 403
extender, 357

F

factor de riesgo, 237
fases intermetálicas sigma y chi, 396
fases sigma, 415
fragilización, 396, 415

fuentes renovables, 50

G

geomática, 19
gestión del agua, 166
gestión del agua en Perú, 166
GNU Octave, 381
Google Earth Engine, 347

H

herramienta computacional, 149
herramientas de gestión del agua, 166
hidrotratamiento, 259
hidroxiapatita, 259

I

identificador físico de celda, 237
imágenes multiespectrales, 276
impedancia, 388
incineración, 369
instrumentación, 266

L

látex , 357, 403
laboratorios de física, 76
linux, 108
lixiviación, 291
lodo rojo, 86
long term evolution (LTE), 237
losa, 93

M

manejo integrado de recursos hídricos, 166
mecanizado., 424
mezclas de polímeros, 184, 248
microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM), 433
microcontrolador, 50
microdureza, 338
mistakes, 4
Modelo de Escorrentía de Fusión de Nieve (SRM), 347
MODIS, 347
modulación de amplitud, 221
Monte Carlo, 158
multisensores, 76

N

neuro-control, 50
nevus, 276

normativa, 369

O

onda de superficie, 221
onoto, 291
optimización, 204

P

paralelo, 158
parque ecológico, 50
películas de Langmuir, 120
permitividad, 388
petróleo, 120
picaduras, 194
piezoeléctrico, 433
pigmento, 357
pino caribe, 325
pintura semimate, 357
poliestireno, 184, 248
precipitación-reducción, 61
proceso de admisión, coeficiente de llenado, 31
PVC, 43

Q

QucsStudio, 381

R

radiodifusión sonora, 221
radiopropagación, 221
red adaptativa, 50
red multicapa, 50
Red Pitaya, 266
reflexión difusa, 158
reformulación, 403
rehabilitación, 69
resistencia a la corrosión, 194
resistencia a la tensión, 93
rosin, 325

S

scientific articles, 4
sensores, 433
servidores, 108
sistemas de adquisición y procesamiento de datos, 76
sulfatos, 369
surfactantes, 120

T

teledetección, 19
tenacidad de impacto, 338
tenacidad de impacto., 396, 415
terminal de usuario, 237
tiofeno, 259
tipo del combustible, 31
transferencia de calor, 149
transporte público, 10
tratamiento térmico, 424

U

usos de la tierra, 19

V

variables de operación, 149
vida útil, 424
virtual, 266

W

Weap, 307

Subjects index

A

absorbance, 158
 adaptive network, 50
 AISI 1045 steel, 99
 Alto-Santa, 347
 AM, 221
 antennas characterization, 134
 arbitration, 4
 artículos científicos, 4
 asphaltenes, 120
 automation, 69
 availability, 108

B

biochemical oxygen demand, 369
 Bixa Orellana L., 291
 bixina, 291
 broadcasting, 221

C

calcination, 86
 canonical discriminant, 213
 caribbean pine, 325
 chain, 10
 characterization, 86
 chemical oxygen demand (COD), 61
 chicken egg shell, 61
 climate change, 307
 cluster, 108
 coefficient of residual gases, 31
 colophony application, 325
 composition of the air-fuel-residual gases-
 mixture, 31
 computational tool, 149
 conductivity, 388
 contaminants, 433
 control, 69
 corrosion stress, 194
 cryogenics, 424
 cutting effort, 99

D

data acquisition and processing systems, 76

decrease in heat demand, 204
 demulsifiers, 120
 detection of changes, 19
 diffuse reflectance, 158
 displacement, 10
 duplex stainless steel, 194
 duplex stainless steel SAF 2304, 338

E

ecological park, 50
 edición, 4
 embrittlement, 396, 415
 extenders, 357, 403

F

finger, 69
 fire exposition, 93
 food, 291, 433
 Fourier coefficients, 276
 fractal dimension, 276
 fresh charge, 31
 fuel mode, 31

G

gas-exchange process, 31
 geomatics, 19
 GNU Octave, 381
 Google Earth Engine, 347
 ground-wave, 221

H

heat transfer, 149
 heating, 338
 hydrotreating, 259
 hydroxyapatites, 259

I

impact toughness, 338, 396, 415
 impedance, 388
 incineration, 369
 instrumentation, 266
 integrated management of water resources, 166
 interference amplitude modulation, 221

intermetallic phases sigma y chi, 396, 415

L

land uses, 19

Langmuir films, 120

latex, 357, 403

leaching, 291

linux, 108

long term evolution (LTE), 237

M

machining, 424

Manning equation, 43

Manning roughness coefficient, 43

mechanical behavior, 184, 248, 338

microcontroller, 50

microhardenes, 338

microwave bands, 134

mistakes, 4

MODIS, 347

Monte Carlo, 158

multilayer network, 50

multisensors, 76

multispectral images, 276

N

natural dyes, 291

neuro-control, 50

nevus, 276

O

onoto, 291

operation variables, 149

optimization, 204

P

parallel, 158

parameter normative-legal, 61

permittivity, 388

petroleum, 120

physical cell ID (PCI), 237

physics laboratories, 76

piezoelectric, 433

pigment, 357

pitting, 194

polylactic acid, 184, 248

polymer mixtures, 184, 248

polystyrene, 184, 248

precipitation-reduction, 61

public transport, 10

PVC, 43

Q

quartz crystal microbalance (QCM), 433

QucsStudio, 381

R

radio, 221

red mud, 86

Red Pitaya, 266

reformulation, 403

regenerative rankine cycle, 204

regulations, 369

rehabilitation, 69

remote sensing, 19

renewable sources, 50

risk factor, 237

rosin, 325

S

semi-matt paint, 357

sensors, 433

servers, 108

single-stub matching, 381

slab, 93

Smith chart, 381

Snowmelt Runoff Model (SRM), 347

spectral analysis of electromagnetic torque, 213

spectroscopy, 388

stainless steel 304 H, 396, 415

static and dynamic eccentricity, 213

steel reinforcement, 93

sulfates, 369

surfactants, 120

T

tensile resistance, 93

thermal treatment, 424

thiophene, 259

titanium dioxide, 357, 403

torsion test, 99

trade, 10

trend study, 325

U

ultra wideband antennas, 134

useful life, 424

user equipment (UE), 237

V

vertical evaporators, 149
virtual, 108, 266
volumetric efficiency, 31

W

waste, 369
water availability, 307
water demand, 307
water management, 166
water management in Peru, 166
water management tools, 166
water:oil emulsions, 388
WEAP, 307

Índice de autores (*Author index*)

A

Acevedo, Franklin, 396, 415
Alfonzo, Carlos, 99
Almarza, Ángel D., 149, 204
Aponte, Carlos, 266
Araya I., Alejandro, 43
Ascencio, Alvaro, 276

B

Barboza, Francis, 213
Barrios, Nelson, 388
Benavides, Pablo, 69
Bespín, Angel, 93
Bolívar, Alejandro, 149, 204
Bolaños, Francisco, 99
Bullón, Johnny, 120

C

Caicedo, José, 99
Calizaya Llatasi, Elmer E., 347
Camacaro, José, 291
Cedeño, Patricia, 184
Cevallos U., Gabriel, 10
Contreras, Andry, 134
Correia, Angelina, 369

D

De Sousa, Cristina, 369, 433
Delgado-Linares, José G., 120
Duarte, David, 108
Duarte, Jonattan, 50
Dunia, Emery, 76

F

Farias, Bettys, 19
Fernández, Robert, 266
Figueroa, Edith, 259
Forgiarini, Ana M., 120
Francisco, Ron, 424

G

Gómez, José, 291
García, Jesús, 194

González C., Valentina, 43
González, Yubiry, 76
Guerra, Ledy, 213
Guevara, Edilberto, 19
Guia, Nazareth, 108
Guzmán, Omar, 194

H

Heras, Ricardo, 184
Hernández, Juan Carlos, 184, 248
Hurtado, Vanessa, 149, 204

J

Jamul, Nasser, 369
Jiménez Grimán, Jesús J., 4
Jiménez, Maryelvi, 43
Jiménez, Milagros, 291
Jorge, José, 388

L

López C., Diego, 10
López, Darwin, 61, 86
López, G., 158
Linares, C., 86
Linares, Carlos Felipe, 259

M

Márquez, Adriana, 19
Maldonado, Omar, 248
Manganiello, Lisbeth, 291, 433
Martínez, Edson, 93
Matyukhin, L. M., 31
Medina, Jhonny, 184, 248
Mejía Marcacuzco, Jesús A., 347
Mejías, Carlos, 266
Monagas, Eva, 213
Mosquera, Washington, 69
Muñoz, A., 158
Muñoz, José L., 357, 403

N

Núñez G., Shirley, 10
Nava, Cesar, 50

Navia, José Antonio, 388

O

Ocanto, Freddy, 259

Ojeda, David, 69

Oliva, David, 388

Ortiz, Diego, 69

Osman, Ahmad, 4, 237, 276

P

Pérez, Jesús, 76

Pérez, José A., 357, 403

Pérez, Nerio, 93

Paricaguán, Belén M., 357, 403

Patiño, Edwin, 338

Peñaloza, William, 369

Perafan, Herney, 108

Pereira, Juan Carlos, 388

Perretti, Giusseppe, 266

Porrello, Argel, 99

R

Ramones, Ivan, 424

Rey Lago, Demetrio, 19

Rey, Demetrio, 108

Robledo, Fabián, 221

Roche, Yenifer, 248

Rodríguez, Irahis, 213

Rodríguez, María, 388

S

Sáenz, Laura, 194, 338, 396, 415

Salazar – Rodríguez, Franklin, 120

Sandoval-Ruiz, Cecilia E., 50

Santeliz, Anahi, 99

Scola, Salvador, 93

Sevilla, Fabiola, 357, 403

Sidorovas, Luis, 424

Steckler V., David J. , 50

T

Tatá, Yasmín, 120

Terán, Rubén, 213

Torres D., Fernando, 10

Torres, M., 61

Torres, Yofrank, 237

U

Urdaneta, Maryory, 134

V

Valor, Romer, 237

Vega, Cristóbal, 4, 291

W

Windevoxhel, R., 61

Y

Yaguaratty, Jesús, 149

Z

Zambrano, José Jhoan, 50

Zapata, Carlos, 184, 248

Zapata, José, 276

Zozaya, A. J., 381

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 Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

nivel local, Universidad de Carabobo y sus estado de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como 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 bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

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 tiene cubre las comunidades a

Editorial line

Scientific mission

Revista Ingeniería UC is the main body for scientific and technological diffusion at Facultad de Ingeniería of Universidad de Carabobo.

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 Dirección de Investigación of Facultad de Ingeniería. 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).

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 under the auspices of Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

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, Universidad de

Normas para la presentación de artículos

Generales

Linea 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 aplicadas a la misma.

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 del trabajo está comprometido en forma formal que el trabajo es original e inédito, manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y que su trabajo será arbitrado.

Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato \LaTeX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en disco compacto y presentar tres copias en físico.

Los trabajos en \LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras deben ser en escalas de grises claros, no 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 y en un archivo aparte llamado Leyenda de Figuras.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante “negritas”. También deben incluirse las tablas en archivos aparte numerados y es necesario incluir un archivo con las leyendas de las tablas.

Toda tabla y/o figura deben ser numeradas en arábigos (1, 2, ...), citadas 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 17,5cm.

No es estilo de la revista frases como; “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

Los artículos provenientes del exterior del país serán aceptados a través de correo electrónico.

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 y

6. Referencias Bibliográficas.

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: Beale [9], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [9], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en L^AT_EX se usará el estilo de bibliografía “unsrt”.

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 en un libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajo de grado de materia
- 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) (Apellidos nombres, tipo título).
- Título.
- *Nombre de la revista*,
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

[9] Beale G.O., Arteaga F.J. y Black W.M. Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(4), 301–312, 1998

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, editorial, lugar de publicación y año de publicación.

Por ejemplo:

[9] Hill J.M. and Dewynne J.N. *Heat Conduction*. Blackell set. Pub. , London, 1992

En caso de colección editada: Autor(es). Título, En: editor, año, *título*, volumen, editorial, lugar, número de páginas y año de publicación.

Por ejemplo:

[11] Kalla S. L. and Galué L. (1993): Generalized

fractional Calculus. Global Publishing Company, USA, 145-178.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas.

Notas Finales

Los artículos serán sometidos a arbitraje previa a la publicación. Se podrán entregar separatas por tema a solicitud del autor, cuyo costo será a convenir

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will consider for publication contributions original and unpublished in engineering, in particular the 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 work author is committed to formal so that the paper is original and unpublished, he shows 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 L^AT_EX or in Microsoft WORD.

The Word works must employ a font of family Time, to be stored in compact disk and to present three copies in physical.

The labored in L^AT_EX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in eps.

The figures must be in gray scale, no color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must 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 file apart 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 17,5cm.

The articles coming from other country are accepted through electronic mail (email). The writing sequence for the articles shall have these steps: Title Page, Introduction, Methodology or Research Development, Analysis and Discussion of Results and Conclusions, and 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: Jhonson [9], or simply [9] with no author name.

For \LaTeX work will use bibliography style “unsrt”.

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:

Beale G. O. Arteaga F. J. and Black W.M., Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions of Industrial Electronics*. 39(4), 301-312, 1992.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, publisher, place and year of publication should be included. For example:

Hill J. M. and Dewynne J. N. *Heat Conduction*. Blackell Set. Pub., London, 1987.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), *title*. In: editor, *title*, volume, publisher, place and year. For example:

Kalla S. L. and Galué L. Generalized fractional, in *Calculus*. Global Publishing Company, USA, 145-178, 1997.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations).

Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process before they can be published. Offprints can be sent for article with a request from the Author(s). Any charge will be arranged by mutual agreement.

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 mantiene sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma:

Nombre y apellido:

El autor para correspondencia:

Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and co-authors, 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 indexada 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. José Luis Nazar

Decano

Prof. Enrique Pérez Pérez
Director Esc. Ing. Industrial

Prof.^a Olga Martínez
Asistente al Decano

Prof. Reny Marin
Director Consejo Facultad

Prof. César Rodolfo Ruiz
Director Esc. Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof.^a Marianna Barrios León
Directora de Postgrado

Prof. Carlos R. Alfonzo A.
Director Esc. Ing. Mecánica

Prof. Edson Martínez Oberto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Manuel Elías Jiménez Bahri
Director de Administración

Prof. Carlos Hernández
Director Esc. Ing. Química

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos Profesorales

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de Investigaciones
Químicas

Prof. Angel D. Almarza M.
Director de Investigación y Producción
Intelectual

Prof.^a María Teresa Cruz
Directora de Docencia y Desarrollo Curricular

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de
Imágenes

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof.^a Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof.^a Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán
Director del Instituto de Matemática y
Cálculo Aplicado

Prof. David E. Duarte G.
Dirección de Tecnologías de la Información
y Comunicación

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.

Se publica cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC). 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

Página Web: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>; <http://revista.ing.uc.edu.ve/>

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832
Enero – Diciembre 2018, Volumen 25
Número 1–3

Revista Ingeniería UC se encuentra indexada en:
Revenicyt (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.

Contenido general: páginas V y XI.



Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela