

Enero – abril 2018, Vol. 25, N° 1, 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**  
[www.ing.uc.edu.ve/revistaing](http://www.ing.uc.edu.ve/revistaing)  
[revista.ing.uc.edu.ve](http://revista.ing.uc.edu.ve)

VALENCIA – VENEZUELA

ISSN 1316–6832  
Depósito legal pp 92.0200

Revista  
Ingeniería UC

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

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

Editora - Jefe	Editores	Editores Honorarios		
Prof. <sup>a</sup> Lisbeth Manganiello, PhD Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	Prof. Cristóbal Vega, PhD Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo Prof. Jesús J. Jiménez Grimán, MSc Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	Prof. Edilberto Guevara, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo Prof. Francisco Arteaga, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo		
Editores Asociados	Prof. Francisco Soto, MSc, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	Prof. Angelina Correia, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo PhD		
Junta Editorial	Dr. Enrique Barbien University of Houston, USA Dr. Guillermo Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela Dr. Herbert J. Sira R. CINVESTAV-IPN, México Dr. Johnny Bullon Universidad de los Andes, Venezuela Dr. Teodoro García Universidad de Carabobo, Venezuela	Dra. Maura Vázquez de Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela Dr. Merlin Rosales Universidad del Zulia, Venezuela Dr. Pablo Baricelli Universidad de Carabobo, Venezuela Dr. Roberto Callarotti IVIC, Venezuela Dr. José A. Díaz Universidad de Carabobo, Venezuela		
Comité Técnico*	Dr. Eliecer Colina, ULA Dr. Francisco Garcia Sanchez, USB Dr. Gian Franco Passariello, USB Dr. Giovanni De Mercato, USB Dr. Luis Vallés, UC Dr. Alfredo Varela, UC Dr. Sergio Pérez, UC Dr. Antonio Bonsjak, UC Dra. Susana Salinas de Romero, LUZ Ing. Donato Romanello, MSc, UC Ing. Thalia San Antonio, MSc, UC Dra. Nereida Sanchez, UC Ing. Lucila Martino, UC Ing. Ricardo Villegas, MSc, UC	Ing. Paulino Del Pino, MSc, UC Ing. Carlos Lameda, MSc, UNEXPO Ing. Alfonso Alfonsi, UDO Ing. Ángel Vellegas, UC Dr. Demetrio Rey Lago, UC Dr. Alfonso Zozaya, UC Dr. José A. Díaz, UC Dr. Guillermo Montilla, UC Dra. Laura Sáenz, UC Lic. Atilio Morillo, MSc, UC Ing. Sergio Vellazana, MSc, UC Lic. Reina Windevoxhel, MSc, UC Ing. Enrique Pérez, UC Ing. María Teresa Cruz, MSc, UC	Dr. César O. Seijas Fossi, UC Dr. Fernando Mora, USB Dr. Enrique Cázares Rivera, ITESM, México Dra. Yadira Martínez, UC Ing. Luis Llave, UC Ing. Johel Rodríguez, MSc, UPV, España Lic. Celeste Fernandez, MSc, UC Ing. José R. Pacheco, UC Dr. Cristóbal E. Vega González, UC Ing. Teddy Rojas, MSc, UC Ing. Carlos Jiménez, MSc, UC Dr. Luis Melián, UC Ing. Antonio Millán, MSc, UC Ing. Jesús Jiménez, MSc, UC	Ing. Wilmer Sanz, MSc, UC Ing. Carlos Hernández, MSc, UC Ing. Enrique Flores, MSc, UC Dra. Damelys Zabala, UC Ing. Jennifer Aparicio, UC Dra. Lilly Marcano, UC Ing. César Martínez, UC Ing. Alejandro Centeno, UC Ing. Enrique Flores, MSc, UC Ing. Franklin Camejo, UC Ing. Vanesa Altomares, UC Dra. Sandra Cabello, UC Ing. Julio Pineda, UC *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](mailto:revistaing@uc.edu.ve)

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



Revista INGENIERÍA UC  
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*)

<b>Volumen 25 Número 1</b>	<b>1</b>
<b>Editorial volumen 25 número 1</b>	<b>2</b>
<b>1 Letter to the editor: Use of template for the preparation of the articles in scientific journal</b>	<b>4</b>
Usó de plantilla para la preparación de artículo en revista científica	
<i>Jesús J. Jiménez G., Cristóbal Vega y Ahmad Osman</i>	
<b>2 System of public transportation of passengers, its chaining and displacement towards the commerce</b>	<b>10</b>
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>	
<b>3 Characterization spatio-temporal land use in watershed using geomatic techniques</b>	<b>19</b>
Caracterización espacio-temporal del uso de tierras en cuencas mediante técnicas geomáticas	
<i>Bettys Farias, Adriana Márquez, Demetrio Rey Lago y Edilberto Guevara</i>	
<b>4 The alternative method of the estimate of the quality of gas-exchange processes in the internal-combustion engine</b>	<b>31</b>
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>	
<b>5 Analysis of the manning roughness coefficient variation in regard to the channel slope of 315 mm diameter PVC</b>	<b>43</b>
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>	
<b>6 Design of Neural Networks on microcontrollers, applied in functional modules for an eco-park</b>	<b>50</b>
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*

<b>7</b>	<b>Evaluation of the procedures of heavy metal removal in COD residues</b>	<b>61</b>
	Evaluación de los procedimientos de remoción de metales pesados en los residuos de la DQO	
	<i>M. Torres, Darwin López y R. Windevoxhel</i>	
<b>8</b>	<b>Implementation of a control system for a hand's passive rehabilitation device</b>	<b>69</b>
	Implementación de un sistema de control para rehabilitador pasivo de dedos de la mano	
	<i>Washington Mosquera, Pablo Benavides, David Ojeda, Diego Ortiz</i>	
<b>9</b>	<b>Design of a system of acquisition and data processing with the use of multisensors for university physics laboratories</b>	<b>76</b>
	Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para laboratorios de física universitarios	
	<i>Yubiry González, Jesús Pérez y Emery Dunia</i>	
<b>10</b>	<b>Characterization of the red mud calcined to different temperatures</b>	<b>86</b>
	Caracterización del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas	
	<i>Darwin López y C. Linares</i>	
<b>11</b>	<b>Fire effect on the tensile resistance of slabs steel reinforcement</b>	<b>93</b>
	Efecto del fuego sobre la resistencia a tracción del acero de refuerzo en losas	
	<i>Angel Bepin, Nerio Pérez, Edson Martínez y Salvador Scola</i>	
<b>12</b>	<b>Evaluation of the mechanical behavior of an AISI 1045 steel subjected to thermal treatments</b>	<b>99</b>
	Evaluación del comportamiento mecánico de un acero AISI 1045 sometido a tratamientos térmicos	
	<i>Francisco Bolaños, José Caicedo, Carlos Alfonzo, Anahi Santeliz y Argel Porrello</i>	
<b>13</b>	<b>Design of a high availability cluster for a university virtual educational environment</b>	<b>108</b>
	Diseño de un cluster de alta disponibilidad para un entorno educativo virtual universitario	
	<i>Herney Perafan, Nazareth Guia, Demetrio Rey y David Duarte</i>	
	<b>Índice de materias</b>	<b>117</b>
	<b>Subjects index</b>	<b>118</b>

<b>Índice de autores (<i>Author index</i>)</b>	<b>119</b>
<b>Apéndices</b>	<b>1</b>
<b>Caso desleal (<i>Unfair Case</i>)</b>	<b>2</b>
<b>Unfair Case. Dynamic modulus of elasticity of <i>Swietenia humilis</i> and <i>Alnus acuminata</i> wood. Assessment by transversal vibration</b>	<b>3</b>
<b>Caso desleal.</b> Módulo de elasticidad dinámico de la madera de <i>Swietenia humilis</i> y <i>Alnus acuminata</i> . Evaluación por vibraciones transversales	
<i>Javier R. Sotomayor C. y José María Villaseñor Aguilar</i>	
<b>A. Línea editorial</b>	<b>9</b>
<b>B. Editorial line</b>	<b>10</b>
<b>C. Normas para la presentación de artículos</b>	<b>11</b>
<b>D. Authors Information</b>	<b>14</b>
<b>E. Carta de compromiso</b>	<b>16</b>
<b>F. Compromise letter</b>	<b>17</b>
<b>G. Índices de Revista Ingeniería UC</b>	<b>18</b>
<b>H. Cuerpo Editorial</b>	<b>19</b>

# **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  $\text{\LaTeX}$  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.

Fariás 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<sup>\*,a</sup>, Cristóbal Vega<sup>a</sup> y Ahmad Osman<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

<sup>b</sup>Centro 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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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 unsrtr.
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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X)*

- La plantilla actual para los artículos está realizada en clase documento article de L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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 redundante 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  $\text{\LaTeX}$  de fuentes, entre otros.
- Es posible utilizar comandos de  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  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] Alexánder 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 Trafico 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 a 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 precepción 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 reestructuraron 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 4 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 5), 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.

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

Estas cifras demuestran que la nueva asignación 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 primero 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				
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 asfaltadas, 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 Cámara 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 afecto 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 disminución 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<sup>a</sup>, Adriana Márquez<sup>a</sup>, Demetrio Rey Lago<sup>b</sup> y Edilberto Guevara<sup>\*,c</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

<sup>c</sup>Tribunal 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 km<sup>2</sup>, 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.

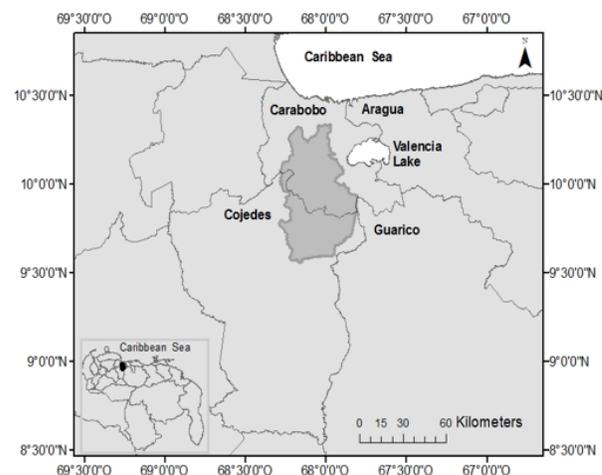


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Pao en la región Centro-Norte de la República de Venezuela.

Las elevaciones clasificadas con respecto al área ocupada en la cuenca del río Pao son: 119–339 msnm (777.08 km<sup>2</sup>; 25.74 %), 339.01–599 msnm (1483.57 km<sup>2</sup>; 49.14 %), 599.01–962 msnm (597.44 km<sup>2</sup>, 19.79 % y 962.01 - 1 788 msnm (160.43 km<sup>2</sup>, 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,

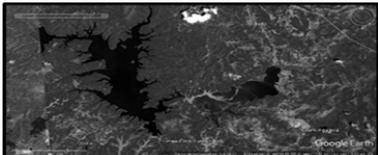
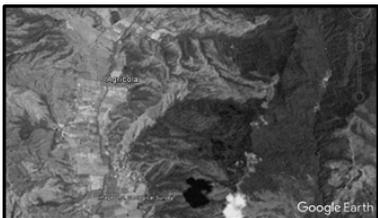
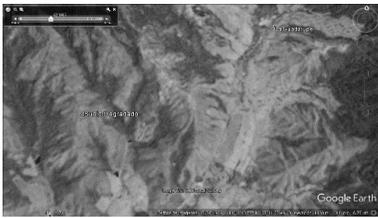
calibración radiométrica, y correcciones atmosféricas presentes en los datos [9]. Los valores de los pixeles de las imágenes se encuentran generalmente en unidades de niveles digitales y se deben transformar en unidades de energía reflejada, lo que se conoce como calibración radiométrica[10]. Adicionalmente, 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 Guataparo)
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 1 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 2 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 2 y 3 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;
9. Sombras.

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

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.

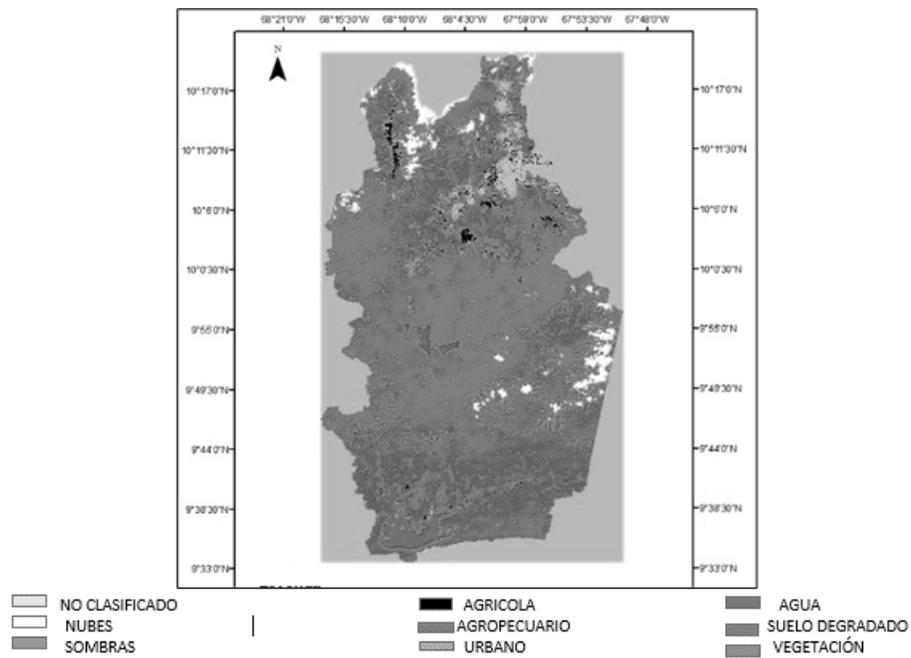


Figura 2: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante los mapas de los usos y coberturas terrestres de la cuenca del río Pao aplicado sobre imágenes de la reflectancia del satélite Landsat desde 1986

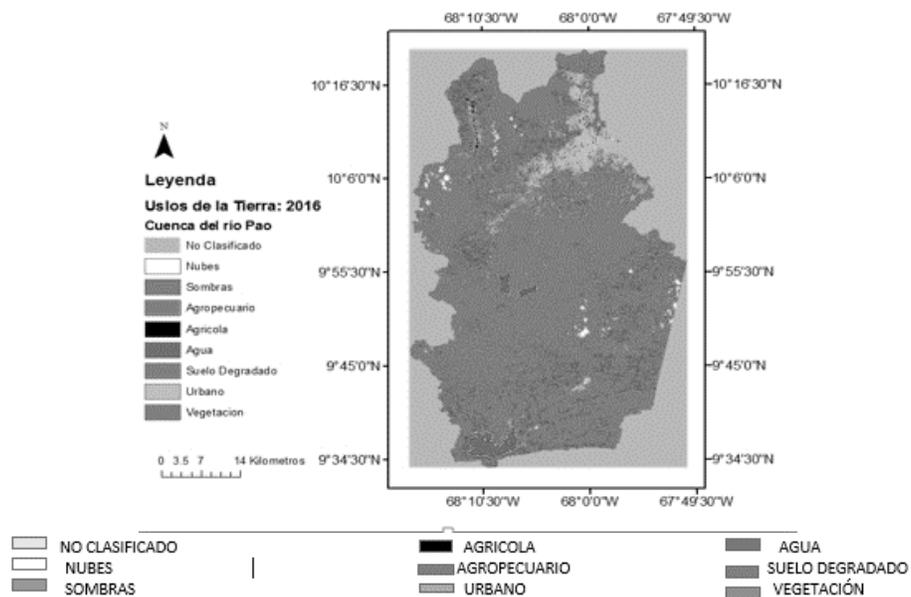


Figura 3: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante los mapas de los usos y coberturas terrestres de la cuenca del río Pao aplicado sobre imágenes de la reflectancia del satélite Landsat desde 2016

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

1. Urbano: 7, 100 %;
2. Agropecuario: 9, 100 %;

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	<b>66</b>									66	100	1	
	2		<b>7</b>					<b>1</b>			8	87.5	0.8715	
	3			<b>9</b>				<b>1</b>			10	90	0.8694	
	4				<b>4</b>						4	100	1	
	5					<b>3</b>					3	100	1	
	6						<b>103</b>				103	98.5	1	
	7						<b>2</b>	<b>54</b>			56	96.43	0.8543	
	8				<b>1</b>				<b>4</b>		5	80	0.7869	
	9									<b>1</b>	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	<b>164</b>									164	100	1	
	2		<b>16</b>	<b>1</b>				<b>1</b>			18	88.89	0.8853	
	3			<b>99</b>			<b>1</b>				100	99	0.8875	
	4				<b>1</b>						1	100	1	
	5					<b>4</b>					4	100	1	
	6						<b>165</b>				165	100	1	
	7			<b>1</b>				<b>56</b>			57	98.25	0.9803	
	8								<b>2</b>		2	100	1	
	9									<b>1</b>	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

- 3. Agrícola: 5,80 %;
- 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

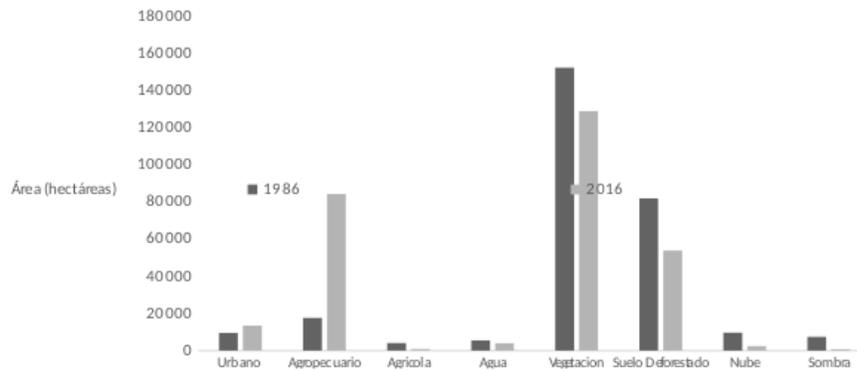


Figura 4: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante el área de las clasificaciones de uso y cobertura de la tierra tanto en Ha

pixeles 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;
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 pixeles 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 pixeles 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 4 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 5 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.

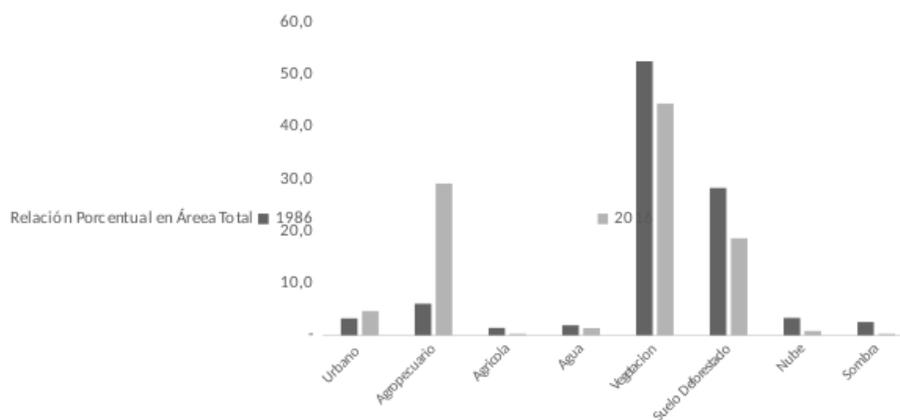


Figura 5: Resultados del método de la comparación postclasificación expresados mediante el área de las clasificaciones de uso y cobertura de la tierra como en relación porcentual con respecto al área de la cuenca del río Pao

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

#### 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.

La Figura 6 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 Guataparó 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

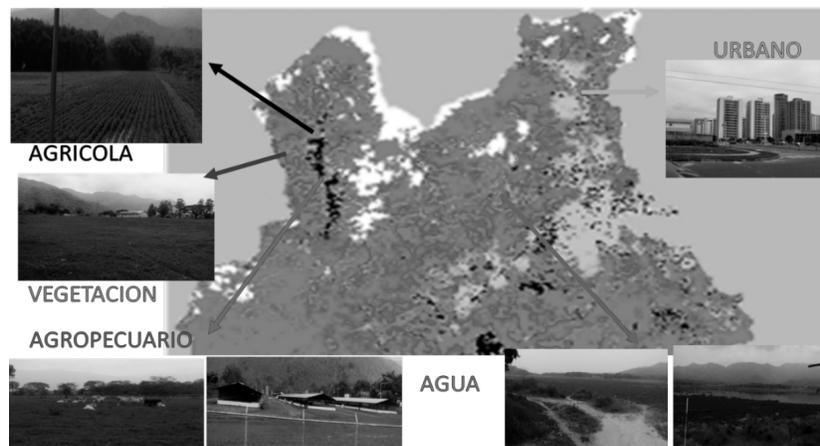


Figura 6: Resultado de las visitas de campo para la verificación de las clasificaciones de usos y coberturas de la cuenca del río Pao

disminución a lo largo del periodo de estudio.

En la Figura 3 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./Km<sup>2</sup>, 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 Paraiso, 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. Clasite 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  $\eta_v$ – describes not the loading proper, but its reduction as a result of the hydraulic resistance and heating of the fresh charge. The volumetric efficiency  $\eta_v$  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  $\eta_v$ – describe no el relleno mismo, sino su reducción por la causa de resistencia hidráulica y el calentamiento de los gases. El coeficiente de llenado  $\eta_v$  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  $\eta_v$  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 ( $\eta_v$ ) y el de los gases residuales ( $\gamma^r$ ) [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  $\eta_v$  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  $\varepsilon$  diferentes (por causa de volumen de la cámara de combustión  $V_c$  diferente) al mismo valor de  $\eta_v$  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  $\eta_v$  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  $\varepsilon$  (pero en las fórmulas que se utilizan actualmente para evaluar la presión media indicada  $p_i$  la relación de compresión  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  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  $\eta_v$ , que hay que tratar de alcanzar para el logro del llenado “ideal” y de la potencia máxima; es imposible evaluar por  $\eta_v$  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  $\eta_v$ .

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  $\varepsilon$ .

## 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  $\gamma_r$  (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  $\mu$  y la constante específico  $R$  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).

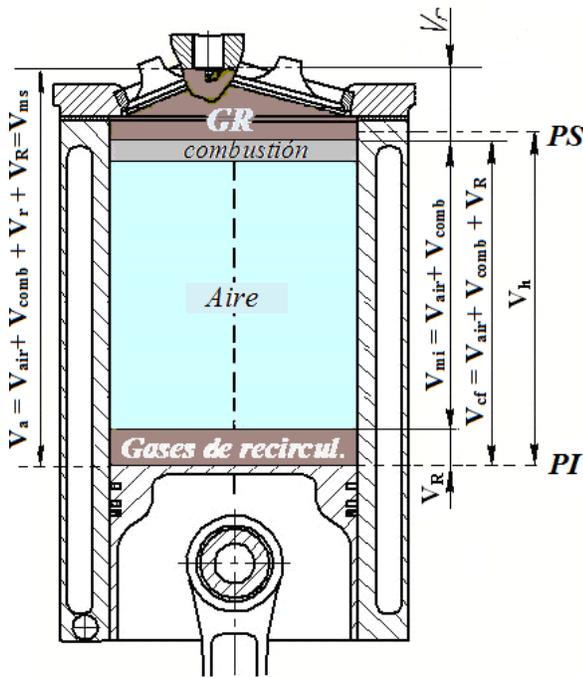


Figura 1: La composición de la mezcla como la suma de volúmenes parciales de sus componentes

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 volumem 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  $\sigma_r$  en la mezcla de servicio significa unívocamente el crecimiento correspondiente de la fracción  $\sigma_{cf}$  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 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

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

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

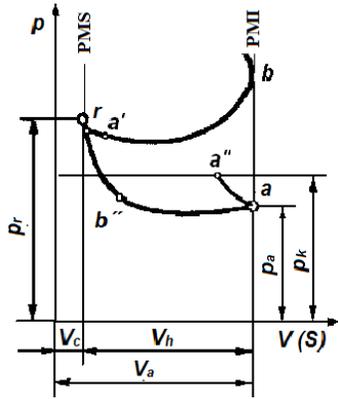


Figura 2: Los procesos de intercambio de gases en un motor de pistón de combustión interna

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  $\phi_b$  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  $\mu_{comb}$  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)

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

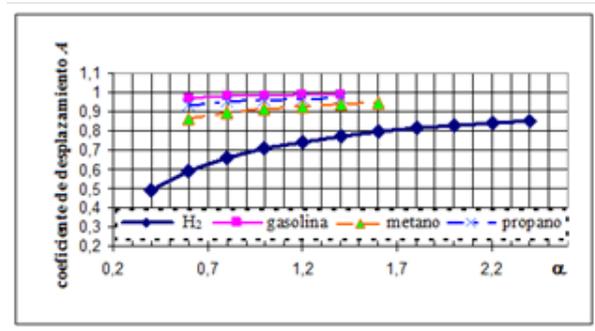


Figura 3: Influencia del coeficiente de exceso  $\alpha$  y del tipo de combustible en la magnitud del coeficiente de desplazamiento  $A$

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  $\alpha$ , 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  $\alpha$  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  $\gamma_r$  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  $\eta_v$  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)

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

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

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

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 (12)

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

aquí  $\phi_1$  y  $\phi_s$  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  $\eta_v$  y  $\gamma_r$ , 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  $\sigma_{cf}$  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  $\varphi_1$  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 traslapo 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  $\varphi_1$  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  $\phi_b$  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

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

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  $\eta_v$ , la fracción de la carga fresca  $\sigma_{cf}$  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  $\sigma_{air}$  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,  $\eta_i$  es rendimiento indicado y  $\rho_a$  es la densidad del aire a parámetros del punto “a” del diagrama indicado.

En conclusión, la ecuación toma el aspecto de la Ecuación (13) [9, 16]

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

Mediante la ecuación de reducción

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

obtenemos la Ecuación (14)

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

La Ecuación (14) 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  $\varepsilon$ .

Al sustituir  $\sigma_{air}$  por su valor en la Ecuación (12) obtenemos finalmente la Ecuación (15) [16]

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

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  $A/\alpha$ , 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  $A/\alpha$  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

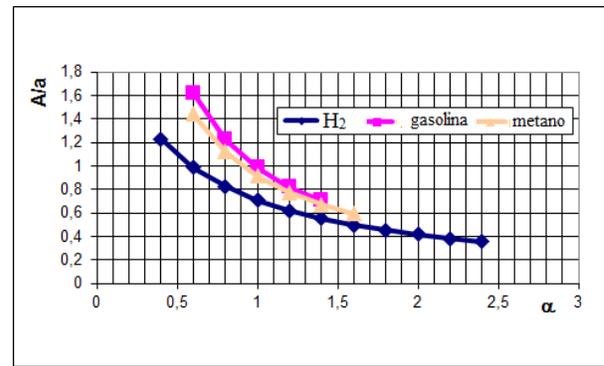


Figura 4: Influencia del coeficiente de exceso y tipo de combustible sobre la magnitud de la razón  $A/\alpha$ .

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  $\alpha$  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  $A/\alpha$  en el caso de enriquecimiento (cuando se disminuye también el coeficiente  $\alpha$ ) 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]

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

las Ecuaciones (13), (14) y (15) en forma explícita demuestran dependencia de los datos de potencia de un motor de la relación de compresión  $\varepsilon$  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

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

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 16 se desprende que la magnitud de  $g_i$  depende de la relación de compresión  $\varepsilon$ . Además, como la fracción del aire  $\sigma_{air}$  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 13 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  $\mu_{comb}$ ) 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  $\eta_v$  y  $\sigma_{cf}$  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)

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

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

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

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

$\rho_k$  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  $iV_a$  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

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

Aquí  $\mu_i$  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]

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

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  $\sigma_r$  y  $\sigma_{c_f}$  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  $\eta_v$  y  $\gamma_r$  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  $\rho_i$  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  $\sigma_{c_f}^{max} = 1$  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  $\eta_v$  y  $\eta_r$ )

$$V_a = V_{PC} = V_B + V_T + V_r + V_R$$

y

$$V_a = V_r + V_{c_f}, \quad \sigma_{c_f} = 1 - \sigma_r.$$

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. *Termotecnia*. 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. *Dvigatelistroyeniye (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 m<sup>3</sup>/s and 0.027 m<sup>3</sup>/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 (Maryelvi Jiménez)

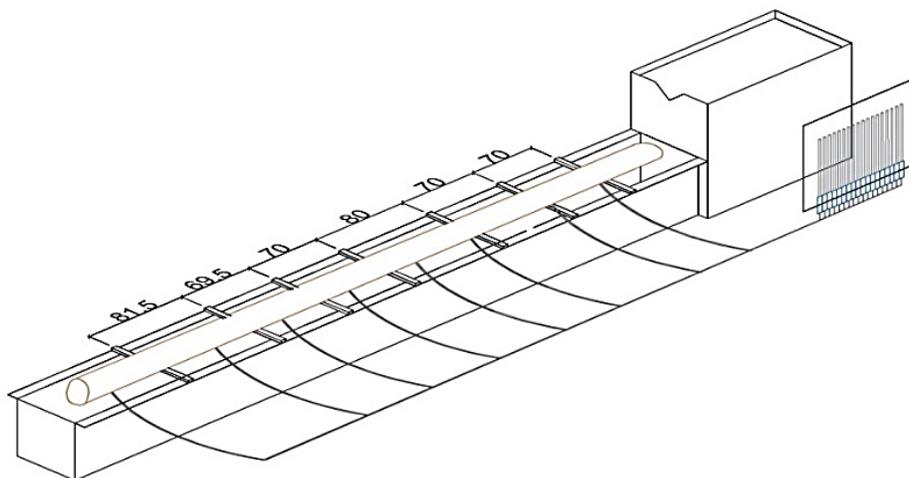


Figura 1: Modelo físico en 3D construido por Carrillo y Duque (2016).

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. Metodología

### 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 Carrillo 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	$\Delta x$ (cm)	DA (cm)	Piezómetros	$\Delta x$ (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

$\Delta x$ : 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).

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

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

$$\begin{aligned} \theta &= \pi - 2\text{ArcSen}\left(1 - \left(\frac{2y}{D}\right)\right) \\ A_m &= \frac{1}{8}D^2\left(\theta - \text{Sen}\left(\frac{\theta 180}{\pi}\right)\right) \\ P_m &= \frac{1}{2}\theta D \\ Q &= VA = V_1A_1 = V_2A_2 \end{aligned}$$

#### 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.

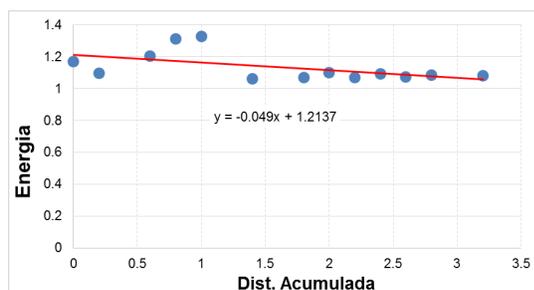


Figura 2: Energía vs Distancia acumulada entre secciones de la tubería para pendiente 18,7500‰ y caudal 25,1278 lt/s.

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:  $\eta = 0,0098$ .

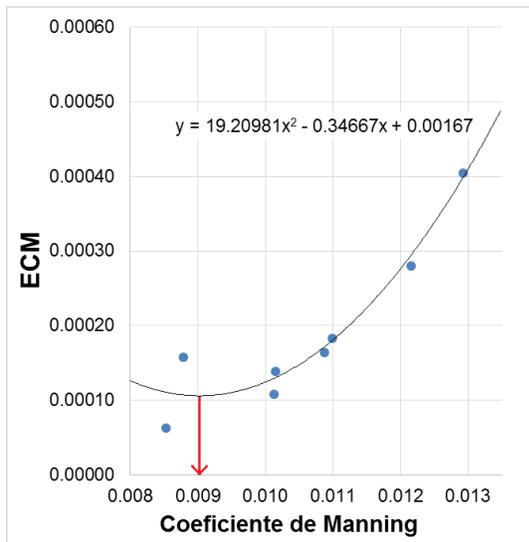


Figura 3: Variación del coeficiente de Manning óptimo con respecto a la pendiente de la tubería.

Tabla 4: Valores de  $n$  óptimo por prueba.

Pendiente ‰	N Óptimo	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.

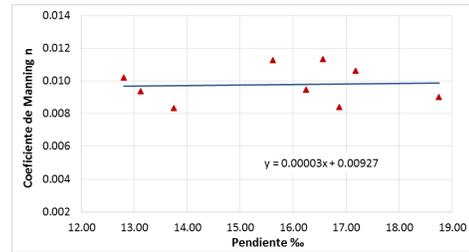


Figura 4: Variación del coeficiente de Manning óptimo con respecto a la pendiente de la tubería.

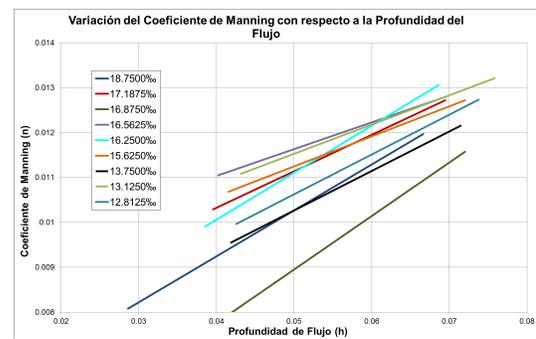


Figura 5: Variación del coeficiente de Manning con respecto a la profundidad del flujo con líneas de tendencia.

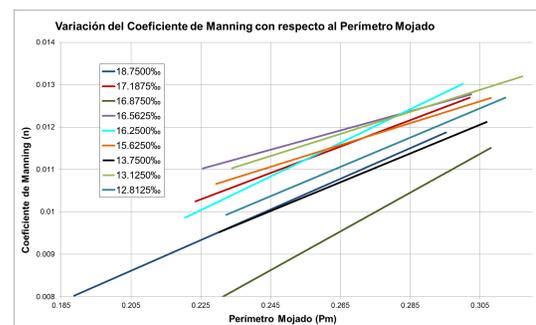


Figura 6: Variación del coeficiente de Manning con respecto al perímetro mojado con líneas de tendencia.

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.<sup>a</sup>, Cesar Nava<sup>a</sup>, Jonattan Duarte<sup>a</sup>, José Jhoan Zambrano<sup>a</sup> y Cecilia E. Sandoval-Ruiz<sup>\*,b</sup>

<sup>a</sup>*Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

<sup>b</sup>*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 urbótica, sistemas eco-adaptativos [6], neuro-control en microredes 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 ← Σ_{i=0}^n w_{j,i} · xi
yj ← g(in_j)
Para cada nodo k en la capa de salida hacer:
Δek ← g'(in_k) · (yk - tk) ←
Para cada capa c (M-1 a 1) hacer:
Para cada nodo j de la capa c hacer:
Δej ← g'(in_j) · Σ_{j=0}^n w_{k,j}(n) · Δek
Para cada neurona j de la capa c+1 hacer:
w_{j,i}(n+1) ← w_{j,i}(n) + α · Δej · 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 sub-sistemas, 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

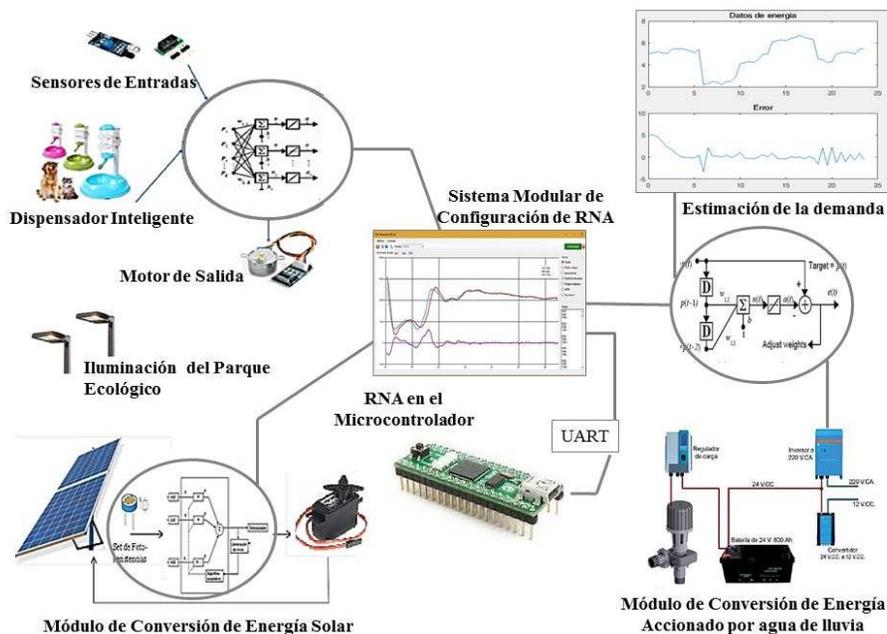


Figura 2: Esquema conceptual del sistema modular del parque ecológico.

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,  $w_i$  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)).

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

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

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

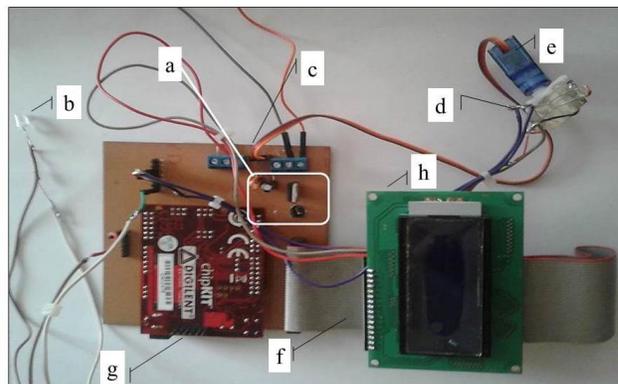
Donde  $\omega(n)$  será el valor del peso nuevo, a partir del peso anterior  $\omega(n-1)$ , corregido en función de un coeficiente de aprendizaje por el error dado por la diferencia entre el target  $T(n)$  y la salida de la red  $a(n)$ , en proporción de la entrada  $p(n)$ .

### 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  $\mu$ F, capacitor 0,3  $\mu$ F, resistencia 20 $\Omega$ , 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 $\mu$ F, Capacitor electrolítico 0,33 $\mu$ F, Resistencia de precisión 20k $\Omega$  $\pm$ 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.

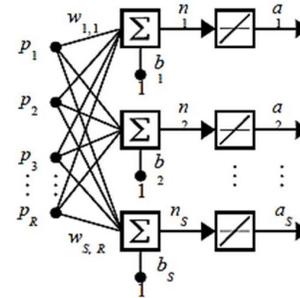


Figura 4: Esquema de la Red Neuronal Lineal.

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.

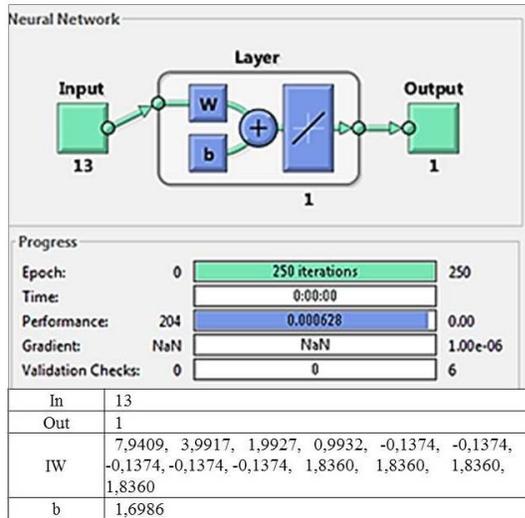


Figura 5: Parámetros de entrenamiento de la RNA Lineal.

#### 4.2. Aplicaciones de la red dinámica

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

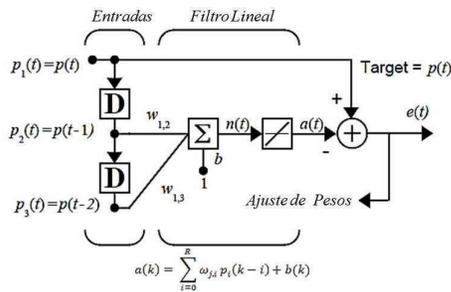


Figura 6: Esquema general de la red lineal dinámica.

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

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

que corresponde al accionamiento del servomotor, para posicionamiento del arreglo solar en máxima potencia, según el esquema de la Figura 7.

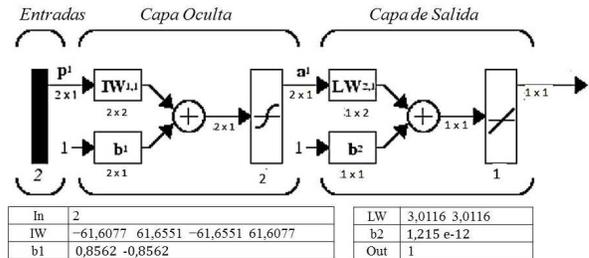


Figura 7: Esquema de la Red Neuronal Multicapa MPL.

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(ω1.1p1(k)+ω1.2p2(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(ω12.1p1(k)+ω12.2p2(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)=ω21.1(a1(k))+ω21.2(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.

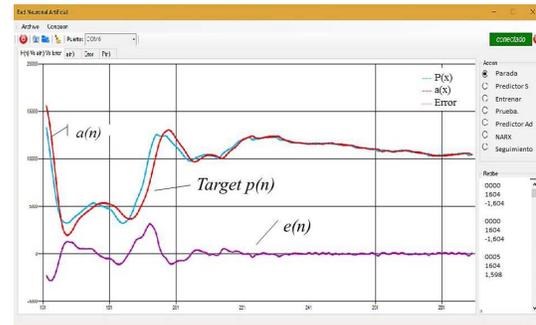


Figura 9: Manejador de entrenamiento y prueba de la red neuronal en el micro-controlador.

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 <B>, 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 de 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

```
// RNA Lineal
-----
// Se define el coeficiente de aprendizaje de la red: Ap1=0.002;
// Se Actualizan los pesos sinápticos:
// W(n) = W(n-1) + coef*[f(n)-a(n)]*p(n)
wf[0][0] = wf[0][0] + (Ap1)*(P_Inf-(af[0][0]))*TDL[0][0];
...
wf[0][13] = wf[0][13] + (Ap1)*(P_Inf-(af[0][0]))*TDL[0][13];

// Red MPL con algoritmo de entrenamiento BackPropagation,
-----
// con función sigm.
// 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) : (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;
```

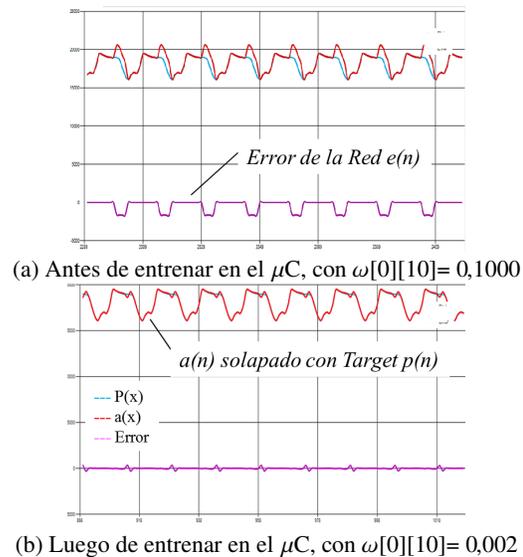


Figura 11: Entrenamiento de parámetros de la red neuronal predictiva.

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

validación de corrección de pesos cuando el  $\mu C$  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 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

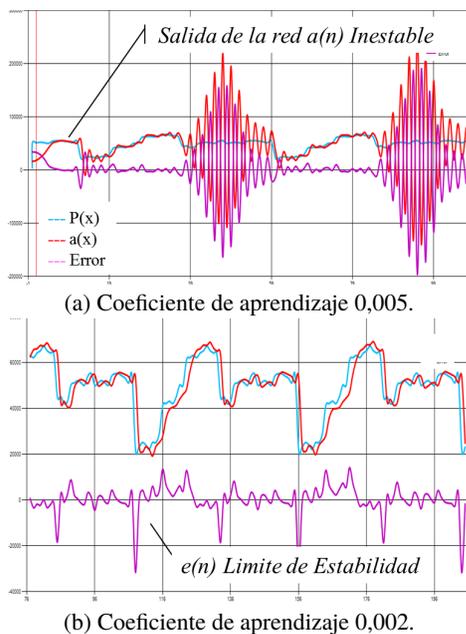


Figura 12: Respuesta de la red adaptativa como predictor.

un coeficiente de aprendizaje mayor al límite 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<sup>mo</sup> 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<sup>da</sup> 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<sup>a</sup>, Darwin López<sup>\*,a</sup> y R. Windevoxhel<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

<sup>b</sup>LITSA, 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 (NaHCO<sub>3</sub>).

**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 (NaHCO<sub>3</sub>).

**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 mercurico 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<sub>3</sub>), 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<sup>-8</sup> (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 cadatrattamento

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  $k_{ps}$  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

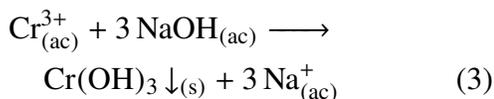
mediante este tratamiento (Tabla 2), obteniéndose un valor final de 1,00 ppm Ag. Es importante destacar que, el sólido obtenido, debido a su pureza, es potencialmente recuperable; por lo que, se recomienda evaluar su realización en futuras investigaciones.

Tabla 2: Eficiencia de remoción-tratamiento convencional.

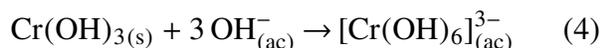
Metal	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>NaCl</sub> (mg/L)	C <sub>final</sub> (mg/L)	Remoción (%)
Cr	136,09	---	10,15	92,54
Ag	1789,45	1,00	<0,01	100,00

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:

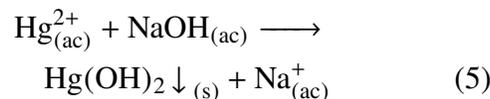


El hidróxido de cromo (III), presenta una constante de producto de solubilidad (kps) a 25 °C de  $7,0 \times 10^{-31}$  [10], sin embargo al final de la reacción se obtuvo una cantidad considerable cromo (Tabla 3), para una eficiencia de remoción del 92,54 %, este remanente se puede deber posiblemente 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<sub>4</sub>). 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:

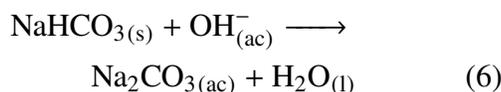


Sin embargo, el método convencional recomienda el uso de valores de pH por encima de 10,5 [5], para facilitar la precipitación de todas las especies metálicas, como es el caso del hidróxido de mercurio (ecuación (5)), cuyo kps es  $3,0 \times 10^{-26}$

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<sub>3</sub>), 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 x 10<sup>5</sup> UFC/mg de cáscara
- Cáscara tratada: 2,65 x 10<sup>2</sup> 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.

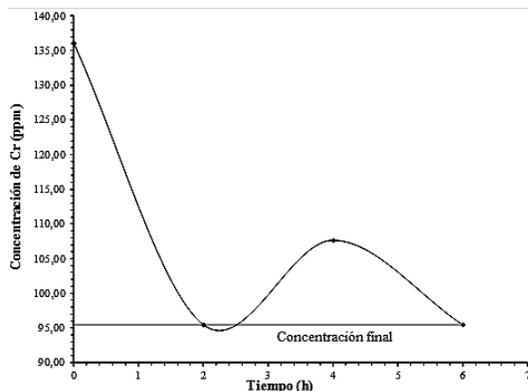


Figura 1: Concentración de cromo en función del tiempo para el tratamiento con cáscara.

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 (pH < 1,70), condición en la cual los protones (H<sup>+</sup>) compiten con los iones metálicos (Cr<sup>3+</sup>, Cr<sup>6+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Hg<sup>2+</sup>) por los sitios de enlace con el carbonato (presente en la cáscara de huevo de gallina), la

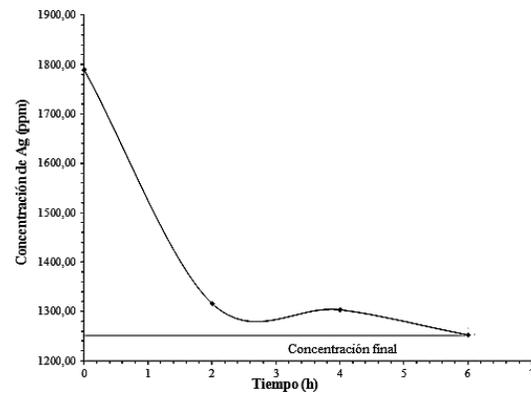


Figura 2: Concentración de plata en función del tiempo para el tratamiento con cáscara.

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 <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>final</sub> (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 y plata), en los residuos generados por ensayo de la DQO realizado en el Laboratorio de Calidad

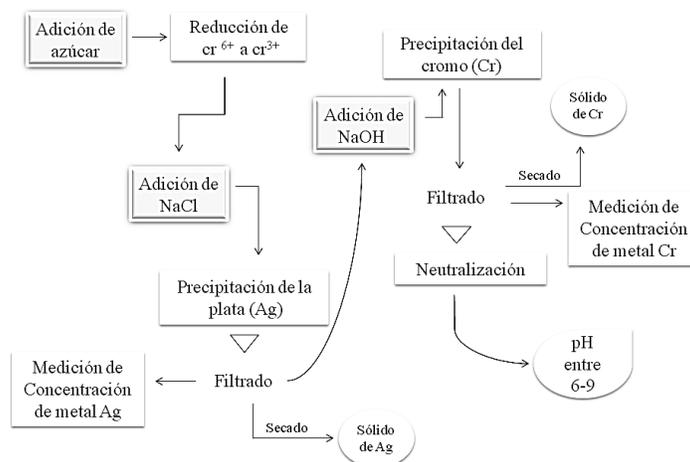


Figura 3: Esquema para la Remoción de metales pesados en los residuos generados por la DQO.

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<sup>3+</sup>); 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<sup>er</sup> 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<sup>ta</sup> edition, 2009.
- [10] Alonso Lozano Morales, Maria Inman, and E. Jennings Taylor. Electrolytic looping for through crack interruption during functional Cr<sup>+3</sup> 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, 20<sup>th</sup> 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<sup>a</sup>, Pablo Benavides<sup>a</sup>, David Ojeda<sup>\*,b</sup>, Diego Ortiz<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador

<sup>b</sup>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].

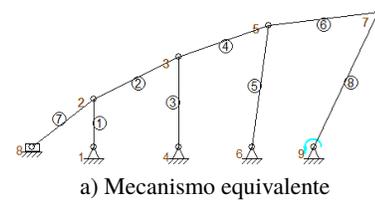
Por otro lado, adicionalmente, el dispositivo sirve como una ortosis pasiva para la rehabilitación de los dedos de la mano donde puede seleccionarse el tipo de lesión a tratar, tiempo de rehabilitación y empeño en el tratamiento, en los pacientes que así lo necesiten para que puedan nuevamente desempeñar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

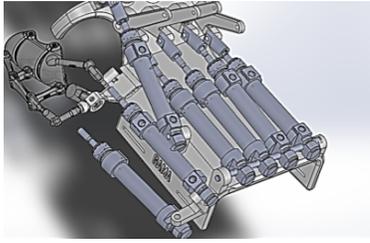
para el accionamiento del mecanismo que hace la rehabilitación.

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 [m<sup>2</sup>].

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.

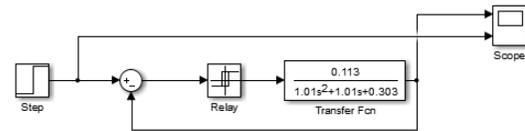
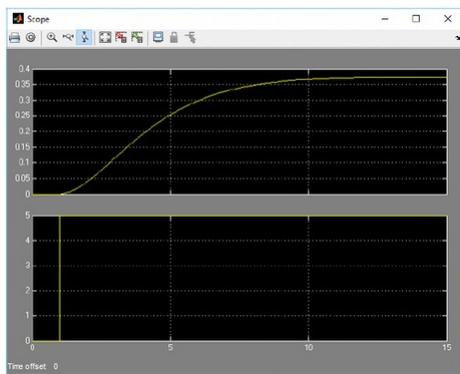


Figura 7: Diagrama de bloques del controlador.

*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 dedo meñique utilizando LabVIEW. La ventaja de usar el mencionado software es que tiene su mayor aplicación en sistemas de medición,



a) Lazo abierto 1 pulso



b) Lazo abierto

Figura 8: Respuesta del controlador.

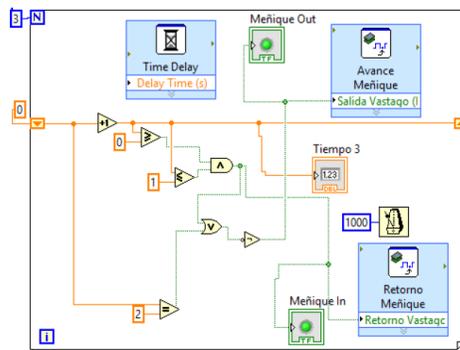


Figura 9: Control dedo meñique en el VI de LabView.

como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, como por ejemplo: sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en 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

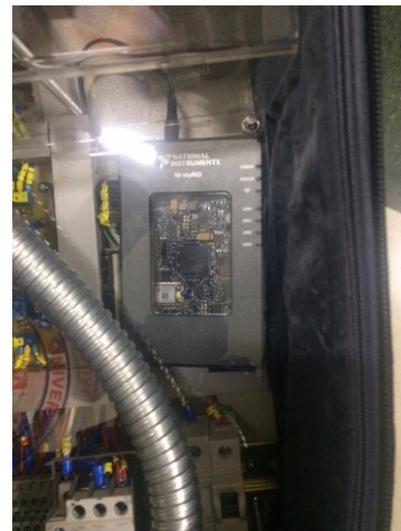


Figura 10: Sistema embebido myRIO usado para el rehabilitador.

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.

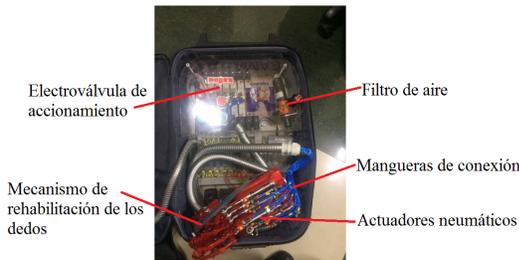


Figura 11: Conjunto completo del rehabilitador pasivo de dedos de la mano.

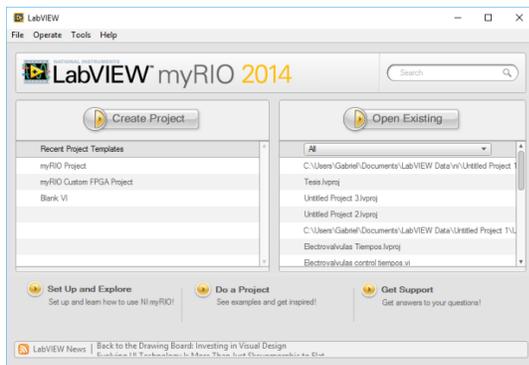


Figura 12: Pantalla principal myRio 2014.

### 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

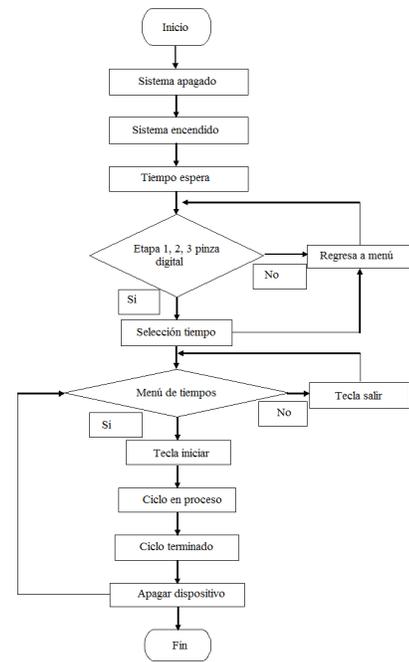


Figura 13: Diagrama de flujo de control.

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 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

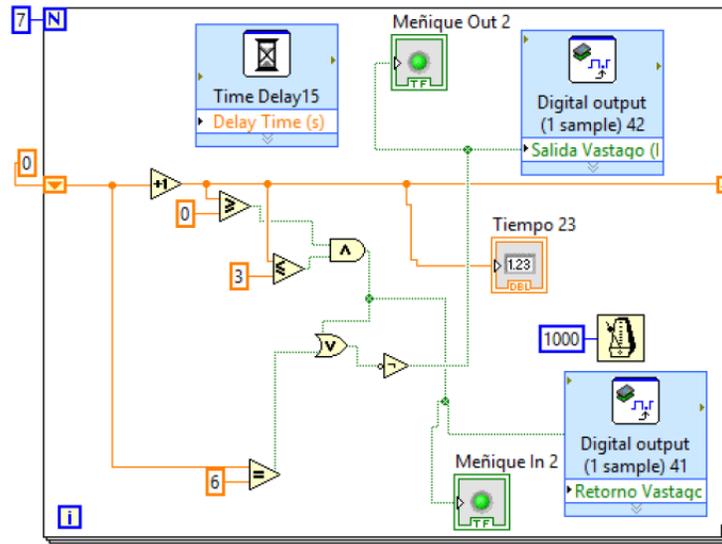


Figura 14: Tiempo de establecimiento real.

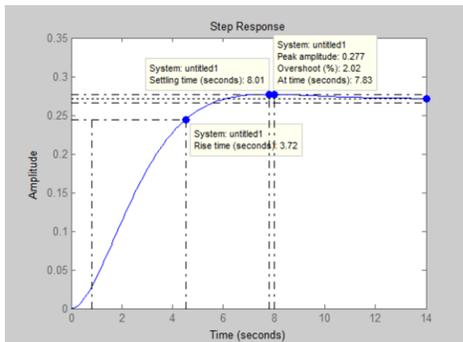


Figura 15: Tiempo de establecimiento teórico.

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.

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] Fernando 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, IIEEC, 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<sup>\*,a</sup>, Jesús Pérez<sup>b</sup> y Emery Dunia<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Postgrado en instrumentación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

<sup>b</sup>Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua Federico Brito Figuroa, 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<sup>®</sup> que puede ser leído y procesado por cualquier programa de graficación y cálculo, como Excel<sup>®</sup>, Origin<sup>®</sup>; Matlab<sup>®</sup>, MAPLE<sup>®</sup> (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

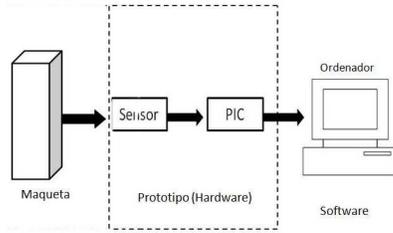


Figura 1: Configuración del sistema de Medición. Incluye la maqueta de experimentación, el prototipo (Hardware) y el programa en Visual Basic (software).

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).

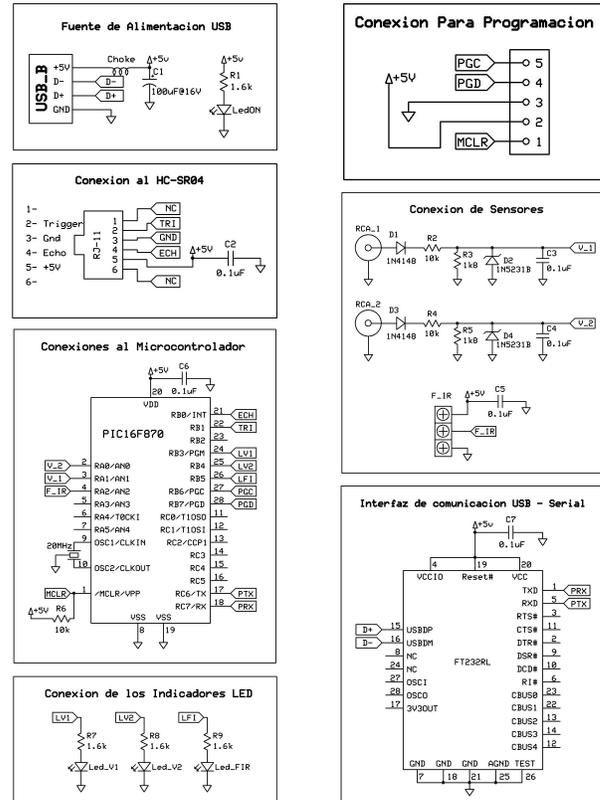


Figura 2: Diagrama en bloque del sistema de control y adquisición de datos.

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 circuital 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.

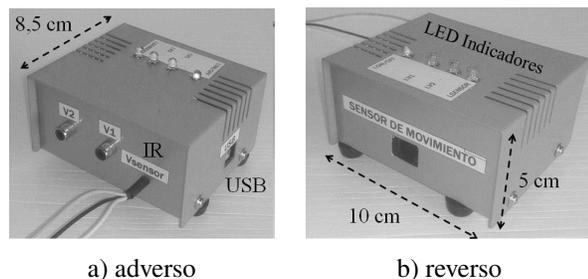


Figura 3: Cajetín y conexiones del Sistema de Control y Adquisición de datos.

## 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.



Figura 4: Pantalla de inicio de la interfaz gráfica AAD-LF.

Al desconectar la interfaz el sistema inmediatamente generará un archivo .dat, que contiene 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  $R_p \ll R_0$  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.

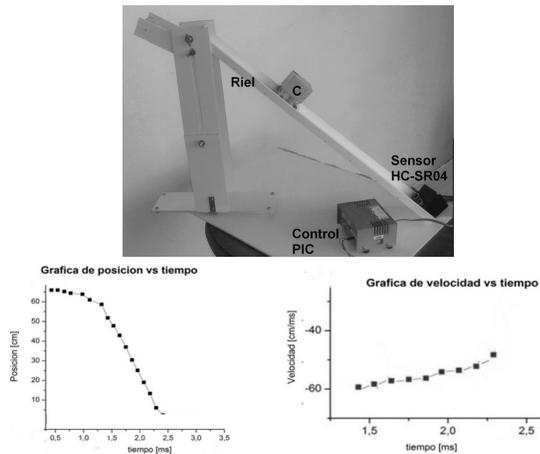
### 3. Resultados y discusión

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.



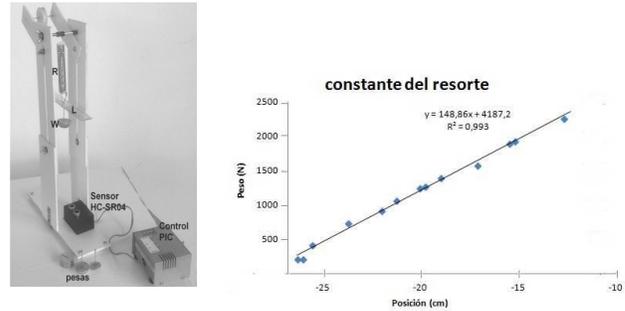
El sensor registra la posición del móvil C en cada instante t y el software genera las gráficas correspondientes.

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.

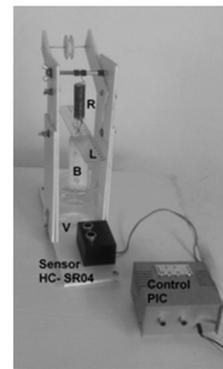


Figura 7: Diseño experimental de la práctica de empuje hidrostático.

### 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  $\Delta y$ , 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 100Ω) para comparar la curva característica con un conductor óhmico.

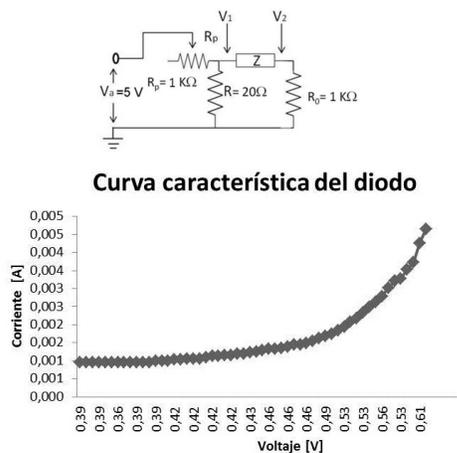


Figura 8: Diseño experimental de la práctica de corriente y resistencia para un diodo 1N4001.

### 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  $1\text{ k}\Omega$  y un capacitor de  $1\text{ mF}$ ; 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.

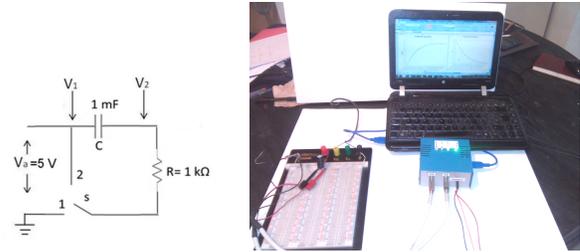


Figura 9: Diseño experimental de la práctica de capacitancia y circuito RC.

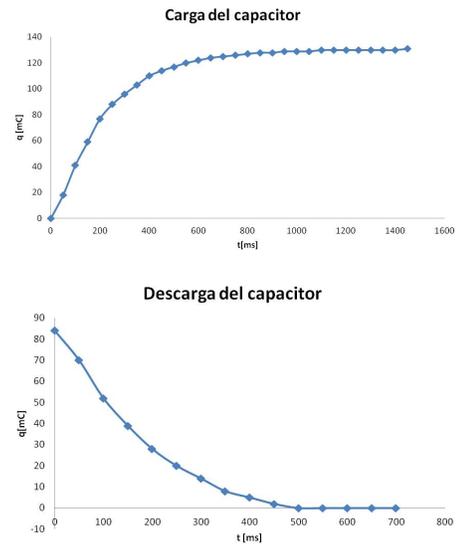


Figura 10: Resultados de la práctica de capacitancia y circuito RC.

### 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.

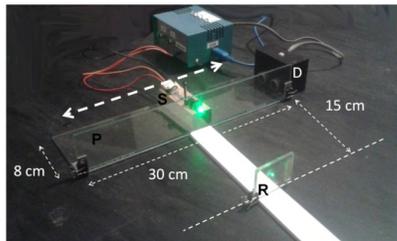
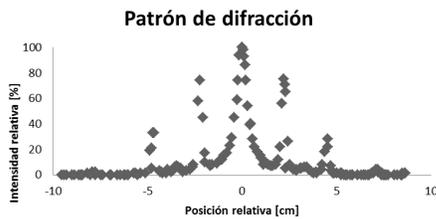
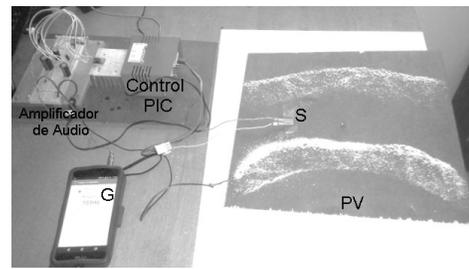


Figura 11: Difracción para una red de 300 líneas/mm iluminada con luz láser verde de 100 mW y longitud de onda 532 nm.

### 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.

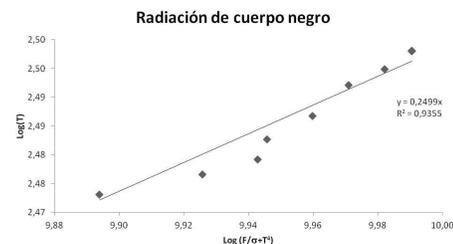
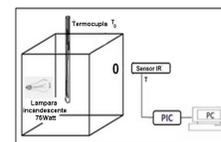


Se muestran las amplitudes relativas de la oscilación, medida con el sensor de vibración LDT0 028 K (S), para una frecuencia de resonancia de 74 Hz.

Figura 12: Patrones de Chladni.

### 3.8. Cuerpo negro y ley de Stephan–Boltzmann

Puede emplearse el sistema para graficar la variación de temperatura en función del tiempo 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  $V_1$  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.

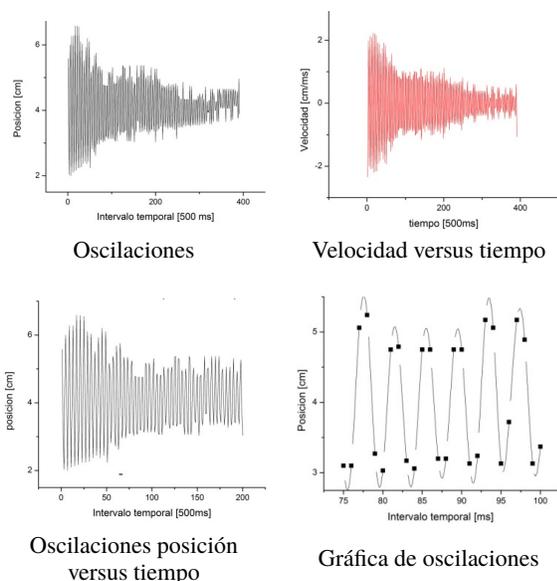


Figura 14: Gráficas del muestreo de 400 datos para el movimiento oscilatorio amortiguado en un lapso de 2 minutos.

### 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  $20 \text{ Ohmios}$ . 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.

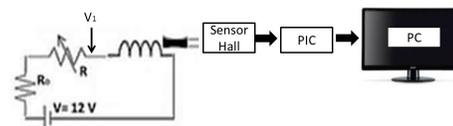


Figura 15: Diseño experimental para ilustrar el campo magnético de un solenoide.

## 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  $60 \text{ cm}$  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<sup>\*,a</sup> y C. Linares<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela*

<sup>b</sup>*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<sub>3</sub>) 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<sub>3</sub>) 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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° ( $2\theta$ ), 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  $\text{cm}^{-1}$ , 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  $3d^5$ . 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:

$\beta$ : tamaño promedio del cristal.

$k$ : factor de forma del cristal, su valor es de 1,0.

$\lambda$ : longitud de onda de la radiación utilizada ( $\lambda_{Cu}$ ).

$FWHM(S)$ : 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

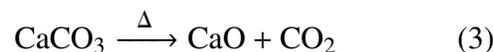
*Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF).* El lodo rojo bajo estudio, está compuesto de varios elementos entre los que resaltan silicio, calcio, manganeso, bismuto, cinc, estaño, aluminio e hierro (Tabla 1). Sin embargo, se esperaba una menor concentración de aluminio, ya que, este elemento es el 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..

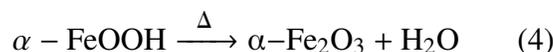
Elemento	Composición $\pm$ 0,001 %
Aluminio (Al)	43,944
Hierro (Fe)	36,432
Silicio (Si)	13,111
Titanio (Ti)	3,315
Calcio (Ca)	2,480
Circonio (Zr)	0,281
Azufre (S)	0,199
Manganeso (Mn)	0,060
Cromo (Cr)	0,049
Bismuto (Bi)	0,031
Niobio (Nb)	0,025
Galio (Ga)	0,023
Estaño (Sn)	0,022
Cobre (Cu)	0,014
Cinc (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<sub>2</sub> (COD: 9013321),  $\alpha$ -FeOOH goethita (COD: 9002158),  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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<sub>3</sub>), 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<sup>-1</sup> y 3700 cm<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup> 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

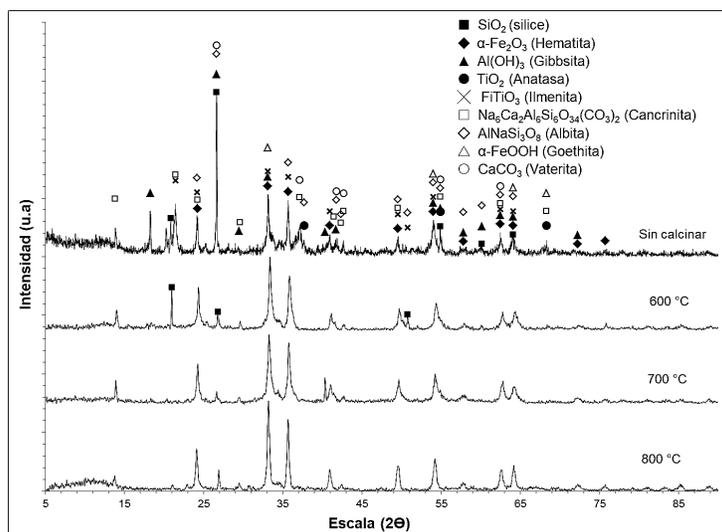


Figura 1: Patrón de DRX del lodo rojo sin calcinar y de las muestras calentadas a 600, 700 y 800 °C.

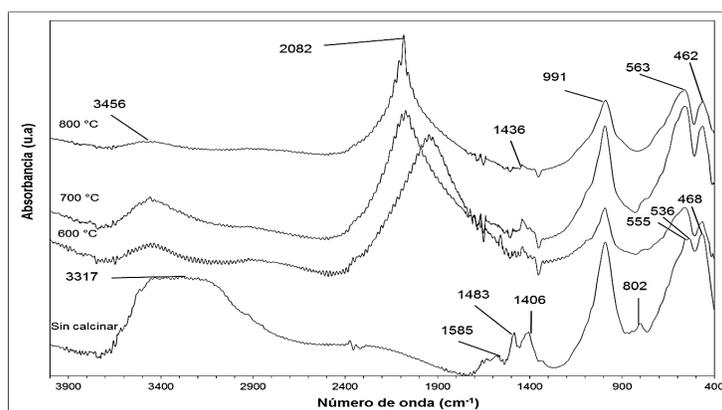


Figura 2: Espectro FT-IR del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

consecuencia de la pérdida de agua físicamente absorbida y aquella enlazada químicamente [1].

Las bandas observadas cerca de 1406 y 1483  $\text{cm}^{-1}$  se deben a las vibraciones del ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) [13], su disminución a temperaturas superiores de 600 °C es atribuible a la pérdida de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por la conversión del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) a óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). 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  $\text{cm}^{-1}$  a la temperatura de 800 °C, asociada a las vibraciones del  $\text{CO}_3^{2-}$  presentes en dicha sustancia. En la región inferior a 1000  $\text{cm}^{-1}$ , 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  $\text{cm}^{-1}$ , 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  $\text{cm}^{-1}$  las que corresponden a las observadas en 536 y 468  $\text{cm}^{-1}$ . Finalmente, se puede notar que la banda situada en 555  $\text{cm}^{-1}$  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  $462\text{ cm}^{-1}$  que se asocia a la hematita, y otra a  $563\text{ cm}^{-1}$  que representa al enlace Al-O. Es importante destacar que, la banda observada alrededor de  $2082\text{ cm}^{-1}$  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].

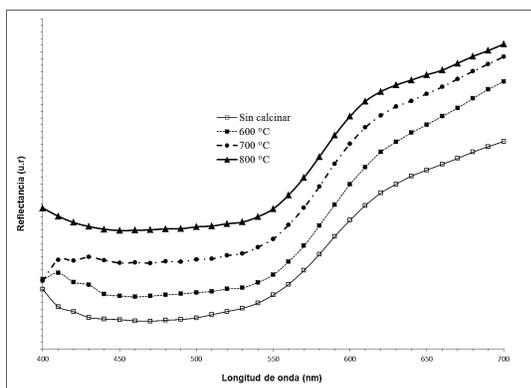


Figura 3: Espectro de reflectancia difusa (RD) para el lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

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  $\approx 610\text{ nm}$ , 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  $\approx 529\text{ nm}$ , 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  $\approx 490\text{ nm}$  para las muestras calcinadas a  $600\text{ °C}$  y  $700\text{ °C}$ ,

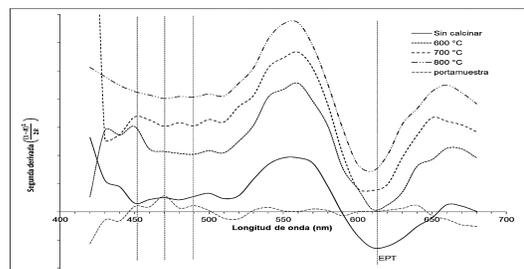


Figura 4: segunda derivada de la función de remisión para el lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas.

podría ser asignada a la transición electrónica,  $^6A_{1g} \rightarrow ^4T_{1g}$  ( $4G$ ) la cual es característica de complejos octaédrica del manganeso (II) [19]. Finalmente, las observadas a  $\approx 450\text{ nm}$  para la muestra sin calcinar y la de  $\approx 470\text{ nm}$  para aquella obtenida  $700\text{ °C}$ , 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  $600\text{ °C}$ ; 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 <sup>+</sup> )	25 – 45	8,40 – 22,87	3,23 – 35,22	

<sup>+</sup>: 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  $\approx 20$  nm.

Tabla 3: Tamaños de cristal estimados el lodo rojo a diferentes temperaturas de calcinación mediante el método de Scherrer.

Muestra	Tamaño de cristal $\pm 1$ 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 ( $\alpha$ - $FeOOH$ ) a hematita ( $\alpha$ - $Fe_2O_3$ ); 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<sub>4</sub> solutions. *Journal of Molecular Structure*, 834-836:445 – 453, 2007. MOLECULAR SPECTROSCOPY AND MOLECULAR STRUCTURE 2006.
- [13] Alexander Becker, Ulrich Bismayer, Matthias Epple, 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. 3<sup>rd</sup> 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, 8<sup>th</sup> edition, 1983.

# Fire effect on the tensile resistance of slabs steel reinforcement

Angel Bepin<sup>a</sup>, Nerio Pérez<sup>a</sup>, Edson Martínez<sup>\*,b</sup> y Salvador Scola<sup>c</sup>

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

<sup>b</sup>Laboratorio de Materiales y Ensayos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>c</sup>Instituto 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 ignífugo 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

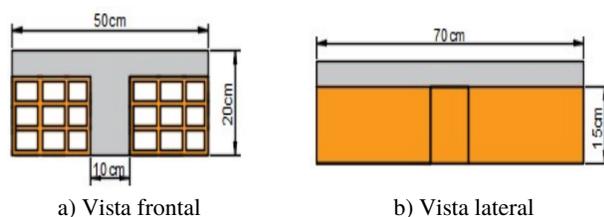


Figura 1: Vista frontal y lateral de los especímenes evaluados.

Las losas fueron reforzadas con acero longitudinal positivo consistente en una cabilla de ½" de

diámetro, fabricada en la República 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  $e=1\text{cm}$ ,  $3\text{cm}$ ,  $5\text{cm}$ , 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, 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 gráfica 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.

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

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 <sup>2</sup> )	$F_y$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	% 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

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

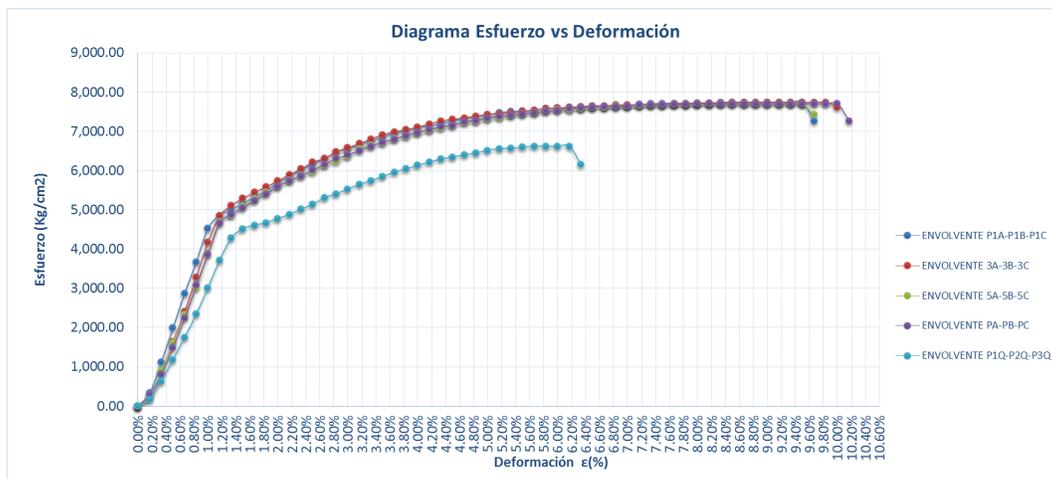


Figura 5: Curvas esfuerzo-deformación de probetas ensayadas.

Tabla 2: Porcentajes de alargamiento de cada uno de las probetas.

Probeta	$L_o$ (cm)	$L_f$ (cm)	%
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

de relajamiento, además de presentar valores más altos en cuanto sus esfuerzos alcanzados.

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 ded 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<sup>a</sup>, José Caicedo<sup>a</sup>, Carlos Alfonzo<sup>\*,b</sup>, Anahi Santeliz<sup>b</sup> y Argel Porrello<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup>Centro 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.

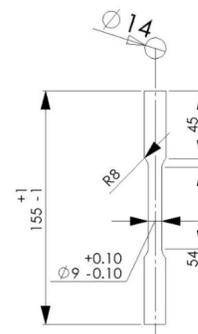
## 2. Metodología

### 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.

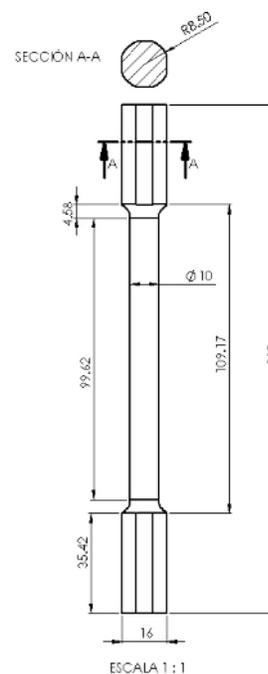
En cada condición de estudio, se ensayaron cinco (5) probetas a tracción, seis (6) probetas a torsión y para ensayo de dureza dos (2) probetas. Teniéndose un total de treinta y nueve (39) probetas, cuyas dimensiones se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

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].



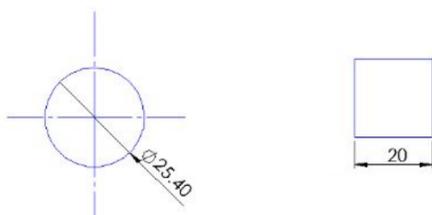
Medidas en milímetros.

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 Laboratorio



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.

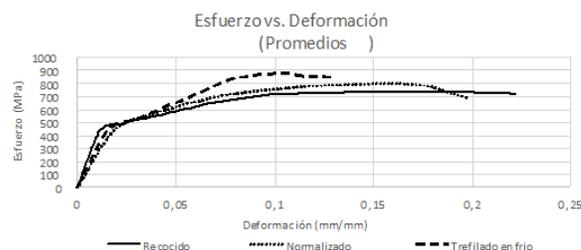


Figura 4: Gráficas de esfuerzo-deformación ingenieril (promedios) para cada condición del acero AISI 1045 ensayado.

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

$\sigma$ : 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.

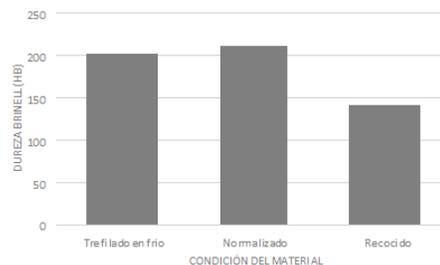


Figura 5: Gráfico de resultados promedios de dureza Brinell para cada condición de estudio del acero AISI 1045.

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 ( $\tau_y$ ) (MPa)	495,06 ( $\sigma = 29,39$ )	355,12 ( $\sigma = 44,034$ )	252,62 ( $\sigma = 4,68$ )
Esfuerzo último ( $\tau_{max}$ ) (MPa)	675,51 ( $\sigma = 8,99$ )	664,36 ( $\sigma = 9,308$ )	592,38 ( $\sigma = 12,79$ )
Deformación angular a la rotura ( $\gamma_{max}$ ) (rad/rad)	0,28 ( $\sigma = 0,02$ )	0,78 ( $\sigma = 0,07$ )	0,77 ( $\sigma = 0,04$ )

$\sigma$ : Desviación estándar

definen el comportamiento del material tanto elástica como plásticamente cuando es sometido a esfuerzos mecánicos de corte (Ver Figura 6).

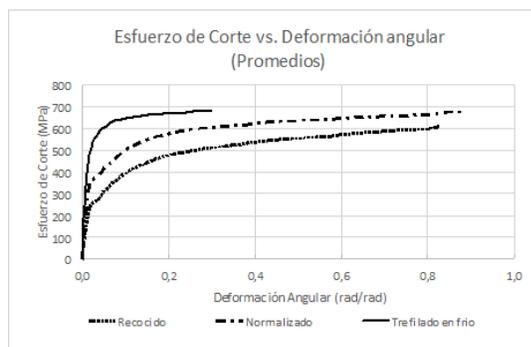


Figura 6: Curvas del ensayo de torsión para el acero AISI 1045 en cada condición del material.

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 frío, seguido por el valor de la condición de normalizado y finalmente la condición de recocido; en el caso de trefilado en frío, presenta los mayores valores de resistencia mecánica, lo cual es ocasionado por el trabajo en frío 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 frío respecto al tratamiento de normalizado.

El valor de la deformación angular a la rotura en el caso de la condición de trefilado en frío 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 frío, 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 frío, 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	Trefilado en frío	Estado	
		Normalizado	Recocido
Von Mises	44,95 %	21,80 %	6,15 %
Tresca	52,33 %	32,27 %	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<sup>ta</sup> 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<sup>da</sup> 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<sup>a</sup>, Nazareth Guia<sup>a</sup>, Demetrio Rey<sup>b</sup> y David Duarte<sup>\*,c</sup>

<sup>a</sup>Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

<sup>b</sup>Instituto de Matemática y Computo Avanzado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

<sup>c</sup>Dirección 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: Una 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 Autónoma 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<sup>er</sup>a 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 Orenga and Gerard Enrique Manonellas. *Estructura de computadores*. Universitat Oberta de Catalunya, 2011.

## Índice de materias

### A

acero AISI 1045, 99  
acero de refuerzo, 93  
arbitraje, 4  
artículos científicos, 4  
automatización, 69

### C

cáscara de huevo de gallina, 61  
calcinación, 86  
caracterización, 86  
carga fresca, 31  
cluster, 108  
coeficiente de los gases residuales, 31  
coeficiente de rugosidad de Manning, 43  
comercio., 10  
composición de la mezcla de servicio, 31  
control, 69

### D

dedos, 69  
demanda química de oxígeno (DQO), 61  
desplazamiento, 10  
detección de cambios, 19  
disponibilidad, 108

### E

ecuación de Manning, 43  
edición, 4  
eficiencia de remoción, 61  
encadenamiento, 10  
ensayo de torsión, 99  
errores, 4  
esfuerzo de corte, 99  
exposición al fuego, 93

### F

fuentes renovables, 50

### G

geomática, 19

### L

laboratorios de física, 76

linux, 108

lodo rojo, 86

losa, 93

### M

microcontrolador, 50  
multisensores, 76

### N

neuro-control, 50

### P

parque ecológico, 50  
precipitación-reducción, 61  
proceso de admisión, coeficiente de llenado, 31  
PVC, 43

### R

red adaptativa, 50  
red multicapa, 50  
rehabilitación, 69  
resistencia a la tensión, 93

### S

servidores, 108  
sistemas de adquisición y procesamiento de  
datos, 76

### T

teledetección, 19  
tipo del combustible, 31  
transporte público, 10

### U

usos de la tierra, 19

## Subjects index

### A

adaptive network, 50  
AISI 1045 steel, 99  
arbitraje, 4  
artículos científicos, 4  
automation, 69  
availability, 108

### C

calcination, 86  
chain, 10  
characterization, 86  
chemical oxygen demand (COD), 61  
chicken egg shell, 61  
cluster, 108  
coefficient of residual gases, 31  
composition of the air-fuel-residual gases-  
mixture, 31  
control, 69  
cutting effort, 99

### D

data acquisition and processing systems, 76  
detection of changes, 19  
displacement, 10

### E

ecological park, 50  
edición, 4  
errores, 4

### F

finger, 69  
fire exposition, 93  
fresh charge, 31  
fuel mode, 31

### G

gas-exchange process, 31  
geomatics, 19

### L

land uses, 19  
linux, 108

### M

Manning equation, 43  
Manning roughness coefficient, 43  
microcontroller, 50  
multilayer network, 50  
multisensors, 76

### N

neuro-control, 50

### P

parameter normative-legal, 61  
physics laboratories, 76  
precipitation-reduction, 61  
public transport, 10  
PVC, 43

### R

red mud, 86  
rehabilitation, 69  
remote sensing, 19  
renewable sources, 50

### S

servers, 108  
slab, 93  
steel reinforcement, 93

### T

tensile resistance, 93  
torsion test, 99  
trade, 10

### V

virtual, 108  
volumetric efficiency, 31

## Índice de autores (*Author index*)

### A

Alfonzo, Carlos, 99  
Araya I., Alejandro, 43

### B

Benavides, Pablo, 69  
Bespín, Ángel, 93  
Bolaños, Francisco, 99

### C

Caicedo, José, 99  
Cecilia E. Sandoval-Ruiz, 50  
Cevallos U., Gabriel, 10

### D

Duarte, David, 108  
Duarte, Jonattan, 50  
Dunia, Emery, 76

### F

Farias, Bettys, 19

### G

González C., Valentina, 43  
González, Yubiry, 76  
Guevara, Edilberto, 19  
Guía, Nazareth, 108

### J

Jiménez Grimán, Jesús J., 4  
Jiménez, Maryelvi, 43

### L

López C., Diego, 10  
López, Darwin, 61, 86  
Linares, C., 86

### M

Márquez, Adriana, 19  
Martínez, Edson, 93  
Matyukhin, L. M., 31  
Mosquera, Washington, 69

### N

Núñez G., Shirley, 10

Nava, Cesar, 50

### O

Ojeda, David, 69  
Ortiz, Diego, 69  
Osman, Ahmad, 4

### P

Pérez, Jesús, 76  
Pérez, Nerio, 93  
Perafán, Herney, 108  
Porrello, Argel, 99

### R

Rey Lago, Demetrio, 19  
Rey, Demetrio, 108

### S

Santeliz, Anahi, 99  
Scola, Salvador, 93  
Steckler V., David J., 50

### T

Torres D., Fernando, 10  
Torres, M., 61

### V

Vega, Cristóbal, 4

### W

Windevoxhel, R., 61

### Z

Zambrano, José Jhoan, 50

# Apéndices

## Caso desleal (*Unfair Case*)

### Caso desleal

Revista Ingeniería UC denomina “*Caso Desleal*” a aquellas publicaciones que de alguna manera los autores deciden retirar la publicación para enviarla a otra revista; después de haber sido arbitrada, corregida y editada. Decisión que tomaron estos autores sin tener la más mínima consideración con el tiempo y dedicación de todo el cuerpo editorial y personal de apoyo. Esta dedicación es la que hace posible que una publicación salga adaptada a las normativas de los índices internacionales.

Revista Ingeniería UC siempre fue financiada por nuestras instituciones académicas, pero dada la crisis hemos tenido que solicitar una donación de apenas 15US\$ para garantizar la edición y no comprometer la indexación, honrar la confianza de nuestros autores y mantener nuestra trayectoria de 25 volúmenes en 25 años.

Los autores del artículo “Módulo de elasticidad dinámico de la madera de *Swietenia humilis* y *Alnus acuminata*. Evaluación por vibraciones transversales” Javier R. Sotomayor C. y José María Villaseñor Aguilar, decidieron llevarse el preprinter generado por nuestra Revista Ingeniería UC a otra revista, tal como lo manifestaron en correo enviado a uno de los editores, después de que Revista Ingeniería UC trabajara responsablemente en todas las fases de arbitraje, revisión, edición y diagramación del manuscrito.

Por lo tanto, dado este acto de aprovecharse del trabajo de personas decentes y responsables declaramos a este artículo y sus autores como “*Caso Desleal*”.

### Unfair Case

Revista Ingeniería UC called the disloyal case those publications that somehow the authors decided to withdraw the publication to send it to another journal; after having been arbitrated, corrected and edited. Decision taken by these

authors without having the slightest consideration with the time and dedication of the entire editorial staff and support staff. This dedication is what makes it possible for a publication to be adapted to the regulations of international indexes.

Revista Ingeniería UC was always financed by our academic institutions, but given the crisis we had to request a donation of just 15US\$ to guarantee the edition and not compromise the indexation, honor the trust of our authors and maintain our trajectory of 25 volumes in 25 years.

The authors of the article “Dynamic modulus of elasticity of *Swietenia humilis* and *Alnus acuminata* wood. Assessment by transversal vibration” Javier R. Sotomayor C. and José María Villaseñor Aguilar, decided to take the preprinter generated by our Revista Ingeniería UC to another journal, as they stated in an email sent to one of the editors, after Revista Ingeniería UC will work responsibly in all the phases of arbitration, revision, edition and diagramation of the manuscript.

Therefore, given this act of taking advantage of the work of decent and responsible people, we declare this article and its authors as “*Unfair Case*”.

## Unfair Case. Dynamic modulus of elasticity of *Swietenia humilis* and *Alnus acuminata* wood. Assessment by transversal vibration

Javier R. Sotomayor C.\* y José María Villaseñor Aguilar

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

**Abstract.-** The research goal was to determine the dynamic modulus of elasticity of the *Swietenia humilis* and *Alnus acuminata* wood, by means of bending transversal vibrations nondestructive tests. Small dimension wood specimens were tested, on them was determined the density, the moisture content, the natural frequency of vibration and the dynamic modulus of elasticity. It was calculated the mean, the standard deviation and the coefficient of variation. Statistical tests of difference of means were realized between the variables. All variables can be considered as normally distributed. The *S. humilis*'s wood density and the natural frequency of vibration were greater than the *A. acuminata*'s wood. The *S. humilis*'s dynamic modulus of elasticity was smaller than the corresponding to *A. acuminata*'s. The magnitude of the physical and mechanical characteristics of *S. humilis* and *A. acuminata* was of the same order than the reported in the literature. Nevertheless, both species differ mechanically with physical properties different.

**Keywords:** wood density; wood moisture content; natural frequency of vibration; dynamic modulus of elasticity.

## Caso desleal. Módulo de elasticidad dinámico de la madera de *Swietenia humilis* y *Alnus acuminata*. Evaluación por vibraciones transversales

**Resumen.-** El objetivo de la investigación fue determinar en la madera de *Swietenia humilis* y *Alnus acuminata*, el módulo de elasticidad dinámico, mediante pruebas no destructivas de flexión por vibraciones transversales. Se estudiaron probetas de pequeñas dimensiones y se determinó su densidad, su contenido de humedad, su frecuencia natural de vibración y su módulo de elasticidad dinámico. Se calcularon la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Se realizaron pruebas de diferencia de medias entre las variables de cada especie. Todas las variables provinieron de distribuciones normales. La densidad de la madera y la frecuencia natural de *S. humilis* fueron mayores que las de *A. acuminata*. En contraste, el módulo de elasticidad dinámico de *S. humilis* fue menor que el correspondiente a *A. acuminata*. La magnitud de las características físicas y mecánicas de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*, fueron del mismo orden que los reportados en la literatura. No obstante, las dos especies se distinguen mecánicamente con propiedades físicas diferentes.

**Palabras claves:** densidad de la madera; contenido de humedad en la madera; frecuencia natural de vibración; módulo de elasticidad dinámico.

Recibido: diciembre 2017

Aceptado: marzo 2018

### Introducción

El módulo de elasticidad dinámico de la madera es un parámetro necesario para el diseño de productos de madera y para el cálculo de estructuras con este material. Entre

otras aplicaciones, este módulo se emplea para dimensionar elementos estructurales que satisfagan requisitos de calidad y de seguridad estructural. Su magnitud depende, principalmente, de la especie, de la anisotropía de la madera, de su contenido de humedad y del método de evaluación [1].

La madera de *S. humilis* se emplea en ebanistería, muebles finos, gabinetes, cajas de piano, instrumentos musicales y científicos, modelaje industrial, bloques de grabado, tallas, esculturas, chapa y madera terciada, mangos de herramienta, artículos torneados, y decoración de interiores. La

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: maderas99@yahoo.com (Javier R. Sotomayor C.)

madera es de olor ligeramente aromático, dura, de grano medio, fibras: entrecruzada y ligeramente ondulada. La albura y duramen bien diferenciados.

La madera de *A. acuminata* se emplea en la fabricación de varios artículos artesanales e instrumentos musicales, como combustible, en construcciones rústicas, mangos para herramientas y pulpa para papel de buena calidad. Tiene gran potencial para puertas, pisos y cercas, muebles, palillos y cabos de fósforos, zapatos ortopédicos, moldes para fundición de metales, molduras, ataúdes, lápices, embalajes, ebanistería. La madera del género *Alnus* no se recomienda para estructuras y construcciones que requieran alta resistencia, dado que la madera es muy suave.

Las pruebas no destructivas de vibraciones transversales han confirmado su utilidad para medir la frecuencia natural de una pieza de madera. Utilizando esta propiedad en conjunto con la densidad y otros parámetros derivados de sus dimensiones, este método no destructivo es empleado para predecir el módulo de elasticidad dinámico [2]. Como complemento a pruebas normalizadas y destructivas, la caracterización mecánica de la madera ha sido posible gracias a la aplicación de métodos de evaluación de carácter no destructivo, en el estudio de especies con vocación acústica y constructiva. Recientemente, las técnicas que utilizan vibraciones mecánicas para estimar su módulo de elasticidad, están documentadas [3].

En la bibliografía especializada del país, se encuentran datos de características elásticas de maderas mexicanas determinadas en condiciones de carga estática [4, 5]. Con todo, es notoria la escasez de datos derivados de pruebas mecánicas que puedan aplicarse en el estudio del comportamiento de productos funcionando en condiciones dinámicas, o para fines de diseño sísmico de estructuras.

En México existe una gran biodiversidad de especies forestales, de tal forma, que la caracterización mecánica de la madera, es necesaria caso por caso de cada especie. Las maderas de *S. humilis* y *A. acuminata*, tienen un gran potencial para fabricar productos de alto valor agregado.

El objetivo de la investigación fue determinar el módulo de elasticidad dinámico en la madera de

*S. humilis* y *A. acuminata*, mediante pruebas de flexión por vibraciones transversales.

## Materiales y métodos

Se recolectó madera de las especies *Swietenia humilis* Zucc. y *Alnus acuminata* arguta (Schlecht.) Furlow, en el Estado de Michoacán, México y se recortaron barras de 0,05 m x 0,05 m x 0,5 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, correspondientes al plano leñoso. La madera se acondicionó en una cámara cerrada con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y con una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %) durante 48 meses, hasta que el peso de la madera fue constante. Posteriormente, para cada especie, se recortaron 17 probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,50 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Para el caso de la madera de *S. humilis*, la longitud de las probetas fue de 0,32 m.

### Contenido de humedad y densidad

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos [6] con grupos complementarios de 17 probetas. Para cada probeta se calculó la densidad correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas [9].

El contenido de humedad de la madera se calculó con la ecuación (1):

$$CH = \frac{P_{CH} - P_A}{P_A} (100) \quad (1)$$

Donde:

*CH*: Contenido de humedad de la madera al momento del ensayo (%)

*P<sub>CH</sub>*: Peso de la probeta a un contenido de humedad *CH* (kg)

*P<sub>A</sub>* = Peso de la probeta en estado anhidro: *CH*: 0 % (kg)

La densidad de la madera se calculó con la ecuación (2):

$$\rho_{CH} = \frac{P_{CH}}{V_{CH}} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{CH}$ : Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$P_{CH}$ : Peso de la barra a un contenido de humedad CH (kg)

$V_{CH}$ : Volumen de la barra a un contenido de humedad CH ( $\text{m}^3$ )

### Pruebas de flexión por vibraciones transversales

Las pruebas de flexión por vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de la vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta adaptando el procedimiento reportado por [10]. Con tal propósito, se utilizó el aparato *Grindosonic*<sup>®</sup>. La Figura 1 muestra el montaje de laboratorio y el sensor con el cual se registró la vibración de la probeta y se midió la frecuencia natural. La Figura 2 presenta la configuración de las pruebas no destructivas de vibraciones transversales.

El impulso elástico inicial fue aplicado en el centro geométrico de la cara superior de la probeta, en la dirección tangencial a la misma, apoyada sobre dos soportes rígidos de tipo simple a una distancia nodal de  $0,224 L$ .



Figura 1: Dispositivo para pruebas no destructivas de flexión por vibraciones transversales y aparato *Grindosonic*<sup>®</sup>.

El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis posterior. Durante la prueba, se calculó el momento de inercia de la sección transversal de la probeta correspondiente al ensayo.

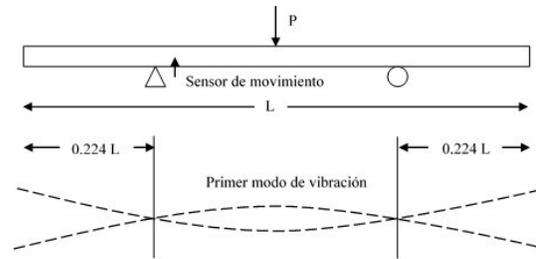


Figura 2: Configuración de las pruebas no destructivas de flexión por vibraciones transversales.  $P$ : Impacto;  $L$ : Longitud de la probeta.

A partir de la ecuación de movimiento de una viga en vibraciones transversales [7]:

$$\frac{-\partial^2}{\partial x^2} \left( EI(x) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \right) + f(x, t) = m(x) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}, 0 < x < L$$

Siendo:

$E$ : Módulo de elasticidad dinámico ( $\text{N m}^{-2}$ )

$I$ : Momento de inercia de la sección transversal de la probeta ( $\text{m}^4$ )

$m$ : Masa de la probeta ( $\text{kg m}^{-1}$ )

$x$ : Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m)

$y$ : Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m)

$t$ : Tiempo (s)

$L$ : Longitud de la probeta (m)

Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico en flexión por vibraciones transversales se utilizó la ecuación (3) [8].

$$E_{vt} = \frac{4\pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{l_{vt}} K \right) \quad (3)$$

Siendo:

$E_{vt}$ : Módulo de elasticidad dinámico ( $\text{N m}^{-2}$ )

$L_{vt}$ : Longitud de la probeta (m)

$l_{vt}$ : Distancia entre apoyos (m)

$f_{vt}$ : Frecuencia natural de la probeta (Hz)

$\rho_{CH}$ : Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$m, K$ : Constantes adimensionales (12,65; 49,48)

$r$ : Radio de giro de la sección transversal de la probeta ( $\text{m}^2$ )

Con:  $r = \sqrt{I/A}$

$I$ : Momento de inercia de la sección transversal de la probeta ( $m^4$ )

$A$ : Área de la sección transversal de la probeta ( $m^2$ )

### Diseño experimental

Con la finalidad de verificar la normalidad de las distribuciones de las variables densidad de la madera, frecuencia natural de vibración y módulo de elasticidad dinámico, se calcularon el apuntamiento y sesgo de las muestras correspondientes. Cuando la prueba de normalidad verificó que los datos provenían de distribuciones normales se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de [9]. Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera y la frecuencia natural, para las cuales se calculó la media, desviación estándar y coeficiente de variación, mientras que la especie se consideró el factor de variación. El módulo de elasticidad dinámico se estudió variable derivada. El experimento consistió en pruebas  $t$  de Student para muestras independientes de diferencias de medias para un nivel de confianza de 95 %. La hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$  se contrastó con la hipótesis alterna  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta para cada una de las dos especies en estudio. Se efectuaron pruebas con 32 réplicas (probetas por especie), totalizando 64 muestras observadas para cada una de las variables de respuesta. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa Statgraphics®.

## Resultados y discusión

### Características físicas y mecánicas

La Tabla 1 presenta los estadísticos descriptivos media, desviación estándar y coeficiente de variación de la densidad, de la frecuencia natural y del módulo de elasticidad dinámico para cada madera evaluada.

El contenido de humedad en la madera de *S. humilis* y *A. acuminata* fue igual y en promedio de 10,65 %, con un coeficiente de variación de 1,47 %. Se considera que el contenido de humedad no interviene en la variación de los resultados

Tabla 1: Densidad, frecuencia natural y módulo de elasticidad dinámico.

	<i>Swietenia humilis</i>		
	$\rho_{CH}(kgm^{-3})$	$f_{vt}(Hz)$	$E_{vt}(MNm^{-2})$
$\bar{x}$	757	756	9,098
$\sigma$	31,31	79,06	2,186
CV	4,14	10,46	24,03
	<i>Alnus acuminata</i>		
	$\rho_{CH}(kg m^{-3})$	$f_{vt}(Hz)$	$E_{vt}(MN m^{-2})$
$\bar{x}$	567	375	13,612
$\sigma$	22,67	16,90	1,325
CV	4,00	4,50	9,73

$\rho_{CH}$ : Densidad.

$f_{vt}$ : Frecuencia.

$E_{vt}$ : Módulo de elasticidad dinámico.

$\bar{x}$ : Media.

$\sigma$ : Desviación estándar.

CV: Coeficiente de variación en por ciento.

entre especies. No obstante, con el objeto de estandarizar valores útiles en el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera, es necesario ajustar valores experimentales medidos con un contenido de humedad diferente al que se presenta usualmente en métodos normalizados, que es del 12 %.

La densidad de *S. humilis* fue 33,5 % mayor que la densidad de *A. acuminata* y su coeficiente de variación fue similar. La densidad de *S. humilis* califica como alta y la densidad de *A. acuminata* califica como media de acuerdo con [10].

La frecuencia natural de vibración de *S. humilis* fue 50,4 % mayor con respecto a la de *A. acuminata*. El coeficiente de variación de *S. humilis* es menor 56,4 % respecto al coeficiente de variación de *A. acuminata*.

El módulo de elasticidad dinámico de *S. humilis* fue 49,6 % menor en comparación con el módulo de elasticidad dinámico de *A. acuminata*. El coeficiente de variación de *S. humilis* es mayor 147 % respecto al coeficiente de variación de *A. acuminata*.

La magnitud de las características físicas y mecánicas de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*, es del mismo orden que los reportados en la literatura [11].

*Pruebas de normalidad y de diferencias de medias*

La Tabla 2 presenta los resultados de las pruebas de normalidad y de diferencia de medias de la densidad, de la frecuencia natural y del módulo de elasticidad dinámico de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*.

Tabla 2: Resultados de las pruebas de normalidad y de diferencia de medias.

Pruebas de normalidad			
		<i>Swietenia humilis</i>	<i>Alnus acuminata</i>
$\rho_{CH}$	Sesgo	0,5038	-0,5792
	Apuntamiento	-0,7042	-0,9155
$f_{vt}$	Sesgo	-0,3425	-0,1727
	Apuntamiento	-0,8638	-0,9420
$E_{vt}$	Sesgo	0,7428	0,8599
	Apuntamiento	-0,4548	-0,2215

Pruebas de diferencias de medias		
<i>Swietenia humilis</i> versus <i>Alnus acuminata</i>		
	Intervalo de confianza	Valor de $P$
$\rho_{CH}$	[170,8, 209,0]	$P < 0,05^*$
$f_{vt}$	[340,353, 420,2]	$P < 0,05^*$

$\rho_{CH}$ : Densidad.  
 $f_{vt}$ : Frecuencia natural.  
 $E_{vt}$ : Módulo de elasticidad dinámico.  
 \*: Existe una diferencia significativa para un nivel de confianza de 95 %.

Los valores de sesgo y de apuntamiento se encuentran dentro del rango -2 a +2 (Tabla 2), de tal forma, que se concluye que las muestras provienen de distribuciones normales. Este resultado permitió continuar con el experimento de diferencia de medias.

Para las tres variables  $\rho_{CH}$ ,  $f_{vt}$  y  $E_{vt}$ , comparadas en la Tabla 2, los valores de  $P$  son menores que 0,05, de tal forma, que se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna para  $\alpha = 0,05$ . Es decir, las diferentes características físicas y mecánicas permiten diferenciar las dos especies.

*Posicionamiento de las especies*

La Figura 3 presenta la dispersión de los módulos de elasticidad dinámicos en función de la densidad para *S. humilis* y *A. acuminata* y datos de [11], con su regresión.

Los valores de  $E_{vt}$  de *S. humilis* se posicionan por debajo de la recta de regresión para las maderas de referencia [11] y exhiben una dispersión importante. En contraste, los valores de  $E_{vt}$  de *A. acuminata* se sitúan por arriba de la recta de regresión para las maderas de referencia y comparativamente, su dispersión es menor que la de *S. humilis*.

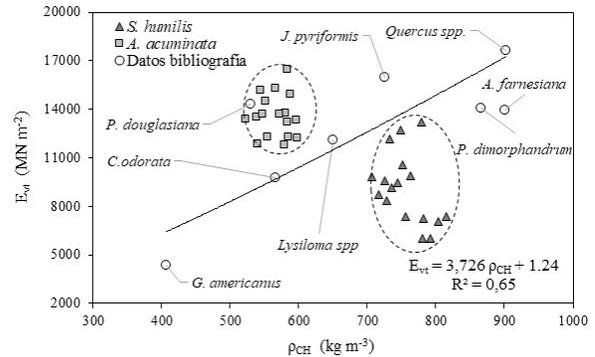


Figura 3: Dispersión de los módulos de elasticidad dinámicos ( $E_{vt}$ ) en función de la densidad ( $\rho_{CH}$ ) para *S. humilis* y *A. acuminata* y datos de [11], con su regresión.

**Conclusiones**

Se estudió el efecto de la especie en la variación del módulo de elasticidad dinámico de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*. Los resultados demuestran que la especie modifica el módulo de elasticidad en vibraciones transversales.

La densidad de *S. humilis* fue mayor que la densidad de *A. acuminata*. En cambio, el módulo de elasticidad dinámico de *S. humilis* fue menor en comparación con el módulo de elasticidad dinámico de *A. acuminata*.

La técnica no destructiva de vibraciones transversales verificó su utilidad práctica en la caracterización mecánica de la madera.

La magnitud de las características físicas y mecánicas de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*, es del mismo orden que los reportados en la literatura. No obstante, las dos especies se distinguen mecánicamente con propiedades físicas y mecánicas diferentes.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Coordinación de la Investigación Científica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, por su apoyo económico para realizar la investigación.

## Referencias

- [1] Jim L. Bowyer, Rubin Shmulsky, and John G. Haygreen. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Blackwell Publishing, 2007.
- [2] Sumire Kawamoto and R. Sam Williams. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites: a review. General Technical Report FPL-GTR-134, Forest Products Laboratory, Madison, 2002.
- [3] Robert J. Ross (Editor). Nondestructive evaluation of wood. General Technical Report FPL-GTR-238, Forest Products Laboratory, Madison, 2015.
- [4] Juan Carlos Tamarit Urias and Jorge Luis López Torres. *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, 2007.
- [5] J. A. Silva Guzmán, F. J. Fuentes Talavera, Anda R. Rodríguez, P. A. Torres Andrade, M. A. Lomelí Ramírez, J. Ramos Quirarte, C. Waitkus, and G. H. Richter. *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. Universidad de Guadalajara, 2010.
- [6] ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests, 2014.
- [7] Marc A. Meyers. *Dynamic behavior of materials*. John Wiley & Sons, 1994.
- [8] L Machek, H Militz, and R Sierra-Alvarez. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Holzforschung und Holzverwertung*, 2001(53):97–100, 2001.
- [9] H Gutierrez Pulido and R. De la Vara Salazar. *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw Hill, 2012.
- [10] J. R. Sotomayor Castellanos and M. Ramírez Pérez. Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3):3–29, 2013.
- [11] J. R. Sotomayor Castellanos. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas Mexicanas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2015.

## 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 y 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).

### 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

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).

## 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.

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  $\text{\LaTeX}$  o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en disco compacto y presentar tres copias en físico.

Los trabajos en  $\text{\LaTeX}$  deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

#### Figuras

Las figuras 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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 considerer 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.

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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X or in Microsoft WORD.

The Word works must employ a fount of family Time, to be stored in compact disk and to present three copies in physical.

The labored in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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 to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a 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  $\text{\LaTeX}$  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:

a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Ciudadanos  
Director Editor en jefe y demás  
Miembros del Comité Editorial  
Revista INGENIERÍA UC  
Presente.

Firma:

Nombre y apellido:

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado:

El autor para correspondencia:

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

## Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee: in the original, next to funding source.

Citizens  
Director Chief Editor and other  
Members of Editorial Committee  
Revista INGENIERÍA UC  
Present.

Signature:

First name and surname:

Correspondence author:

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email [revistaing@uc.edu.ve](mailto:revistaing@uc.edu.ve), who will be responsible for the authors and 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

## Índices de Revista Ingeniería UC

Revista Ingeniería UC está indexada en:



## Cuerpo Editorial

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)  
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**

<b>Editora - Jefe</b>	<b>Editores</b>	<b>Editores Honorarios</b>	
Prof. <sup>a</sup> Lisbeth Manganiello, PhD Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	Prof. Cristóbal Vega, PhD Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo Prof. Jesús J. Jiménez Grimán, MSc Instituto de Matemática y Calculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	Prof. Edilberto Guevara, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo Prof. Francisco Arteaga, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	
<b>Editores Asociados</b>	Prof. Francisco Soto, MSc, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo	Prof. Angelina Correia, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo PhD	
<b>Junta Editorial</b>	Dr. Enrique Barbien University of Houston, USA Dr. Guillermo Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela Dr. Herbert J. Sira R. CINVESTAV-IPN, México Dr. Johnny Bullon Universidad de los Andes, Venezuela Dr. Teodoro García Universidad de Carabobo, Venezuela	Dra. Maura Vázquez de Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela Dr. Merlin Rosales Universidad del Zulia, Venezuela Dr. Pablo Baricelli Universidad de Carabobo, Venezuela Dr. Roberto Callarotti IVIC, Venezuela Dr. José A. Díaz Universidad de Carabobo, Venezuela	
<b>Comité Técnico*</b>	Dr. Eliecer Colina, ULA Dr. Francisco Garcia Sanchez, USB Dr. Gian Franco Passariello, USB Dr. Giovanni De Mercato, USB Dr. Luis Vallés, UC Dr. Alfredo Varela, UC Dr. Sergio Pérez, UC Dr. Antonio Bonsjak, UC Dra. Susana Salinas de Romero, LUZ Ing. Donato Romanello, MSc, UC Ing. Thalia San Antonio, MSc, UC Dra. Nereida Sanchez, UC Ing. Lucila Martino, UC Ing. Ricardo Villegas, MSc, UC	Ing. Paulino Del Pino, MSc, UC Ing. Carlos Lameda, MSc, UNEXPO Ing. Alfonso Alfonsi, UDO Ing. Ángel Vellegas, UC Dr. Demetrio Rey Lago, UC Dr. Alfonso Zozaya, UC Dr. José A. Díaz, UC Dr. Guillermo Montilla, UC Dra. Laura Sáenz, UC Lic. Atilio Morillo, MSc, UC Ing Sergio Vellazana, MSc, UC Lic. Reina Windevoxlhel, MSc, UC Ing. Enrique Pérez, UC Ing. Maria Teresa Cruz, MSc, UC	Dr. César O. Seijas Fossi, UC Dr. Fernando Mora, USB Dr. Enrique Cázares Rivera, ITESM, México Dra. Yadira Martínez, UC Ing. Luis Llave, UC Ing. Johel Rodríguez, MSc, UPV, España Lic. Celeste Fernandez, MSc, UC Ing. José R. Pacheco, UC Dr. Cristóbal E. Vega González, UC Ing. Teddy Rojas, MSc, UC Ing. Carlos Jiménez, MSc, UC Dr. Luis Melián, UC Ing. Antonio Millán, MSc, UC Ing. Jesús Jiménez, MSc, UC
		Ing. Wilmer Sanz, MSc, UC Ing. Carlos Hernández, MSc, UC Ing. Enrique Flores, MSc, UC Dra. Damelys Zabala, UC Ing. Jennifer Aparicio, UC Dra. Lilly Marcano, UC Ing. César Martinez, UC Ing. Alejandro Centeno, UC Ing. Enrique Flores, MSc, UC Ing. Franklin Camejo, UC Ing. Vanesa Altomares, UC Dra. Sandra Cabello, UC Ing. Julio Pineda, UC *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](mailto:revistaing@uc.edu.ve)

Diseño y Diagramación: **Revista Ingeniería UC**, Dirección de Investigación – IMYCA (C. Vega) – CATS (J. Jiménez) en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X,  
Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela  
Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

# 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.<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup> Marianna Barrios León  
Directora de Postgrado

Prof. Carlos R. Alfonso 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.<sup>a</sup> Lisbeth Manganiello  
Directora de Investigación y Producción Intelectual

Prof.<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup> Lin Hurtado  
Directora Estudios Básicos

Prof.<sup>a</sup> Marlin Gómez  
Directora de Extensión

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán  
Director del Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado

Prof. David E. Duarte G.  
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](mailto: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**  
**Mayo – agosto 2016, Volumen 23**  
**Número 2**

---

---

**Revista Ingeniería UC se encuentra indexada en:**  
**Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;**  
**Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT;**  
**IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México);**  
**Periódica (México);**  
**Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.**

---

---

**Contenido general: páginas III y IV.**



**Revista INGENIERÍA UC**  
**Impreso en Publicaciones de la**  
**Facultad de Ingeniería de la**  
**Universidad de Carabobo,**  
**Campus de Bárbula,**  
**Venezuela**