

# INGENIUS

## Revista de Ciencia y Tecnología

- Caracterización, modelado y análisis de factibilidad técnica de un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción, utilizando colectores solares térmicos como fuente energética principal.

pág. 5

- Análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados en billets de aluminio de aleación 6063 en equipo de fundición de colada continua horizontal para el proceso de extrusión.

pág. 44

- Robot Salamandra anfibio con locomoción bioinspirada.

pág. 53



# INGENIUS

INGENIUS • Número 17 • Enero/Junio 2017. Revista semestral de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Industrial.

## Consejo Editorial

**Rafael Antonio Balart Gimeno**, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia – España (Editor en jefe).

**John Calle Sigüencia**, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador (Editor responsable).

**Marlon Quinde Abril**, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador (Editor adjunto).

**Juan López Martínez**, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia – España.

**Gustavo A. Rovelo Ruiz**, Hasselt University, Diepenbeek – Bélgica.

**Julio César Viola**, Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela.

**Paulo Peña Toro**, Ministerio de Industrias y Productividad, Quito – Ecuador.

**Franklin Gavilánez Álvarez**, American University, Washington D. C. – Estados Unidos.

**Piedad Gañán Rojo**, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia.

**José Alex Restrepo**, Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela.

**Sergio Luján Mora**, Universidad de Alicante, Alicante – España.

**Martha Lucía Zequera Díaz**, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá – Colombia.

**Grover Zurita Villarroel**, Universidad Privada Boliviana, Cochabamba – Bolivia.

**Mariela Cerrada Lozada**, Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela.

**Vladimir Robles Bykbaev**, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

**Pablo Parra Rosero**, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil – Ecuador.

**Germán Arévalo Bermeo**, Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador.

**Diego Peñaloza Rivera**, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

**Luis Garzón Muñoz**, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

Tiraje: 3600 ejemplares

**Indización.** INGENIUS está indizada en el catálogo Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. El acceso a la versión electrónica se encuentra en [www.latindex.unam.mx](http://www.latindex.unam.mx)

**Copyright.** INGENIUS 2017, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

# INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 17, enero – junio 2017

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

Indexada en:



Sistema Regional de Información en línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal.

La administración de INGENIUS se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico URKUND

Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*)



El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System*



Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*. SHERPA/ROMEO

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en <http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

**Rector**

Javier Herrán Gómez, sdb  
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja  
Casilla Postal 2074  
Cuenca, Ecuador  
Teléfono: (+593 7) 205 00 00  
Fax: (+593 7) 408 89 58  
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

**Vicerrector General Académico**

Luis Tobar Pesántez

**Vicerrector Docente**

Fernando Pesántez Avilés

**Vicerrector de Investigación**

Juan Salgado Guerrero

**Vicerrectores de Sede**

César Vásquez Vásquez (Cuenca)

José Juncosa Blasco (Quito)

Andrés Bayolo Garay (Guayaquil)

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología, publicación semestral, N.º 17, Enero-Junio 2017.

Editor responsable: John Calle Sigüencia. ISSN: 1390-650X. Domicilio de la publicación: Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Casilla postal 2074, Cuenca, Ecuador. Centro Gráfico Salesiano, Calle Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres. Teléfono: (+593 7) 283 17 45, Cuenca, Ecuador.

Correo electrónico: revistaingenius@ups.edu.ec

©INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología.

Impreso en Ecuador.

Los conceptos expresados en los artículos competen a sus autores. Los artículos de la presente edición pueden consultarse en la página web de la revista.

Tiraje: 3600 ejemplares

**Consejo de Publicaciones**

Javier Herrán Gómez, sdb  
PRESIDENTE

Juan Bottaso Boetti, sdb

Teodoro Rubio Martín

José Juncosa Blasco

Jaime Padilla Verdugo

Floralba Aguilar Gordón

Sheila Serrano Vicenti

Fabricio Freire Morán

John Calle Sigüencia

Armando Grijalva Brito

Alexandra Martínez Flores

Mónica Ruiz Vásquez

Luis Álvarez Rodas

EDITOR GENERAL

Estimadas y estimados lectores:

El vertiginoso avance de la ciencia y la producción acelerada de tecnología, resultado de la investigación científica han provocado innovación y desarrollo de productos, procesos y servicios que permiten a la sociedad satisfacer necesidades de forma eficiente, en un ambiente competitivo que promueve nuevas creaciones con aplicaciones que cada día sorprenden más. INGENIUS ha formado parte de este proceso, ya que los investigadores han confiado en esta publicación para dar a conocer sus contribuciones a la comunidad científica y a la colectividad en general. En este ámbito de acción existen áreas mayor participación: Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Computación; todas estas trabajando de forma sinérgica para dar soporte a sus ramas como son la robótica, el control, la automatización industrial, la domótica entre otras. Podríamos decir que se ha dado paso a un aporte consolidado en lo que en la actualidad se conoce como Mecatrónica.

Lo antes indicado se fortalece en este número ya que tenemos contribuciones de gran importancia en el campo de la robótica como *Operación remota de un robot móvil usando un teléfono inteligente*; *Robot salamandra anfibio con locomoción bioinspirada* y *Robot móvil con navegación basada en la visión y detección de peatones*; tam-

bién tenemos aplicaciones innovadoras con aplicaciones mecatrónicas como *Estudio de un nuevo procedimiento para medir la conductividad y difusividad térmicas de materiales*, también *Diseño e implementación de un sistema de control de voltaje y frecuencia de un sistema eléctrico de potencia a escala*.

Otro campo en donde el aporte de las áreas antes mencionadas es fundamental es el de las energías renovables, tenemos contribuciones como *Caracterización, modelado y análisis de factibilidad técnica de un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción, utilizando colectores solares térmicos como fuente energética principal* y una revisión muy interesante sobre el *Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador*.

Los procesos productivos también han sido fruto de análisis en este número, aportes como el *Desgaste de la herramienta de corte en el torneado en seco del acero AISI 316L* y *Análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados en billets de aluminio de aleación 6063 en equipo de fundición de colada continua horizontal para el proceso de extrusión* presentan innovaciones que serán de gran interés para productores e investigadores que buscan mejorar la calidad y la eficiencia en estos importantes temas relacionados a la producción.

John Calle Sigüencia, M. Sc.  
Editor responsable

# ÍNDICE

<b>Caracterización, modelado y análisis de factibilidad técnica de un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción, utilizando colectores solares térmicos como fuente energética principal.</b> <b>Characterization, modelling and technical feasibility analysis of an adsorption cooling system using solar thermal collectors as the principal energy source.....</b>	<b>5</b>
Itamar Harris, Julio Rodríguez.	
<b>Estudio de un nuevo procedimiento para medir la conductividad y difusividad térmicas de materiales.</b> <b>Study of a new approach for measuring thermal conductivity and diffusivity of materials... ..</b>	<b>15</b>
Rodney Hechavarría, Osvaldo Delgado, Francisco Pazmiño.	
<b>Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador.</b> <b>Energy harnessing wave in Ecuador.....</b>	<b>23</b>
Ronald Rodríguez-Santos, Manuel Chimbo-Campuzano.	
<b>Operación remota de un robot móvil usando un teléfono inteligente.</b> <b>Remote operation of a mobile robot using a smartphone.....</b>	<b>29</b>
Carlos Flores-Vázquez, Fco. Abiud Rojas de Silva G., Karla A. Trejo Ramírez.	
<b>Desgaste de la herramienta de corte en el torneado en seco del acero AISI 316L.</b> <b>Wear of the cutting tool in turning dry steel AISI 316L.....</b>	<b>36</b>
Yoandrys Morales-Tamayo, Yusimit Zamora-Hernández, Roberto Félix Beltrán-Reyna, Kimberly Magaly López-Cedeño, Ringo John López-Bustamante.	
<b>Análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados en <i>billets</i> de aluminio de aleación 6063 en equipo de fundición de colada continua horizontal para el proceso de extrusión.</b> <b>Quantitative analysis of main precipitate alloying elements in aluminum alloy 6063 cast billets made in horizontal continuous casting machine for the extrusion process.....</b>	<b>42</b>
Hernán Alberto Navas-Moscoso, Wilson Henry Vaca-Ortega, Juan Gilberto Paredes-Salinas, Fabián Rodrigo Morales-Fiallos, Diego Fernando Núñez-Núñez.	
<b>Robot salamandra anfibio con locomoción bioinspirada</b> <b>Robotics amphibious salamander with bio-inspired locomotion.....</b>	<b>51</b>
Marco A. Luna, Julio F. Moya, Wilbert G. Aguilar, Vanessa Abad	
<b>Diseño e implementación de un sistema de control de voltaje y frecuencia de un sistema eléctrico de potencia a escala para la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca.</b> <b>Implementation of a control system of voltage and frequency for an electrical power system of scale of the Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.....</b>	<b>60</b>
José Lucero, Jorge Ñauta, Marco Carpio.	
<b>Mobile robot with vision based navigation and pedestrian detection</b> <b>Robot móvil con navegación basada en visión y detección de peatones.....</b>	<b>67</b>
Marco A. Luna, Julio F. Moya, Wilbert G. Aguilar, Vanessa Abad	
<b>Normas editoriales.....</b>	<b>73</b>
<b>Guidelines.....</b>	<b>77</b>



# CARACTERIZACIÓN, MODELADO Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE UN SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE POR ADSORCIÓN, UTILIZANDO COLECTORES SOLARES TÉRMICOS COMO FUENTE ENERGÉTICA PRINCIPAL

## CHARACTERIZATION, MODELLING AND TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS OF AN ADSORPTION COOLING SYSTEM USING SOLAR THERMAL COLLECTORS AS THE PRINCIPAL ENERGY SOURCE

Itamar Harris<sup>1,\*</sup>, Julio Rodríguez<sup>2</sup>

### Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un trabajo de investigación teórico-experimental de caracterización, modelado y análisis de factibilidad técnica de los sistemas de acondicionamiento de aire por adsorción con fuente de energía solar, utilizando el sistema instalado en el Centro de Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI) de la Universidad Tecnológica de Panamá. El estudio parte del análisis del sistema de adsorción, su caracterización y modelado matemático, el cual permitió la obtención de expresiones útiles para evaluar parámetros tales como el COP, SCP y la eficiencia térmica del mismo.

### Abstract

This article presents the development of a theoretical-experimental investigation work which consisted in the characterization, modelling and feasibility analysis of the adsorption cooling systems with solar energy source, using the installed system in the Industry, Mechanical and Electrical Innovation Center (CINEMI), at the Technological University of Panama. The study began with the analysis of the adsorption system, its characterization and the mathematical modelling, which allowed us to obtain useful expressions in order to evaluate some parameters, such as COP, SCP and thermal efficiency of this system.

<sup>1,\*</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá – Panamá. Autor para correspondencia ✉: [itamar.harris@utp.ac.pa](mailto:itamar.harris@utp.ac.pa)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá – Panamá.

Recibido: 27-09-2016, aprobado tras revisión: 31-10-2016

Forma sugerida de citación: Harris, I.; Rodríguez, J. (2017). «Caracterización, modelado y análisis de factibilidad técnica de un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción, utilizando colectores solares térmicos como fuente energética principal». INGENIUS. N.º17, (Enero-Junio). pp. 5-14. ISSN: 1390-650X.

Utilizando data experimental recabada, se obtuvieron curvas de interés las cuales fueron comparadas con curvas obtenidas mediante simulación numérica. Se concluye que los sistemas de adsorción pueden ser técnicamente viables bajo ciertas condiciones de operación e instalación controlables y ha de tomarse en cuenta las perspectivas para el futuro de esta tecnología y actuales aplicaciones exitosas a nivel mundial.

**Palabras clave:** acondicionamiento de aire solar, adsorción, colectores solares térmicos.

Using the acquired experimental data it was obtained different curves of interest, which were compared with curves obtained through numerical simulation. It was concluded that the adsorption air-conditioning systems could be technically feasible under some controllable operation and installation conditions; and it is necessary to consider the future perspectives of this technology and the currently successful applications in the world.

**Keywords:** solar air-conditioning, adsorption, solar thermal collectors.

## 1. Introducción

La creciente necesidad de acondicionamiento de aire y refrigeración propia de áreas con clima tropical, como el de Panamá, va de la mano con un elevado nivel de radiación solar. Esto ha provocado un especial interés por parte de la comunidad científica, en lograr combinar ambos aspectos para lograr en conjunto un beneficio a las poblaciones [1].

Cabe señalar que el uso de la radiación solar en aplicaciones de enfriamiento de aire es más complejo, tanto a nivel conceptual como en construcción. A pesar de este inconveniente, los esfuerzos relacionados a sus usos siguen en estudio y desarrollo [2].

Bajo el mismo interés de desarrollar e implantar nuevas soluciones tecnológicas fundamentadas en el uso de fuentes renovables de energía, el Centro de Investigación CINEMI realizó el proyecto de *Evaluación del uso de colectores solares térmicos en sistemas de absorción para producción de aire acondicionado y/o refrigeración en Panamá* [3].

A finales de 2014, tras evaluar sus ventajas para el acondicionamiento con fuente energética solar, se puso en marcha físicamente un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción en el complejo universitario de la Universidad Tecnológica de Panamá de Tocumen, en vez de un sistema por absorción como fue considerado en un principio.

La **adsorción** es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida); por ello se considera como un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se adsorbe se denomina adsorbato y el material sobre el que lo hace es el adsorbente. Al proceso contrario a la adsorción, se le conoce como **desorción** (o regeneración) [4].

La cantidad de vapor adsorbido por una muestra de un sólido poroso es proporcional a la masa de la muestra y las condiciones experimentales (temperatura y la presión), así como por la naturaleza del sólido (adsorbente) y del vapor (adsorbato). Por lo tanto, la elección de un adsorbente dependerá del vapor a ser adsorbido, además de la capacidad de retención del adsorbente ( $kg\ adsorbato/kg\ adsorbente$ ) [5].

Los materiales adsorbentes son sales orgánicas e inorgánicas. Sus usos más comunes son la separación de gas-líquido y secado [6]. En nuestro caso particular, el sistema en estudio utiliza sílica-gel como adsorbente.

El sílica-gel o gel de sílice es un sólido fuertemente poroso producido a partir del ácido sulfúrico y el silicato de sodio; el cual está constituido por partículas porosas con diámetros entre 2-20 nm. El sílica-gel tiene una gran capacidad para adsorber vapor de agua (aproximadamente 35-40 %), con requerimientos de temperaturas relativamente bajas para la regeneración [5].

A principios del siglo XX, entre los años veinte y treinta se diseñaron y construyeron máquinas de refrigeración por adsorción. En 1925, se registró la primera patente de una máquina de producción de frío, la cual utilizaba como material adsorbente el sílica-gel ( $SiO_2$ ).

El desarrollo alcanzado respecto al uso de la adsorción para refrigeración, tuvo un estancamiento de aproximadamente cincuenta años; y no es hasta finales de 1970 que los estudios al respecto son retomados; el interés en estos sistemas se incrementó debido a la crisis del petróleo y a los problemas asociados al uso de los compuestos CFC. Es en esta época que se desarrolló un ciclo básico de adsorción utilizando energía solar como fuente energética [7].

A finales del siglo XX, se realizaron nuevos esfuerzos por grupos como Sumathy y Zhongfu (1999), Ferreira y Daguinet (2000) y Hilbrand, Dind, Pons y Buchter (2002), quienes desarrollan sistemas experimentales por adsorción alimentados por energía solar [8].

A nivel comercial, actualmente es posible encontrar en el mercado, máquinas para refrigeración y acondicionamiento de aire por adsorción destinadas a utilizar como fuente energética colectores solares; tanto para aplicaciones comerciales como doméstica.

Para aplicaciones domésticas podemos destacar las desarrolladas por la universidad china SJTU (Shanghai Jiao Tong University), por el fabricante alemán Sortech AG y la del Energy Research Centre of the Netherlands ECN de 2,5 kW [4].

Actualmente se han extendido las áreas de aplicación de las máquinas de adsorción en diversas soluciones tecnológicas para aprovechar las pérdidas de energía, principalmente en forma de calor a la atmósfera, que tienen lugar junto con los procesos conversión de energía. En la actualidad, existen múltiples trabajos que muestran la posibilidad de utilizar *chillers* de adsorción en sistemas combinados de trigeneración (generación de calor, electricidad y aire acondicionado) [9].

## 2. Métodos y materiales

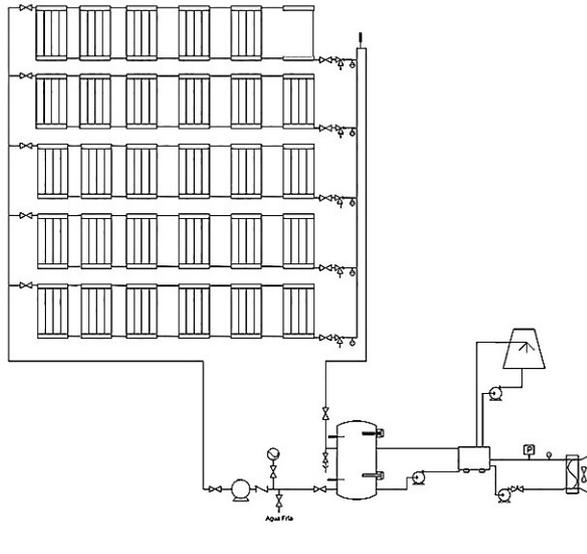
La máquina de enfriamiento de aire por adsorción (*chiller* o generador), se compone fundamentalmente de lechos de adsorción<sup>1</sup>, condensador, evaporador y válvula de expansión. Energéticamente, cada lecho es conectado a una fuente de calor a alta temperatura, a una línea de disipación de calor a temperatura intermedia y a una fuente a baja temperatura, donde se produce el efecto útil de producción de frío [7].

El equipo adquirido funciona de manera continua por lo que dos lechos operan desfasados con el fin de garantizar la continuidad de operación; y el proceso incluye dos periodos de recuperación de calor.

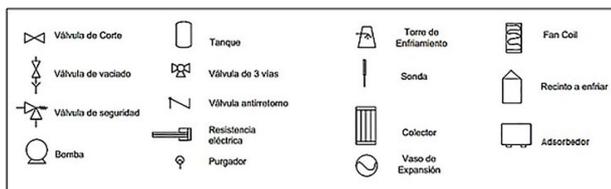
El sistema de acondicionamiento de aire por

<sup>1</sup>Cámaras donde se efectúan la absorción y desorción del vapor.

adsorción, instalado en CINEMI (Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria), ha sido representado esquemáticamente mediante la Figura 1. En la Figura 2 se detalla la simbología utilizada en dicho esquema.



**Figura 1.** Diagrama del sistema de acondicionamiento de aire por adsorción instalado en CINEMI.



**Figura 2.** Simbología referente al diagrama del sistema instalado en CINEMI.

Ha de señalarse que este sistema funciona en función de tres circuitos: circuito de agua fría (LT) que es la línea que contiene el *fan coil*; el circuito de agua caliente (HT) en el cual se encuentra el sistema de colectores; y el circuito de agua de re-enfriamiento a temperatura media (MT) el cual presenta la torre de enfriamiento. Para garantizar el adecuado funcionamiento es necesario que todos los circuitos de agua que fluyen a través del adsorbedor operen a una presión constante de 2 bar.

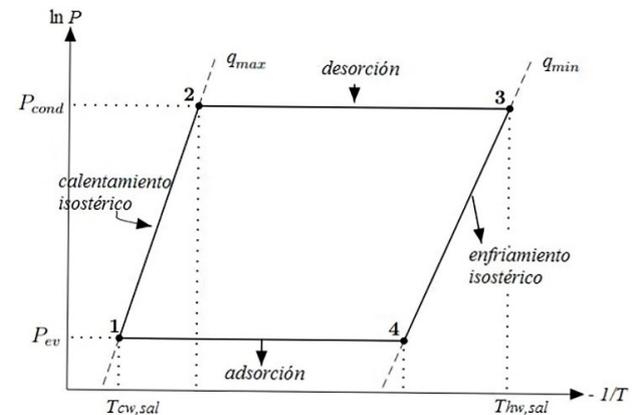
La máquina de adsorción (o adsorbedor) es, en principio, intermitente: el sólido adsorbe el vapor refrigerante a baja presión y temperatura. Cuando finaliza esta fase, este material se regenera (desorbe) a alta presión y temperatura [7].

Para conseguir un enfriamiento continuo debe disponerse de un par de lechos adsorbente, como mínimo, que realicen los procesos de adsorción/desorción

desfasadamente, de modo que mientras en un lecho se adsorbe, en el otro se desorbe vapor.

El ciclo teórico del proceso de adsorción, es representado mediante el diagrama de Clapeyron o Dühring (ver Figura 3). Como se puede observar, ese ciclo consta de 4 etapas [10]:

*Paso 1: Compresión y calentamiento isostérico*<sup>2</sup> 1 → 2. El adsorbedor en fase de regeneración se aísla del resto de la instalación y se comunica con la fuente de energía calorífica a alta temperatura.



**Figura 3.** Diagrama de Clapeyron del ciclo básico de adsorción. [10]

Durante el proceso comprendido entre los estados 1 → 2, vapor refrigerante es desorbido isostéricamente.

*Paso 2: Desorción a presión constante* 2 → 3. En esta fase se sigue calentando el lecho, lo que provoca mayor flujo de vapor desorbido hacia el condensador; hasta que cesa el proceso de desorción cuando el lecho adsorbente alcanza la temperatura de la fuente de calor.

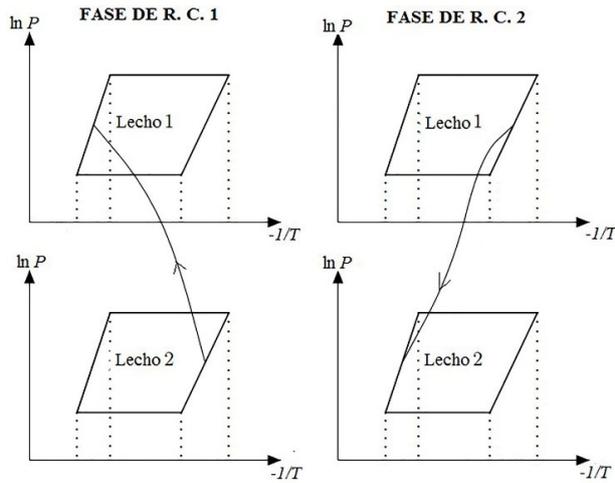
*Paso 3: Enfriamiento isostérico* 3 → 4. El adsorbedor se aísla del resto de la instalación y se enfría mediante el agua de re-enfriamiento. Debido a que se encuentra aislado del resto de la instalación, el adsorbente caliente, al ser enfriado, adsorbe vapor refrigerante (cantidad despreciable) y se suscita una caída de presión y temperatura.

*Paso 4: Enfriamiento isostérico* 4 → 1. Cuando la presión alcanza la del evaporador, el refrigerante contenido en el evaporador comienza a hervir y luego este fluye hacia el lecho adsorbente, produciéndose el efecto refrigerante.

Es importante destacar que los periodos de recuperación de calor antes mencionados implican el aprovechamiento del calor liberado en la reacción de adsorción (exotérmica), como se muestra en la figura 2. La recuperación de calor se realiza en dos fases. En la fase de recuperación 1 (Fase de R. C. 1), el lecho 1 para calentamiento y lecho 2 para enfriamiento; y en la fase de recuperación 2 (Fase de R. C. 2), el le-

<sup>2</sup>A concentración de vapor ( $q$ ) constante.

cho adsorbente 1 para enfriamiento y el lecho 2 para calentamiento (ver Figura 4).



**Figura 4.** Ciclos de adsorción con dos lechos y recuperación de calor. [10]

Para modelar matemáticamente el funcionamiento del sistema, con respecto a las interacciones energéticas entre cada uno de los circuitos hidráulicos se tomaron en consideración la primera y segunda ley de la termodinámica.

Las suposiciones consideradas para el análisis del sistema en estudio son [11]:

- Temperatura y presión uniformes en los componentes.
- Existe equilibrio termodinámico en el adsorbedor, en cualquier instante de tiempo  $t$ .
- La resistencia a la transferencia de masa en el lecho adsorbente es despreciable.
- El calor específico y densidad del adsorbente seco y del agua son constantes.
- La capacidad de enfriamiento del condensador es ilimitada y la temperatura de evaporación es constante.

El propósito de la formulación efectuada, es identificar los parámetros más influyentes y obtener expresiones válidas que permitan evaluar el desempeño del sistema.

Los parámetros de mayor preponderancia en el comportamiento del sistema en estudio son: el coeficiente de desempeño, poder de enfriamiento específico y la eficiencia del sistema.

El coeficiente de desempeño (según sus siglas en inglés,  $COP$ ) de un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción puede ser definido en términos de la razón de la energía térmica removida en el proceso de

refrigeración  $Q_{eva}$ ; con respecto a la energía térmica dada al sistema para efectuar dicho proceso  $Q_{ch}$ . Esto se expresa como,

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_{ch}} \quad (1)$$

Siendo

$$Q_{eva} = \dot{m}_{cw} C_{p,cw} \int_0^{t_{ciclo}} (T_{cw,ent} - T_{cw,sal}) dt \quad (2)$$

$$Q_{ch} \cong \dot{m}_{hw} C_{p,hw} \int_0^{t_{ciclo}} (T_{hw,ent} - T_{hw,sal}) dt \quad (3)$$

Donde « $hw$ » hace referencia a un parámetro del agua caliente y « $cw$ » a un parámetro del agua fría.

El poder de enfriamiento específico ( $SCP$  por sus siglas en inglés), es definido como la tasa a la cual se produce frío con respecto al tiempo de ciclo por unidad de masa de adsorbente. Cuantitativamente se expresa como,

$$SCP = \frac{\dot{Q}_{eva}}{m_{SiG}} = \frac{\dot{m}_{cw} C_{p,cw} (T_{cw,ent} - T_{cw,sal})}{m_{SiG}} \quad (4)$$

Donde  $m_{SiG}$  corresponde a la masa del sílica-gel.

El poder de enfriamiento específico refleja el tamaño del sistema, puesto que se refiere tanto a la masa de adsorbente como a la potencia de refrigeración. Para una carga nominal de enfriamiento, los valores más altos de  $SCP$  indican qué tan compacto es el sistema [11].

La eficiencia termodinámica del sistema expresa el desempeño actual del sistema respecto al máximo desempeño esperado de acuerdo con el ciclo ideal de Carnot ( $COP_{ct}$ ). Esta es obtenida mediante la expresión propuesta por Pons [12] como,

$$\eta_{term} = \frac{COP}{COP_{ct}} \quad (5)$$

Al realizar las consideraciones pertinentes asociadas con la Segunda Ley de la Termodinámica se obtiene que,

$$COP_{ct} = \frac{\frac{T_{prom}}{T_g} - 1}{1 - \frac{T_{prom}}{T_{eva}}} \quad (6)$$

Donde, si asumimos que las condiciones de equilibrio térmico son alcanzadas

$$T_{prom} = \frac{T_a + T_{cond}}{2} \approx T_a \approx T_{cond} \quad (7)$$

Utilizando las ecuaciones (1), (4) y (5) se obtuvieron diversas curvas que relacionan los parámetros  $COP$ ,  $SCP$  y  $\eta_{term}$  con las temperaturas involucradas en dichas expresiones.

Para obtener datos de las temperaturas experimentales, se realizaron pruebas al equipo, en horario de

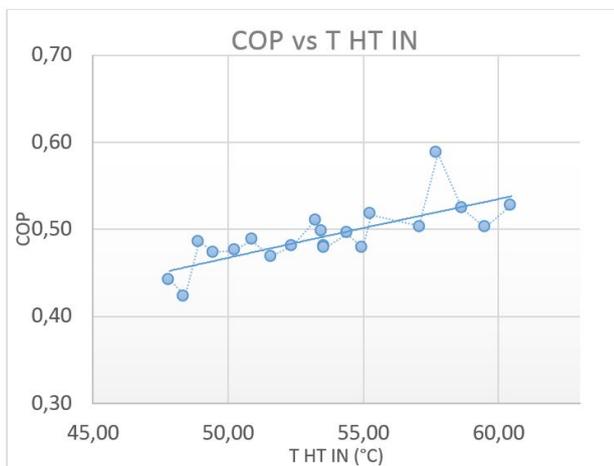
11 a. m. a 3 p. m., durante 10 días hábiles. Los datos fueron recabados a intervalos de 30 s.

En este periodo de prueba, se efectúan alrededor de veinte ciclos con *cycle times* de aproximadamente diez minutos. Dentro de este tiempo de ciclo tienen lugar dos periodos de recuperación de calor, con una duración de 16 s.

### 3. Análisis de resultados

Mediante el manejo de los datos adquiridos, se obtuvieron ciertas curvas de interés las cuales se validaron por comparación con las curvas arrojadas por una simulación numérica mediante aproximación en diferencias finitas, de un sistema de acondicionamiento de aire por adsorción con par sílica-gel-agua con características parecidas; a excepción del hecho de que el mismo, usa la estrategia de recuperación de masa para mejorar la salida de enfriamiento [13].

En la Figura 5 se muestra cómo varía el COP con respecto a la temperatura de la fuente de calor (agua a alta temperatura).



**Figura 5.** Efecto de la temperatura de la fuente de calor sobre el COP.

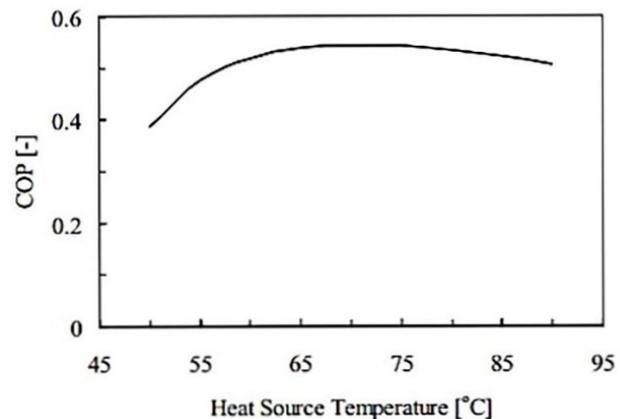
Es posible notar que a medida que disminuye dicha temperatura se observa una disminución del COP, lo que coincide con el uso ineficiente de la energía calorífica, puesto que se remueve menor cantidad de calor del recinto para un mismo valor de calor entregado al generador.

A comparar con la simulación (ver Figura 6), solo es posible notar el carácter creciente del COP a medida que aumentaba la temperatura de agua caliente en el rango de temperaturas entre los 45-63 °C.

En cuanto al comportamiento del SCP, vemos que el poder del sílica-gel para enfriar el refrigerante es mayor cuanto mayor sea la temperatura de agua caliente. Se observa que en el rango entre 45-63 °C, se da una

variación del SCP desde 35 W/kg hasta 80 W/kg, de acuerdo con lo presentado en la Figura 7.

Si consideramos el comportamiento del SCP observado en la Figura 7, para temperaturas entre 65 °C y 90 °C, se puede esperar un aumento gradual del SCP si la máquina opera con foco caliente en este rango de temperaturas.

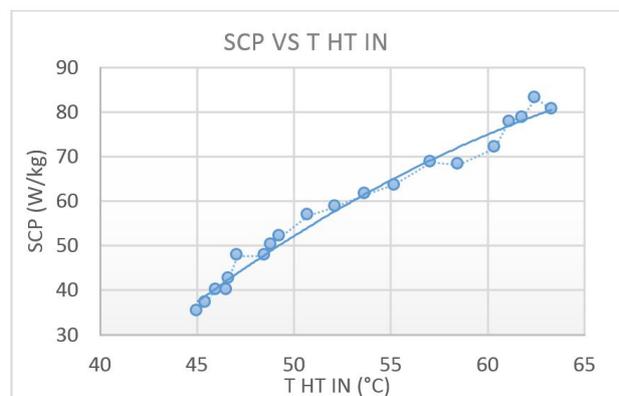


**Figura 6.** Efecto de la temperatura de la fuente de calor en el COP (obtenido mediante simulación.) [13]

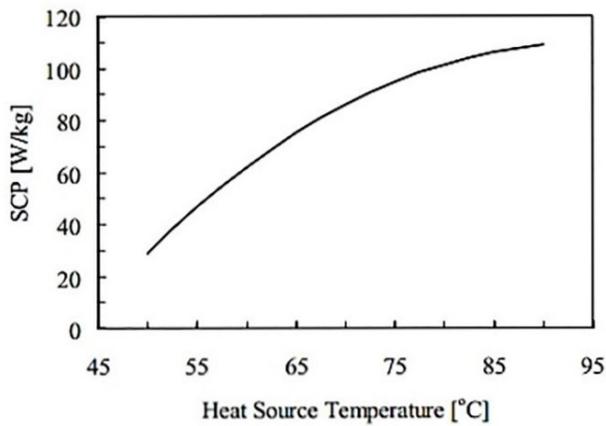
El comportamiento de este parámetro resultó similar al esperado; el cual se muestra en la Figura 8.

De la sección anterior, ya hemos comprobado que la temperatura de agua caliente influye significativamente en el SCP, por lo que podemos decir que también existe una relación directa entre las temperaturas de agua caliente y de agua fría.

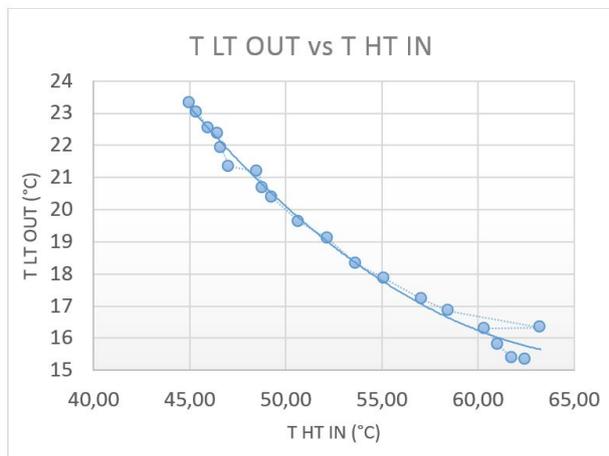
En la Figura 9 se relacionan estas temperaturas y los resultados son los esperados: a medida que aumenta la temperatura de agua caliente, disminuye la temperatura de agua fría.



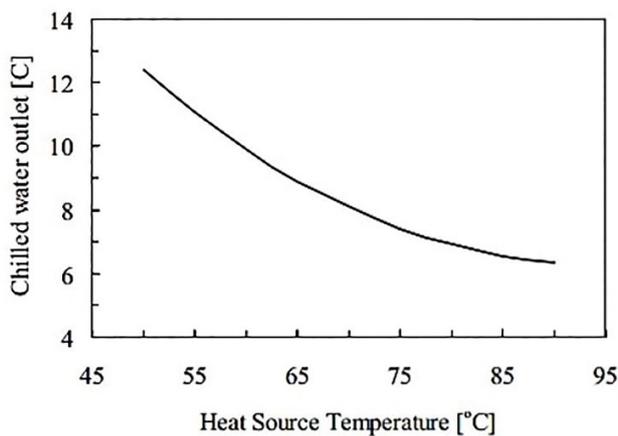
**Figura 7.** Efecto de la temperatura de la fuente de calor sobre el SCP.



**Figura 8.** Efecto de la temperatura de agua caliente sobre el SCP (simulación). [13]



**Figura 9.** Efecto de la temperatura de agua caliente sobre la de agua fría.



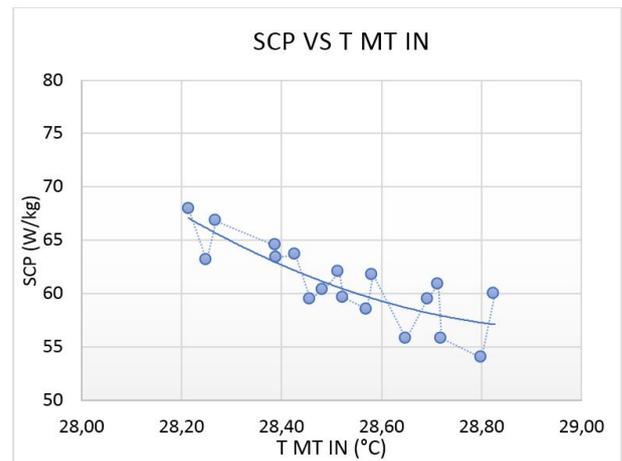
**Figura 10.** Efecto de la temperatura de agua caliente sobre la de agua fría (simulación). [13]

Sin embargo, atendiendo a los resultados obtenidos en la simulación (ver Figura 10), se esperaba que las

temperaturas de agua caliente alcanzadas resultaran en temperaturas de agua fría más bajas.

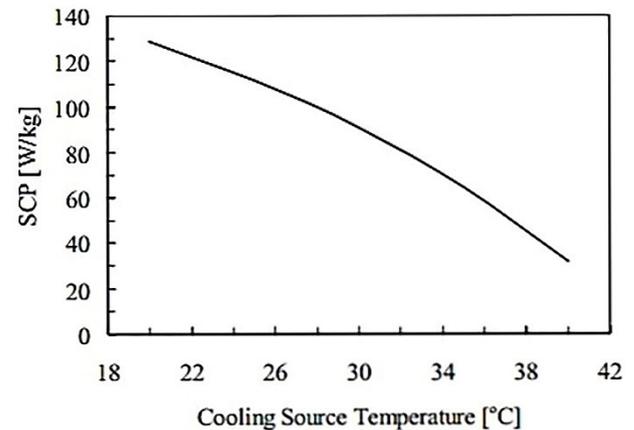
Cabe destacar que factores como el tipo de sílica-gel, el efecto de la estrategia de recuperación de masa asumido en la simulación y las características propias de los intercambiadores de calor son factores que influyen en este resultado.

En cuanto a la relación del SCP con la temperatura  $T_{MT IN}$ , en la figura 11 se observa que la curva obtenida tiende a una relación polinómica de segundo orden, con concavidad negativa. Dicho aspecto demuestra una tendencia de gran disminución del SCP con el aumento de la temperatura  $T_{MT IN}$ .



**Figura 11.** Efecto de la temperatura de agua de re-enfriamiento en el comportamiento del SCP.

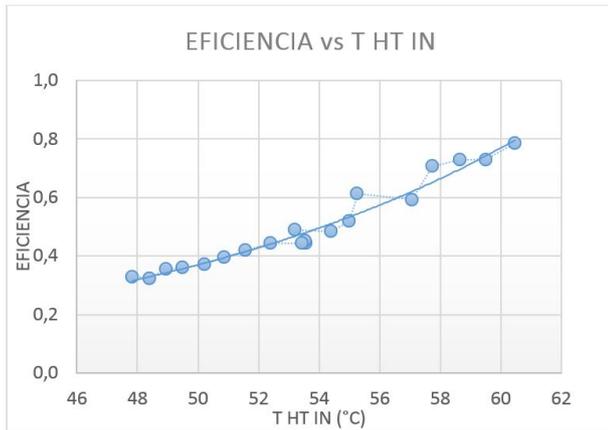
Si atendemos a la forma de la curva propuesta por la simulación (Figura 12), se esperaba una disminución con concavidad inversa a la obtenida experimentalmente, lo que se traduce en una menor razón de disminución del SCP con el aumento de la temperatura de agua de re-enfriamiento.



**Figura 12.** Efecto de la temperatura de agua de re-enfriamiento en el comportamiento del SCP (simulación). [13]

En la Figura 13, nos muestra la relación decreciente de la eficiencia a medida que la temperatura de dicha fuente disminuye.

En esta figura ha de notarse que el máximo valor alcanzado de eficiencia es de un 80 %. Se verifica una disminución de aproximadamente 5 % de eficiencia, con la disminución de la temperatura en solo 1 °C.



**Figura 13.** Efecto de la temperatura de agua caliente en la eficiencia del sistema.

Como otro punto relevante, en la Figura 14, se presentan las curvas obtenidas de temperatura de bulbo seco y humedad relativa en un día de prueba.



**Figura 14.** Comportamiento de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa del aire del recinto en un periodo de prueba.

Para todos los días de prueba, la disminución del nivel de la radiación solar provoca la disminución de la temperatura de agua caliente por lo que el sistema no logra mantener la temperatura de bulbo seco en el recinto.

Notamos un continuo aumento de la humedad relativa, lo cual es cónsono con el hecho de que se usa un fan coil como elemento para suministrar aire enfriado al recinto, con las características del clima propio de nuestro país y con el hecho de que el sistema no cuenta con algún mecanismo de control de humedad.

Además de realizarse mediciones de temperaturas de operación y condiciones del aire en el recinto, se

recabó información respecto al consumo eléctrico del sistema.

Dependiendo de las condiciones climáticas suscitadas durante cada día de prueba, el equipo funcionó bajo dos condiciones de operación: con el apoyo de una fuente de calor auxiliar o sin dicho respaldo.

Cuando el equipo funciona sin el uso de la resistencia eléctrica, su consumo oscila entre 0,946 kWh y 1,073 kWh. Al funcionar utilizando la resistencia eléctrica, el consumo oscila entre 3,02 kWh y 3,41 kWh, lo cual se traduce en que la resistencia eléctrica consume entre 2,27 kWh y 2,49 kWh per sé. Se observa que la utilización de la resistencia eléctrica aumenta el consumo eléctrico del sistema en un 318 %; es decir, se triplica.

#### 4. Análisis de factibilidad

Se procedió a realizar una comparación de las características operativas del sistema instalado con respecto a las de un *split* modelo Samsung ASV-24PSBAN de 18000 Btu/h (equivalente a 5,28 kW<sub>t</sub>), de igual forma instalado en el recinto de prueba.

Los parámetros comparados (ver tabla 1) fueron consumo eléctrico, temperatura, humedad relativa del aire y dimensiones de elementos internos en el recinto.

Basándonos en la comparación realizada podemos señalar que a nivel técnico, el sistema de acondicionamiento de aire por adsorción implementado puede ser factible, bajo condiciones de funcionamiento e instalación específicas.

**Tabla 1.** Comparación de algunos parámetros de un sistema Split vs. un sistema de adsorción

Parámetros	Split	Sistema de adsorción*
Capacidad	5,28 kW <sub>t</sub>	5,5 kW <sub>t</sub>
Consumo eléctrico	1,12 kW <sub>e</sub>	1,07 kW <sub>e</sub>
Temperatura	26 °C	26 °C
Humedad relativa	64 %	75 %
Dimensiones de elementos internos en el recinto (ancho x profundidad x altura)	1,065 x 0,230 x 0,298 m	0,798 x 0,821 x 1,345 m Fan coil: 1,88 x 0,597 x 0,305 m

\* Valores promedio de operación.

Notamos que la capacidad de enfriamiento de ambos dispositivos es semejante y el consumo de energía eléctrica se reduce en aproximadamente un 50 % (si no se hace uso de la resistencia eléctrica).

Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones fue necesario el uso de la resistencia eléctrica para suplir la carga, lo que nos indica que el sistema depende del uso de una fuente auxiliar de suministro de energía.

Además, otro parámetro crítico puede ser la humedad relativa, en caso de operar durante largos periodos. Actualmente, no se cuenta con algún dispositivo que permita controlar la humedad relativa en el recinto lo cual, se prevé, ha de provocar condiciones de bajo *comfort* tras largos periodos de operación.

En cuanto a este aspecto, es preciso hacer referencia al estudio realizado por Dai *et al.* (2002) que consistió en el estudio teórico de un sistema híbrido de acondicionamiento de aire por adsorción y por desecante; instalado en un depósito para almacenamiento de granos de la Universidad Shanghai Jiao Tong [14].

La deshumidificación del aire que se realiza mediante el sistema de acondicionamiento con desecante, disminuye la carga de enfriamiento del recinto, lo que se traduce en un mejor desempeño del sistema de acondicionamiento por adsorción [15].

Un punto crítico, no señalado a nivel de la comparación técnica, es la diferencia de costos de los dos sistemas; siendo el de adsorción 49 veces más costoso que el sistema *Split* de referencia. Sin embargo, dicha diferencia es menos considerable cuando orientamos su aplicación al acondicionamiento de recintos con alta carga de enfriamiento.

Según [10], cuanto mayor es la inversión inicial (lo cual implica el uso de un sistema de mayor capacidad de enfriamiento), menores son los costos de instalación de este tipo de sistemas en comparación con los asociados a la implementación de un sistema por compresión.

En este contexto cabe señalar las perspectivas para el futuro de la tecnología utilizada. Se prevé por Wang *et. al* (2001) que esta tecnología a nivel residencial tendrá un futuro más prometedor en tanto se logre: desarrollar materiales adsorbentes que adsorban mayores concentraciones de vapor, mejorar de la transferencia de calor entre las partículas adsorbentes y el material del intercambiador de calor, desarrollar sistemas compactos que integren todos sus componentes y trabajar aún más en estrategias de control de bajo costo y alto rendimiento [10].

Dado esto, Otanicar *et. al* (2012) concluyeron mediante la comparación (a nivel de costos e impacto medioambiental) de sistemas de acondicionamiento solar para aplicación residencial cuyas fuentes energéticas fueron solar térmica (mediante colectores solares) y solar fotovoltaica (mediante paneles fotovoltaicos: PV); que tanto el impacto medioambiental y los costos de instalación son menores para los sistemas con fuente energética fotovoltaica. Se prevé en su estudio que para 2030 los costos asociados a los sistemas PV sean reducidos en un 60-77 % y en el caso de los sistemas con fuente solar térmica en solo un 35-45 % [16].

Independientemente de las proyecciones de la tecnología de adsorción con fuente de energía solar térmica para el caso de aplicación residencial, es necesario tomar en consideración su aplicabilidad para sectores en los que existen grandes pérdidas de energía térmica.

En este punto encontramos un gran potencial a nivel de sistemas combinados de trigeneración (CCHP, por sus siglas en inglés *combined cooling, heating and power*) cuyas eficiencias oscilan entre 70-80 % [17].

## 5. Conclusiones

Se obtuvieron expresiones válidas que permitieron evaluar el desempeño del sistema a partir del modelado matemático realizado y el uso de la data obtenida en las pruebas experimentales. Las curvas obtenidas demuestran un comportamiento estándar del sistema de adsorción, puesto que se nota una alta similitud de las mismas, con respecto a los resultados de las simulaciones presentadas en la referencia consultada.

Fueron identificados factores que señalan que el equipo puede ser viable a nivel técnico, puesto que puede suplir la carga de enfriamiento involucrando un menor consumo de energía eléctrica al no utilizar una resistencia eléctrica, lo que recalca la importancia de optimizar la fuente auxiliar de suministro de energía calorífica y el sistema de colectores.

Sin embargo, a nivel residencial, las posibles ventajas técnicas están condicionadas por la disponibilidad de la fuente energética y el desarrollo de sistemas de acondicionamiento por adsorción que resulten más económicos, compactos; y que permitan manejar de mejor manera la humedad relativa.

Basados en lo descrito previamente, se considera conveniente tomar en consideración las perspectivas en el futuro de los sistemas residenciales de acondicionamiento con fuente energética solar térmica y contemplar la posibilidad de uso a mayor escala, como parte de sistemas combinados de trigeneración (CCHP, por sus siglas en inglés *combined cooling, heating and power*) en la realización de futuras investigaciones relacionadas.

## Referencias

- [1] V. Mittal, K. Kasana, and N. Thakur, "Modelling and simulation of an absorption cooling system for india," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 17, no. 3, pp. 65–70, 2006.
- [2] R. Z. Wang, T. S. Ge, C. J. Chen, Q. Ma, and Z. J. Xiong, "Solar sorption cooling systems for residential applications: Options and guidelines," *International Journal of Refrigeration*, vol. 1, no. 32, pp. 638–660, 2009.
- [3] E. Quintana and R. Díaz, "Simulación de un sistema de acondicionamiento de aire por absorción con asistencia solar en panamá utilizando trnsys," *I+D Tecnológico*, vol. 9, no. 2, pp. 48–58, 2013.
- [4] E. Torrella Alcaraz, D. Sánchez García-Vacas, R. Cabello López, J. Patiño Pérez, and R. Llopis Doménech. (2011) Las máquinas de producción de frío por adsorción con la mezcla sílica-gel-agua. [Online]. Available: <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/41841/52043.pdf?sequence=2>.

- [5] S. T. Oh, “Siligel/water based adsorption cooling system employing compact fi-tube heat. exchanger,” *Kyushu University*, Japan, 2013.
- [6] J. G. Trujeque Bolio and G. A. Ramos López, “Diseño de refrigerador solar por adsorción para clima cálido húmedo,” Tesis de Posgrado en Tecnología Avanzada,, Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, pp. 115, 2010.
- [7] G. Tashtoush, “A statistical approach to optimize the solar adsorption refrigeration system,” *CS Canada Energy Science and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 18–28, 2012.
- [8] W. Hussein, “Solar energy refrigeration by liquid-solid adsorption technique,” Master’s thesis, Nablus – Palestine: An-Najah University, 2008.
- [9] M. Szyk and W. Nowak, “Operation of an adsorption chiller in different cycle time conditions,” *Chemical Process Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 109–119, 2014.
- [10] D. E. Demirocak, “Thermodynamic and economic analysis of a solar thermal powered adsorption cooling system,” Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering, Middle East Technical University, 2008.
- [11] L. Y. K. Sumathy, “Modeling and simulation of a solar powered two bed adsorption air conditioning system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 2761–2775, 2004.
- [12] E. Anyanwu and N. Ogueke, “Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator,” *Renewable Energy*, no. 30, pp. 81–96, 2005.
- [13] M. Z. I. Khan, S. Sultana, A. Akisawa, and T. Kashiwagi, “Numerical simulation of advanced adsorption refrigeration chiller with mass recovery,” *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 59–67, 2006.
- [14] H. L. Luo, Y. Dai, and R. Z. Wang, “Experimental investigation of a solar adsorption chiller used for grain depot cooling,” *Applied Thermal Engineering*, no. 26, pp. 1218–1225, 2006.
- [15] Y. J. Dai, R. Z. Wang, and Y. X. Xu, “Study of a solar powered solid adsorption – desiccant cooling system used for grain storage,” *Renewable Energy*, no. 25, pp. 417–430, 2002.
- [16] T. Otanicar, R. A. Taylor, and P. E. Phelan, “Prospects of solar cooling – an economic and environmental assessment,” *Solar Energy*, no. 86, pp. 1287–1299, 2012.
- [17] D. W. Wu and W. R. Z., “Combined cooling, heating and power: A review,” *Progress in Energy and Combustion Science*, no. 32, pp. 459–495, 2006.



# ESTUDIO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD Y DIFUSIVIDAD TÉRMICAS DE MATERIALES

## STUDY OF A NEW APPROACH FOR MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY AND DIFFUSIVITY OF MATERIALS

Rodney Hechavarría<sup>1,\*</sup>, Osvaldo Delgado<sup>2</sup>, Francisco Pazmiño<sup>3</sup>

### Resumen

En este trabajo se estudia las posibilidades y limitaciones de un método no-estacionario, que utiliza como fuente de calor la radiación luminosa. En el mismo, que es una nueva variante propuesta por este grupo, la luz se hace incidir homogéneamente sobre una de las superficies extremas de un cilindro de superficie lateral termoaislada, manteniéndose constante la temperatura en el otro extremo. Asimismo, se analiza la posibilidad de utilizar dicho método para medir la difusividad y conductividad térmicas ( $\alpha$ ,  $\chi$ ) de fluidos; igualmente, la forma en que este pudiera ser empleado para comprobar la validez del modelo de Hamilton y Crosser (HC) para el caso de los nanofluidos. Se le llama nanofluido a todo aquel fluido que, convencionalmente, es utilizado para intercambiar calor, al cual se le agregan nanopartículas con el propósito de aumentar su conductividad térmica, mejorando así su capacidad para intercambiar calor.

**Palabras clave:** conductividad térmica, difusividad térmica, conducción de calor, modelo de Hamilton y Crosser.

### Abstract

In the present work it has been studied the possibilities and limitations of non-stationary method, which uses heat as a source of light radiation. In this method, a new variant proposed by this group, the light is impinged evenly over one of the end surfaces of a cylinder lateral surface heat insulated, keeping the temperature constant at the other end. Similarly, the possibility of using the above method for measuring the diffusivity and thermal conductivity ( $\alpha$ ,  $\chi$ ) fluid is analyzed and how it could be used to check the validity of the Hamilton and Crosser's model (HC) to the case of nano-fluids. It has been called nano-fluid, fluid anyone conventionally used for heat exchange, to which are added nano-particles in order to increase its thermal conductivity, thereby improving their ability to exchange heat.

**Keywords:** thermal conductivity, thermal diffusivity, heat conduction, Hamilton and Crosser model.

<sup>1,\*</sup>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador, Autor para correspondencia ✉: uronny2@yahoo.com

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo – México.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador

Recibido: 30-09-2016, aprobado tras revisión: 02-12-2016

Forma sugerida de citación: Hechavarría, R.; Delgado, O.; Pazmiño, F (2017). «Estudio de un nuevo procedimiento para medir la conductividad y difusividad térmicas de materiales». INGENIUS. N.º17, (Enero-Junio). pp. 15-22. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

En la actualidad se conocen varios métodos que permiten determinar la conductividad y difusividad térmicas de los materiales [1–8], [9–13]. Por eso, la elección correcta del método apropiado en cada situación particular es de gran importancia. Para hacerlo es necesario tomar en cuenta diversos factores.

1. Si no se requiere de una gran precisión, entonces son innecesarios los métodos muy sofisticados.
2. Los métodos estacionarios son mayormente de larga duración y por ello no son convenientes para medir un gran número de muestras.
3. Si no es posible preparar muestras de geometría definida, se deben preferir los métodos que empleen fuentes puntuales y lineales.

Todos los métodos utilizados para medir propiedades térmicas se pueden dividir en dos grupos fundamentales: *I*) los métodos que utilizan fuentes de calor y *II*) aquellos que prescinden de estas. En el último grupo la temperatura  $T$  del medio se modula por contacto con un intercambiador de calor infinito, mientras que en el primero la fuente de calor actúa en el interior de la muestra o en su superficie.

Los métodos que no utilizan fuentes de calor se pueden dividir a su vez en estacionarios y en no estacionarios. Por su parte, los métodos que usan fuentes de calor también se dividen en estacionarios y no estacionarios; pero, en este caso, otros factores de clasificación pasan a ser más importantes, a saber: *a*) la geometría de la fuente (puntual, lineal, superficial o volumétrica), *b*) la dependencia temporal de la fuente de potencia (régimen de pulso o continuo) y *c*) la configuración de la muestra que se mide (ejemplo, plano-paralela, cilíndrica o esférica). Puesto que, cada instalación experimental puede emplear varias combinaciones de los tres grupos *a*) – *c*) existe un gran número de modificaciones, cada una de las cuales requiere de su solución particular  $T(x, y, z, t)$  de la ecuación de difusión del calor [2], [17].

El presente trabajo tiene como objetivo, estudiar las posibilidades y limitaciones de un método no estacionario, que utiliza como fuente de calor la radiación luminosa. En este método, que es una nueva variante que se propone, la luz se hace incidir homogéneamente sobre una de las superficies extremas de un cilindro, que al estar al vacío no presentaría transferencia de calor por *convección*, igualmente la *radiación* es despreciable pues en el estado no estacionario la temperatura apenas varía; manteniéndose constante la temperatura en el otro extremo.

Existen varios modelos teóricos como el de Hamilton y Crosser (HC) que predicen el comportamiento de la conductividad térmica de los compuestos y mezclas

según varía la proporción de los componentes que lo forman [15]. Sin embargo, y a pesar de que estos han resistido satisfactoriamente múltiples comprobaciones experimentales, en los últimos años ha surgido una gran discusión en cuanto a la validez de los mismos cuando se trata de los nanofluidos [3, 7].

La polémica, aún no resuelta, sobre la validez o no del modelo de HC, así como de otros equivalentes [5], surge porque las mediciones de conductividad térmica que se han realizado sobre estos sistemas revelan valores que superan con creces los que predicen dichos modelos [4, 6]. Hasta el presente, existe un número insuficiente de datos experimentales y la gran mayoría de estos se han obtenido utilizando el único método, el método del alambre caliente [8, 12]. A su vez, otras mediciones realizadas que difieren en el método, arrojan resultados contradictorios con los reportados inicialmente [13].

En conclusión, se puede inferir que: o bien se necesita elaborar una nueva teoría o los valores de conductividad térmica que se reportan no reflejan la realidad. Esto último quizás como consecuencia de diversos factores que no se han tenido en cuenta en el momento de realizar e interpretar las mediciones.

## 2. Materiales y métodos

El método experimental que se propone consiste en lo siguiente (Figura 1a y 1b): Si el material a estudiar se trata de un sólido metálico homogéneo y transversalmente isótropo, entonces se debe preparar, con el mismo, una barra cilíndrica. Esta barra se coloca en el interior de una cámara de vacío con el propósito de impedir el intercambio de calor, por *conducción* y *convección*, a través de sus superficies frontal y lateral. La superficie trasera de la barra se fija a la pared de la cámara con la finalidad de que, en esa superficie, la temperatura se mantenga constante. Esto se lograría con una base grande preferiblemente de cobre.

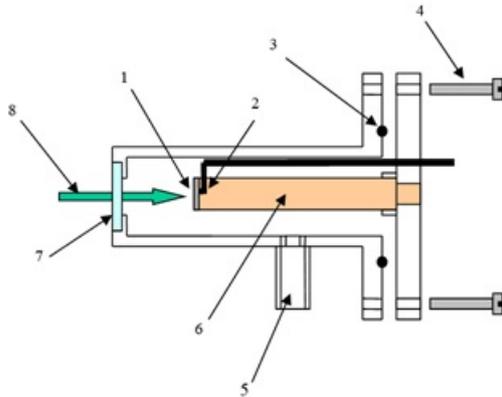
En caso de que la muestra se trate de un fluido, se debe preparar un recipiente cilíndrico, en cuyo extremo frontal y en contacto directo con la muestra se fija una lámina de aluminio u otro material sólido, buen conductor del calor, sobre la cual incidirá la luz.

El otro extremo de dicho recipiente se fijará, al igual que para el caso de muestras sólidas, a la pared de la cámara de vacío, que en este caso se le practicará una abertura para permitir la entrada del fluido.

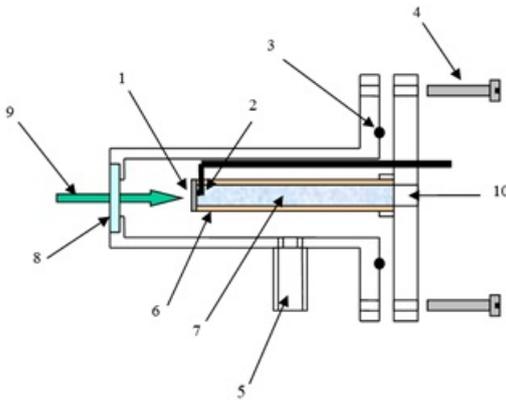
### 2.1. Modelo teórico

#### 2.1.1. Planteamiento del problema

El calor siempre se propaga desde las zonas que se encuentran a mayor temperatura a las zonas donde esta es menor. Se distinguen tres formas de propagación del calor: la *conducción*, la *convección* y la *radiación*.



**Figura 1a.** La figura representa un esquema del dispositivo que se propone para medir la conductividad y difusividad térmicas de sólidos. 1. Superficie frontal. 2. Termopar. 3. O-Ring. 4. Tornillos. 5. Entrada de vacío. 6. Muestra. 7. Ventana de vidrio. 8. Luz (no modulada).



**Figura 1b.** La figura representa un esquema del dispositivo que se propone para medir la conductividad y difusividad térmicas de fluidos. 1. Lámina de Al. 2. Termopar. 3. O-Ring. 4. Tornillos. 5. Entrada de vacío. 6. Portamuestra. 7. Muestra. 8. Ventana de vidrio. 9. Luz (no modulada). 10. Abertura para introducir la muestra.

Se toma como modelo (Figura 2), una barra sólida homogénea cilíndrica con una longitud  $l$  y área de su sección transversal  $A$ , por cuyas superficies frontal  $x = l$  y lateral es imposible intercambiar calor por conducción o convección, mientras que la superficie trasera  $x = 0$  se mantiene a una temperatura  $\Omega_0$  constante, la cual coincide con la temperatura inicial de toda la barra. Se supone que la fuente de calor de potencia  $q$ , está distribuida homogéneamente sobre la superficie frontal, encima de la cual incide la radiación luminosa; y que las pérdidas de calor por radiación son despreciables. En estas condiciones se puede considerar que estamos en presencia de un problema unidimensional y, por lo tanto, plantear la ecuación de difusión del calor en una sola dirección.



**Figura 2.** Barra sólida de forma cilíndrica con paredes laterales adiabáticas.

$$\frac{\partial \Omega(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \Omega(x, t)}{\partial x^2} + F(x, t) \quad (1)$$

En (1)  $\alpha$  es la difusividad térmica, que viene dada por  $\alpha = \frac{\chi}{\rho c}$ , donde  $\rho$  es la densidad,  $c$  el calor específico,  $F(x, t)$  tiene en cuenta las fuentes internas de calor y es igual a  $F(x, t) = \frac{Q(x, t)}{\rho c}$ , donde  $Q(x, t)$  es la densidad de fuentes internas de calor.

En este modelo no se contempla fuentes internas de calor, ya que el mismo se genera homogéneamente sobre la superficie. Por lo tanto, la ecuación (1) a resolver se reduce a:

$$\frac{\partial \Omega(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \Omega(x, t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

Cuyas condiciones iniciales y de fronteras son las siguientes:

$$\begin{aligned} \Omega(x, 0) &= \Omega_0 \\ \Omega(0, t) &= \Omega_0, \forall 0 < x < l, t > 0 \\ \frac{\partial \Omega(l, t)}{\partial x} &= Q \end{aligned} \quad (3)$$

donde:  $Q = \frac{q}{\chi A}$ , y  $q$  es el flujo de calor a través de la superficie frontal de la muestra, que se considera constante ( $q$  depende directamente de la intensidad de la luz proveniente de la fuente de iluminación),  $\chi$  es la conductividad térmica y  $A$ , el área de la sección transversal de la muestra. La solución de este problema se propone como:

$$\Omega(x, t) = \nu(x, t) + p(x) \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en la ecuación (2) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \nu(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \nu(x, t)}{\partial x^2} + \alpha \frac{d^2 p(x)}{dx^2} \quad (5)$$

Esta conduce a dos nuevas ecuaciones, la primera para  $p(x)$  y la segunda para  $\nu(x, t)$ .

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} = 0 \quad (6)$$

Con condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx}(l) &= Q \\ p(0) &= \Omega_0 \end{aligned} \quad (7)$$

La ecuación (6) es una ecuación diferencial ordinaria con coeficientes constantes, cuya solución se puede obtener en la forma:

$$p(x) = Q_x + \Omega_0 \quad (8)$$

Para  $\nu(x, t)$  se tiene:

$$\frac{\partial \nu(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \nu(x, t)}{\partial x^2} \quad (9)$$

Con condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} \nu(0, t) &= 0 \\ \frac{\partial \nu(l, t)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Por el método de separación de variables, en derivadas parciales, se busca la solución de esta ecuación en la forma:

$$\nu(x, t) = U(t) \cdot X(x) \neq 0 \quad (11)$$

$$\frac{dU(t)}{dt} + \alpha \lambda U(t) = 0 \quad (11.1)$$

La ecuación (11.1) es una ecuación diferencial ordinaria y su solución es:

$$U(t) = C \cdot e^{-\lambda \cdot \alpha \cdot t} \quad (11.2)$$

donde:  $C$  es una constante arbitraria. Para la parte espacial se obtiene:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \lambda X(x) = 0 \quad (11.3)$$

Cuyas condiciones iniciales y de frontera son:

$$\begin{aligned} X(0) &= 0 \\ \frac{dX}{dx}(l) &= 0, \quad \forall \quad 0 < x < l \\ X(x) &\neq 0 \end{aligned} \quad (11.4)$$

La solución general de este problema queda:

$$X(x) = D \operatorname{sen}(\sqrt{\lambda} x) + B \cos(\sqrt{\lambda} x) \quad (11.5)$$

Exigiendo que (11.5) cumpla con (11.4) tendremos,  $B = 0$  y los autovalores  $\lambda_n = \left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Por lo tanto, la solución de la ecuación (11.3) será:

$$X_n(x) = D \operatorname{sen} \left[ (2n+1) \frac{\pi}{2l} x \right] \quad (11.6)$$

donde:  $D$  es una constante arbitraria, de aquí que la solución general de la ecuación (9) sin considerar las condiciones iniciales pueda escribirse como:

$$\begin{aligned} \nu(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cdot e^{-\left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \alpha t} \\ &\quad \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

La constante  $C_n$  se determina imponiendo a la función (12) el cumplimiento de la condición inicial:

$$\begin{aligned} \nu(x, 0) &= \sum_{n=0}^{\infty} C_n \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \\ &= \Omega_0 - p(x) = \varphi(x) \end{aligned} \quad (13)$$

de donde queda:

$$C_n \equiv \varphi_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(\xi) \operatorname{sen} \left[ (2n+1) \frac{\pi \xi}{2l} \right] d\xi \quad (14)$$

Sustituyendo (14) en (12) obtenemos:

$$\begin{aligned} \nu(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(\xi) \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi \xi}{2l} \right] d\xi \\ &\quad \cdot e^{-\left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \alpha t} \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Introduciendo la notación:

$$\begin{aligned} G(x, \xi, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{l} \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi \xi}{2l} \right] \\ &\quad \cdot e^{-\left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \alpha t} \\ &\quad \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

La solución (15) toma forma:

$$\nu(x, t) = \int_0^l G(x, \xi, t) \cdot \varphi(\xi) d\xi \quad (17)$$

La función (16) es la función de Green del problema. Si integramos, queda:

$$\begin{aligned} \nu(x, t) &= \frac{-8lQ}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \cdot e^{-\left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \alpha t} \\ &\quad \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Teniendo en cuenta (4) se llega finalmente a:

$$\begin{aligned} \Omega(x, t) &= \Omega_0 + Qx - \frac{8lQ}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \\ &\quad \cdot e^{-\left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \alpha t} \\ &\quad \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

Esta expresión puede escribirse como:

$$T(x, t) = T_{es} \left\{ \frac{x}{l} - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \text{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \right\} \quad (20)$$

donde:

$$T_{es} = \frac{ql}{\chi A} \quad (21)$$

es la temperatura correspondiente al estado estacionario en la posición  $x = l$ , mientras que

$$\tau = \frac{1}{\left[ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \alpha} \quad (22)$$

es el tiempo durante el cual la temperatura  $T(x, t)$  alcanza el valor:

$$T(x, t) = T_{es} \left\{ \frac{x}{l} - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \cdot e^{-1} \cdot \text{sen} \left[ \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \right] \right\} \quad (23)$$

La expresión (20) representa el incremento de temperatura con relación a la temperatura inicial mientras se genera calor en la superficie de la muestra.

## 2.2. Aplicabilidad del modelo para fluidos

Si bien la ecuación de difusión del calor (1), en general, no es válida para el caso de fluidos, la misma puede aplicarse a estos, cuando sea despreciable el fenómeno de convección en el interior de ellos.

Por otra parte, los fluidos deben estar contenidos en algún recipiente, que en nuestro caso es el portamuestras. Esto provoca que los valores de difusividad y conductividad térmicas que aparecen en la expresión (20) y, que pueden ser medidos en el experimento, sean en realidad los valores efectivos del sistema compuesto por el portamuestras más el fluido. O sea, constituyen magnitudes que tienen en cuenta las características, tanto de uno como del otro.

Así, para la conductividad y difusividad térmicas efectivas, se tiene las expresiones siguientes [14], [18]:

$$\begin{aligned} \chi_{ef} &= \mu \cdot \chi_f + (1 - \mu) \cdot \chi_p \\ \alpha_{ef} &= \frac{\mu \cdot \chi_f + (1 - \mu) \cdot \chi_p}{\mu \cdot \rho c_f + (1 - \mu) \cdot \rho c_p} \end{aligned} \quad (24)$$

donde:  $\mu$  es la proporción de área de sección transversal que, aporta el portamuestras al sistema,  $\rho$  es la densidad de cada material y los subíndices  $f$  y  $p$  representan al fluido y al portamuestras respectivamente.

## 2.3. Variación temporal de la temperatura

La Figura 3 muestra gráficamente el comportamiento de la temperatura en la superficie frontal de una muestra líquida, como indica la figura 1b, de agua destilada. En este gráfico podemos observar, que mientras la luz incide sobre la muestra, la temperatura asciende hasta alcanzar un valor constante. A partir de ese momento, se entra en un régimen estacionario y la temperatura ya no aumenta, alcanzando el valor dado por (21); de ahí vemos que la temperatura de saturación  $T_{es}$  depende de la potencia de la fuente de calor en la superficie, la longitud de la muestra, el área de su sección transversal y de la conductividad térmica de la misma.

En la Figura 3 se observa que la temperatura de saturación de la muestra alcanza un valor de alrededor de 28 °C. En la práctica es necesario limitar el ascenso de la temperatura, pues por una parte las propiedades térmicas de la muestra variarían durante las mediciones; y por otra se harían importantes las pérdidas de calor por el mecanismo de radiación, lo cual implicaría que el comportamiento real del sistema no se corresponda con lo que predice el modelo teórico. Por este motivo, en dependencia de los valores de conductividad térmica de la muestra, es necesario elegir adecuadamente los valores de las otras tres magnitudes involucradas en la expresión (21).

Esta elección debe efectuarse teniendo en cuenta que el tiempo durante el cual se mide, debe ser suficiente como para obtener una cantidad de puntos experimentales que permita la posterior determinación de las magnitudes buscadas.

## 3. Resultados y discusión

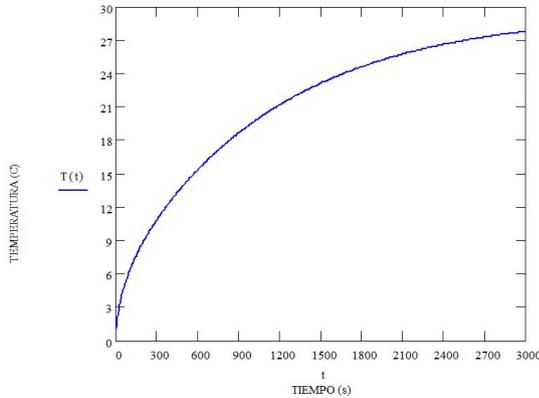
### 3.1. Resolución del método

En la Figura 4 se muestra, gráficamente, la diferencia de temperatura en función del tiempo  $\Delta T(t)$  cuando varía el valor de la conductividad térmica en un 5 %. Mientras que en la Figura 5 se muestra cómo varía la temperatura  $T(t)$  en función del tiempo para dos muestras cuyas conductividades térmicas se diferencian entre sí en un 5 %.

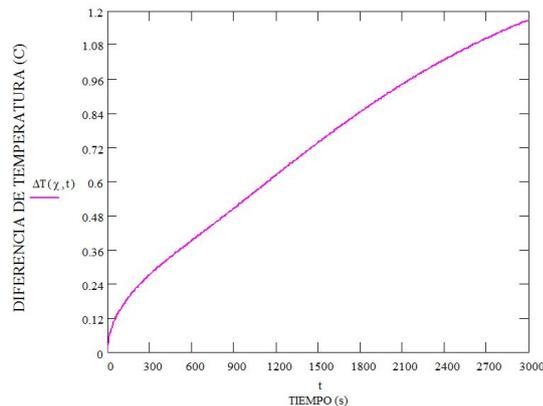
Para una variación determinada de la conductividad térmica, a mayor tiempo, mayores diferencias de temperaturas. O sea, la resolución del método se incrementa, por lo que será posible detectar menores diferencias de conductividad térmica utilizando un mismo sensor de temperatura.

Sin embargo, en dependencia del valor de la temperatura  $T_{es}$ , así será el tiempo durante el cual es posible medir, teniendo en cuenta que, la temperatura de la muestra, por las razones antes expuestas, no debe exceder en más de unos pocos grados (5 – 10 °C) a

la inicial y, por otra parte, se debe medir durante un tiempo superior al necesario para que la diferencia de temperatura supere aquella que es posible detectar con el sensor de temperatura disponible.



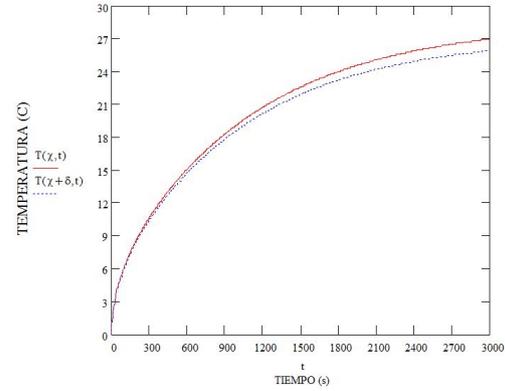
**Figura 3.** Dependencia temporal de la temperatura en la superficie frontal ( $x = l$ ), para valores de  $q = 0.1 \text{ W}$ ,  $l = 0.02 \text{ m}$ ,  $A = 1.131 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $\chi = 0.599 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha = 1.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  correspondientes a una muestra líquida de agua destilada.



**Figura 4.** Diferencia de temperatura en función del tiempo para valores de  $q = 0.1 \text{ W}$ ,  $l = 0.02 \text{ m}$ ,  $A = 1.131 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $\chi = 0.599 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha = 1.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , y diferencia en la conductividad térmica de un 5 % con respecto al valor de  $0.599 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ .

Por tanto, los límites del intervalo de tiempo útil para la medición, y con ello la resolución del método, están determinados, por la propia resolución del sensor de temperatura y por el valor de  $T_{es}$ .

De lo dicho se deduce que: la elección del sensor de temperatura, así como de las magnitudes que intervienen en la expresión (21) depende de las diferencias mínimas de conductividad o difusividad térmicas que se deseen detectar.



**Figura 5.** Dependencia temporal de la temperatura en la superficie frontal ( $x = l$ ) para dos muestras, cuyas conductividades térmicas se diferencian entre sí en un 5 %. Datos teóricos.

### 3.2. Modelo HC

El modelo de Hamilton y Crosser [15], al igual que el de Maxwell [16] y otros, predice los valores de conductividad térmica efectiva de un medio en cuyo seno se encuentran partículas diseminadas de manera aleatoria y homogénea, las cuales se encuentran suficientemente alejadas las unas de las otras, de manera que sea posible despreciar las interacciones entre ellas. Según este modelo, la conductividad térmica efectiva viene expresada por:

$$\chi_f = \chi_{fb} \left( \frac{\psi + (\nu - 1) - (\nu - 1) \cdot (1 - \psi) \cdot \lambda}{\psi + (\nu - 1) + (1 - \psi) \cdot \lambda} \right) \quad (25)$$

donde  $\psi = \frac{\chi_n}{\chi_{fb}}$ , es la relación entre las conductividades térmicas de las partículas y el medio respectivamente,  $\lambda$  es la fracción volumétrica que ocupan las partículas en el fluido,  $\nu$  es un factor de forma, que tiene en cuenta la geometría de las partículas. Los subíndices  $n$  y  $fb$  representan a las partículas y al medio respectivamente.

Teniendo en cuenta la expresión (25) y que la capacidad calorífica específica efectiva viene expresada por:

$$\rho c_f = (1 - \lambda) \cdot \rho c_{fb} + \lambda \cdot \rho c_n \quad (26)$$

Se obtiene para la difusividad térmica la siguiente relación:

$$\alpha_f = \frac{\chi_{fb} \left( \frac{\psi + (\nu - 1) - (\nu - 1) \cdot (1 - \psi) \cdot \lambda}{\psi + (\nu - 1) + (1 - \psi) \cdot \lambda} \right)}{(1 - \lambda) \cdot \rho c_{fb} + \lambda \cdot \rho c_n} \quad (27)$$

Si el medio en cuyo seno se encuentran las partículas es un fluido, entonces las expresiones para la conductividad y difusividad térmicas que aparecen en (20) serán las que siguen:

$$\chi_{ef} = \mu \cdot \chi_{fb} \left( \frac{\psi + (\nu - 1) - (\nu - 1) \cdot (1 - \psi) \cdot \lambda}{\psi + (\nu - 1) + (1 - \psi) \cdot \lambda} \right) + (1 - \mu) \cdot \chi_p \quad (28)$$

$$\alpha_{ef} = \frac{\mu \cdot \chi_{fb} \left( \frac{\psi + (\nu - 1) - (\nu - 1) \cdot (1 - \psi) \cdot \lambda}{\psi + (\nu - 1) + (1 - \psi) \cdot \lambda} \right) + (1 - \mu) \cdot \chi_p}{\mu \cdot [(\lambda - 1) \cdot \rho c_{fb} + \lambda \cdot \rho c_n] + (1 - \mu) \cdot \rho c_p} \quad (29)$$

donde el subíndice  $\rho$  representa el portamuestras. Las Figuras 6, 7, 8 y 9 muestran las variaciones relativas de la conductividad y difusividad térmicas en función de la fracción volumétrica según (28) y (29) respectivamente.

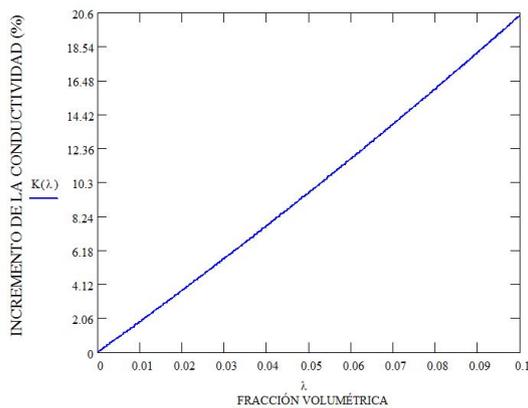


Figura 6. Incremento de la conductividad térmica vs. fracción volumétrica.

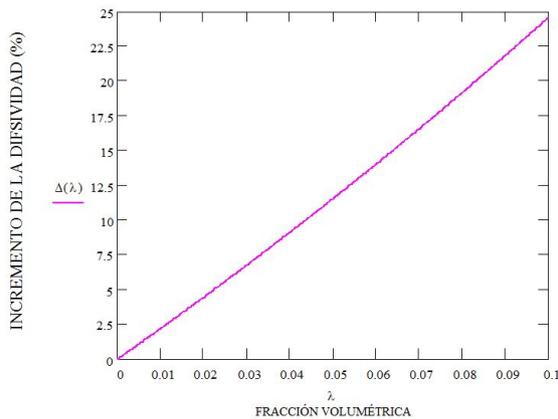


Figura 7. Incremento de la difusividad térmica vs. fracción volumétrica

En la Figura 8 se observa la diferencia de temperatura en función del tiempo  $\Delta T(t)$  cuando varía la fracción volumétrica de aluminio en agua en el 1 %, suponiendo que, tenemos en calidad de muestra, agua destilada con nanopartículas de aluminio inmersas en su interior, siendo el portamuestras de vidrio.

Para ellos los valores de conductividad térmica y capacidad calorífica específica son los siguientes:

$$\begin{aligned} \chi_n &= 211.015 W^\circ C^{-1} m^{-1}, \chi_{fb} = 0.599 W^\circ C^{-1} m^{-1}, \\ \chi_p &= 0.837 W^\circ C^{-1} m^{-1}, \rho_{cn} = 2.453 \times 10^6 J^\circ C^{-1} m^{-3}, \\ \rho c_{fb} &= 2.187 \times 10^6 J^\circ C^{-1} m^{-3}, \\ \rho c_p &= 1.998 \times 10^6 J^\circ C^{-1} m^{-3}. \end{aligned}$$

Por su parte la Figura 9 representa, para una muestra similar, el comportamiento de la temperatura a medida que transcurre el tiempo  $T(t)$ .

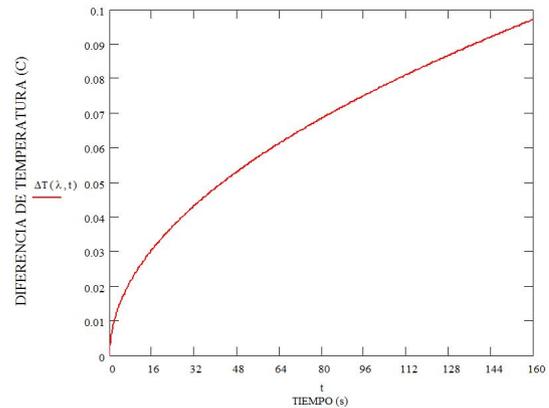


Figura 8. Diferencia de temperatura en función del tiempo, para un incremento de la fracción volumétrica en un 1 %.

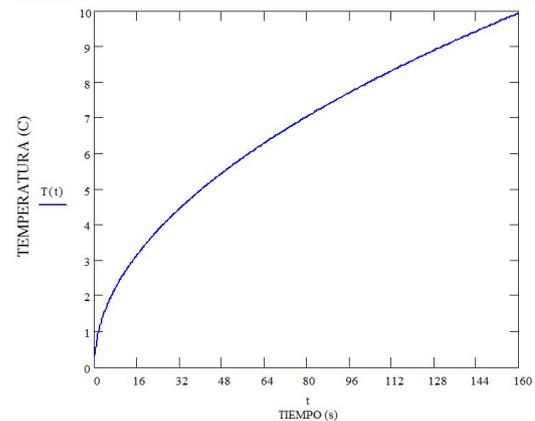


Figura 9. Temperatura en función del tiempo. Suponiendo que tenemos en calidad de muestra agua con partículas de aluminio inmersas en su interior y que el material del portamuestras es de vidrio.

Para comprobar la validez o no del modelo de **HC**, basta con medir los valores de difusividad térmica de varias muestras que se diferencien entre sí solamente en el valor de su fracción volumétrica y luego verificar que la expresión (29) se ajusta suficientemente bien a los puntos experimentales resultantes de las mediciones. Si se desea estudiar el comportamiento de un nanofluido, entonces se procede de la forma antes expuesta. Para realizar este tipo de estudio empleando el método que se propone, es necesario elegir el sensor de temperaturas adecuadamente, porque la resolución del

mismo debe estar en concordancia con las diferencias mínimas de conductividad o difusividad térmicas que se requieren detectar.

#### 4. Conclusiones

Se resolvió la ecuación de difusión del calor para las condiciones propias del método propuesto, obteniéndose una expresión a partir de la cual es posible determinar tanto los valores de conductividad como de difusividad térmicas. La elección del sensor de temperatura, así como de las magnitudes que intervienen en la expresión (21) depende de las diferencias mínimas entre conductividades y difusividades térmicas que se deseen detectar, como ilustran las Figuras 4 y 5. En este sentido, para realizar mediciones de corto tiempo (alrededor de 5 min) se necesita un sensor cuya precisión llegue hasta la centésima de grado, si fuese menos preciso habría que medir por más tiempo (aproximadamente una hora), esto aumentaría considerablemente la temperatura en la muestra, dando lugar al fenómeno de conducción del calor por *radiación*, lo cual no es deseado.

Para medir en materiales sólidos es necesario que estos puedan ser maquinados, de manera que sea posible preparar con ellos barras, cilíndricas o de otra geometría. El método permite comprobar el modelo de HC, siempre que se cuente con un medidor de temperaturas con una resolución tal que le permita diferenciar hasta la centésima de grado centígrado.

#### Referencias

- [1] J. N. Fox and R. H. McMaster, "Measurement of the thermal properties of a metal using a relaxation method," *American Journal of Physics*, vol. 43, pp. 1083–1086, 1975.
- [2] T. Ficker, "A non-stationary method for the measurement of the thermal conductivity of solids in student laboratories," *European Journal of Physics*, vol. 17, pp. 307–310, 1996.
- [3] D. H. Hurley, R. S. Schley, M. Khafizov, and B. L. Wendt, "Local measurement of thermal conductivity and diffusivity," *Review of Scientific Instruments*, 2015.
- [4] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Xhoi, and J. A. Eastman, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 855–863, 2002.
- [5] Q. Xue and W. M. Xu, "A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 90, pp. 298–301, 2005.
- [6] E. Gregorová, "The thermal conductivity of alumina-water nanofluids from the viewpoint of micromechanics," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 16, pp. 19–28, 2014.
- [7] L. Q. Yimin, Xuan, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 21, pp. 58 – 64, 2000.
- [8] S. A. Putnam, D. G. Cahill, P. V. Braun, Z. Ge, and R. G. Shimmin, "Thermal conductivity of nanoparticle suspensions," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, 2006.
- [9] J. A. Eastmaan, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Applied Physics Letters*, vol. 78, 2001.
- [10] S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions," vol. 79, 2008.
- [11] H. Xie, J. Wang, T. Xi, and Y. Liu, "Thermal conductivity of suspensions containing nanosized sic particles," *International Journal of Thermophysics*, vol. 23, pp. 571–580, 2002.
- [12] D. Klingenberg and D. Venerus, "Thermal conductivity measurements in nanofluids," in *Presentación de Curso*, U. States, Ed. American Institute of Chemical Engineers, 2006.
- [13] Z. Xing, G. Hua, and F. Motoo, "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles," *Journal of Applied Physics*, vol. 31, no. 6, pp. 593–599, 2007.
- [14] E. Marín, "Escuchando la luz: Breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico," in *Presentación de Curso, México, Ed. Seminario Repensar la Física, Instituto Politécnico Nacional*, 2016.
- [15] R. L. Hamilton and O. K. Crosser, "Thermal conductivity of theory of heterogeneous two-component system," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 1, pp. 187–191, 1962.
- [16] J. C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism," *Clarendon Press, Oxford, UK 2nd ed*, vol. 1, p. 435, 1881.
- [17] A. N. Tjonov and Samarsky, *Ecuaciones de la física matemática*, p. 824, 1972.
- [18] O. Delgado, "Contribución de la técnica fotoacústica a la caracterización térmica y óptica de materiales," Tesis Doctoral, Facultad de Física, Universidad de La Habana, La Habana, 2003.



# APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL ECUADOR

## ENERGY HARNESSING WAVE IN ECUADOR

Ronald Rodríguez-Santos<sup>1,\*</sup>, Manuel Chimbo-Campuzano<sup>2</sup>

### Resumen

Un problema en el Ecuador años atrás era la dependencia de energías fósiles no renovables como el petróleo, recurso que es agotable y su costo varía según la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Con el cambio de la matriz energética y la gran inversión de nuestro país en energías renovables, se ha logrado actualmente tener una producción de energía renovable correspondiente al 51,78 %, lo cual representa 13.638,89 (GWh), fuente tomada del ARCONEL (Agencia de regulación y control de Electricidad). Aprovechando los recursos naturales tales como hídricos, solares, eólicos entre otros, desechando en parte gran producción de energía contaminante. Otra energía alternativa no explotada y en la que nos vamos a enfocar en el ensayo es la energía undimotriz, que consiste en la energía que llevan las olas a lo largo de los océanos del mundo, esta energía se genera a partir de la acción del viento en la superficie del mar. Con los datos obtenidos del Inocar se realizaron los cálculos necesarios para obtener el potencial energético de nuestros mares. Alcanzando un potencial energético muy bueno como se detalla en el artículo.

**Palabras clave:** energía mecánica, energía undimotriz, energía eléctrica, energía renovable y olas ecuatorianas.

### Abstract

A problem in Ecuador years ago was dependence on energies fossils non-renewable as the petroleum. Resource that is exhaustible and its cost varies according to the OPEP (Organization of Petroleum Exporting Countries). With the change of the energy matrix and the great investment of our country in renewable energies, has been achieved at present have a production renewable energy corresponding to 51.78 %, which represents 13,638.89 (GWh), source taken from the ARCONEL (Agency of regulation and control of Electricity). Leveraging natural resources such as: hydric, solar, eolic, among others, discarding in part large production of polluting energy. Another unexploded alternative energy in which are going to focus in the test is the wave energy, which consists of the energy carried by the waves along the world's oceans; this energy is generated from the action of the wind on the surface of the sea. With the data obtained from INOCAR, were performed calculations required to obtain the energy potential of our seas. Reaching an energy potential very good as detailed in the article.

**Keywords:** Energy Mechanical, Energy Wave, Energy Electrical, Renewable Energy and Ecuadorian Waves.

<sup>1,\*</sup>Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca – Ecuador, Autor para correspondencia ✉: rrodriguezsl@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup>Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca – Ecuador.

Recibido: 29-09-2016, aprobado tras revisión: 16-12-2016

Forma sugerida de citación: Rodríguez, R.; Chimbo, M. (2017). «Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador». INGENIUS. N.º17, (Enero-Junio). pp. 23-28. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

La contaminación del medioambiente es sin lugar a duda el principal motivo por el cual obliga buscar mecanismos o métodos para la producción de energía eléctrica de una forma no agresiva para el medioambiente. Actualmente no existen suficientes estudios que indiquen cuáles son los potenciales energéticos que se puede aprovechar en el mar. Es por eso por lo que en el siguiente artículo se realizará un estudio del potencial energético de la energía undimotriz en el Ecuador [1,2].

En el transcurso de los años ha existido un gran interés en sistemas para aprovechar la energía undimotriz en el mundo. En el Ecuador aún no se ha aplicado a gran escala la generación de electricidad a través de este tipo de energía, debido a la falta de interés de las entidades públicas.

Para poder generar energía eléctrica a través del movimiento de las olas, se debe instrumentar estudios sobre los oleajes en las costas ecuatorianas; nos podemos ayudar con información de instituciones de control marítimo como el Instituto Geofísico de la Armada, Inocar, con esos datos obtenidos realizaremos los cálculos aproximados para obtener la energía, longitud de la ola y la potencia por metro de frente de ola de nuestros mares. Según lo calculado se analizará si es factible su implementación [1,2].

Con respecto a los estudios realizados se conoce que el oleaje que arriba a las costas del Ecuador tiene un promedio de olas de **2 m**, en profundidades de hasta **20 m** y de **2,5 m** en profundidades superiores, sin embargo, estos valores son solo referenciales. Pueden existir cambios de acuerdo con los fenómenos climáticos existentes en el país [1].

Las olas de los mares y océanos son un derivado terciario de la energía solar, pues la radiación solar incide sobre la superficie de la tierra y provoca un calentamiento desigual de la misma, produciendo en la atmósfera zonas con distinta presión. Esto produce desplazamientos de aire de uno a otro lugar, es decir, generando vientos [1].

Son estos vientos, los que al desplazarse sobre la superficie del mar llevan a cabo el rozamiento de las moléculas de aire con el agua, transfiriendo a esta parte de su energía y generando las olas, estas actúan como un acumulador de energía pues la almacenan y la transportan de un lugar a otro con poquísimas pérdidas, lo que da lugar a que la energía de las olas que se producen en cualquier parte del océano acabe en las costas, así el 0,3 % de la energía solar que llega a la superficie terrestre se transforma en energía undimotriz [1].

## 2. Características de la energía undimotriz

La energía undimotriz nos permite obtener energía eléctrica (electricidad) a partir de la energía mecánica generada por el movimiento o golpe de las olas. Es una de las energías renovables con más relevancia en los últimos años. Para generar energía eléctrica a través del movimiento de las olas, se tiene que realizar estudios acerca de los oleajes en la zona costera del país. Se deben establecer programas de monitoreo ubicados en áreas claves y de preferencia en 50 a 100 m de profundidad y alejados a unos *dos kilómetros* del perfil costanero ecuatoriano. El estudio se lo realizará en las costas del Ecuador, véase la Figura 1 [1–3].

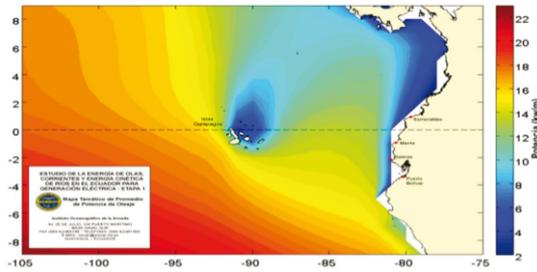
### 2.1. Mar ecuatoriano, potencial energético

El estudio sobre las características de las olas se fundamenta en la información adquirida de la base de datos disponibles del Inocar. En la Figura 2, se muestra el área correspondiente al perfil costanero donde se analiza la potencia en  $KW/m$  en el Ecuador. El Inocar es la entidad que realiza el registro del comportamiento del mar. Se aprecia un contenido energético del oleaje en el territorio ecuatoriano, el cual tiene un valor de  $14 KW/m$  promedio de potencia [3,4].



Figura 1. Zona costera del Ecuador. [3]

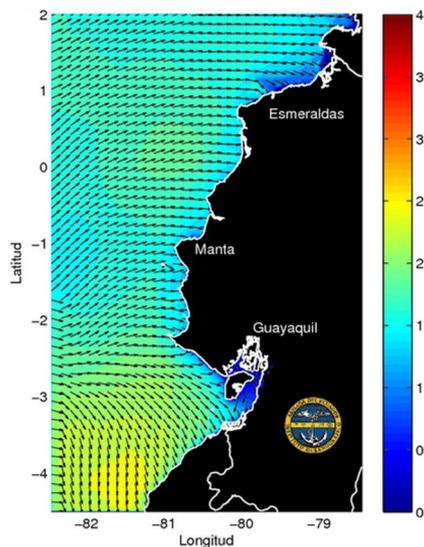
Las condiciones de las olas en aguas profundas a más de 2000 m se mantienen constantes. Para un análisis del potencial energético se debe averiguar la frecuencia y longitud de la ola en el mar. Para los sistemas de detección y monitoreo se emplean boyas. Esta boya se encuentra ubicada al suroeste de la ciudad de Esmeraldas para la detección de periodos de agujas. Según el último informe, las olas tienen una altura media de 1,5 a 2 m. Y el periodo de las olas está comprendido entre 12 a 15 s [3, 5, 9].



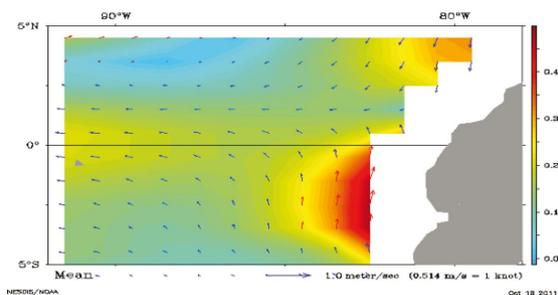
**Figura 2.** Área de estudios marinos para determinar el potencial energético. [3]

A continuación, en la Figura 3 se observa una grilla del Ecuador, donde se muestra en metros los oleajes en el perfil costanero.

En la Figura 4 se muestra las velocidades de las olas en la costa ecuatoriana que no superan el  $1 \text{ m/s}$ . A partir de la gráfica se llega a la conclusión de que las zonas con mayor velocidad están en las provincias del Guayas y El Oro con registros máximos de  $3 \text{ a } 4 \text{ m/s}$  [3].



**Figura 3.** Modelo de operación Inocar-SWAM altura de oleaje. [3]



**Figura 4.** Velocidades promedio de las olas en la costa ecuatoriana. [3]

## 2.2. Ventajas y desventajas de la energía undimotriz

### Ventajas

- Permite usos alternativos a la energía eléctrica, como la producción de hidrógeno o la obtención de agua potable del mar [6].
- Se trata de un recurso concentrado, predecible, cercano a grandes consumidores y de alta disponibilidad [6].
- Las olas pueden desplazarse durante largas distancias sin perder energía [6].
- Ofrece alta disponibilidad ya que es un recurso abundante y con flujos de energía elevados [6].
- Algunos dispositivos permiten el uso de generadores síncronos, que participarían en el control de la potencia reactiva de la red [6].
- El desarrollo de esta energía dará seguridad de suministro energético a regiones remotas, igual que ocurre con otras energías renovables [6].
- Se impulsará la diversificación de empleo y estimulará pymes e industrias en declive como las de construcción de barcos [6].
- Es una energía limpia, no emite gases contaminantes a la atmósfera [6].

### Desventajas

- Varios dispositivos han fracasado ante tormentas, pues la carga que debe soportar el dispositivo en las condiciones más adversas (por ejemplo huracanes) puede ser 100 veces mayor que su carga nominal. Asimismo, aunque las condiciones sean mejores, los dispositivos tienen que soportar la energía cinética de las olas ininterrumpidamente [6].
- Los dispositivos alejados de la costa tienen unos costes importantes, debidos no solo al mantenimiento y a la instalación, sino también al sistema de amarre, que debe ser revisado y sustituido cada poco tiempo, garantizando que ninguna pieza se pierda y quede a la deriva [6].
- La vegetación marina crece en todo lo que se instala en el mar [6].
- El efecto corrosivo del agua salada tiene consecuencias muy negativas en distintos materiales. Por ejemplo, provoca que el acero se oxide, que el cobre se disuelva y que el aluminio desaparezca [6].

- El diseño es complejo. Como afirma Creus Solé: «lo que se diseña en la bañera no funciona en el mar» [6].
- La irregularidad en la amplitud, en la fase y en la dirección de la ola (la potencia entrante es aleatoria) hace difícil que un dispositivo obtenga el máximo rendimiento en todo el intervalo de frecuencias de excitación [6].
- En general, la eficiencia de la conversión energética no es alta [6].
- El coste de la planta de conversión es muy alto. Pese a que el coste de la materia prima es nulo (no hay que olvidar que el fluido de trabajo es el agua o el aire), el coste de construcción, que implica los sistemas de anclaje, los cierres herméticos, los cojinetes, etc., es muy elevado [6].

Todas estas características parecen manifestar que el diseño de un dispositivo de energía undimotriz debe ser, desde el punto de vista de aprovechamiento energético, sofisticado y fiable y, por otro lado, económicamente viable; aunque como citaba el autor de Energy from Waves, David Michael Ross: «**La energía de las olas no fue diseñada para ahorrar dinero, sino para salvar el mundo**» [6].

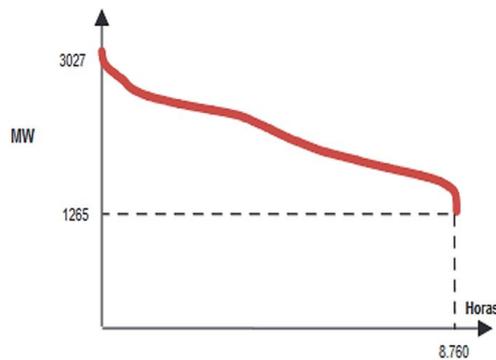


Figura 5. Demanda de energía eléctrica en el Ecuador. [12]

### 2.3. Potencial energético de la energía undimotriz en el Ecuador

Según la Unesco con un boletín emitido en el año 2009 la cantidad de energía undimotriz disponible en todo nuestro planeta está en el orden de los 200 GW [7]. El consumo de energía en nuestro país según el Arconel se muestra en la Figura 5. Se observa las demandas máximas que ocurren en las horas picos [12]. Haciendo un promedio de consumo mínimo y máximo obtenemos una demanda promedio de energía en nuestro país de 2146 MWh.

El mapa global de energía undimotriz en forma de potencia por unidad lineal se puede observar en la

Figura 6, apreciando que la potencia latente en nuestro litoral marítimo es aproximadamente de 20 KW por cada metro de ola.

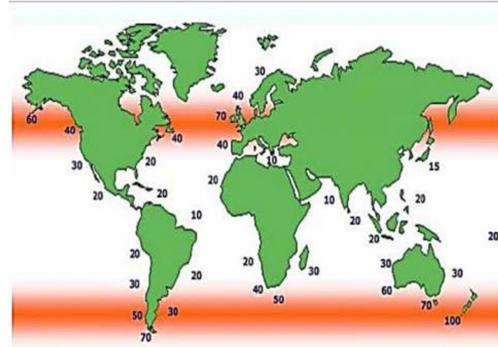


Figura 6. Niveles de energía de las olas en el mundo. [8]

El viento, al rozar con la superficie del mar, transmite su energía al agua y provoca movimientos circulares que se van desplazando. Existen dos maneras de extraer esta energía, través de la energía de las mareas (mareomotriz) y la energía de las olas (undimotriz) [8]. La ola del mar se puede considerar una onda sinusoidal como se puede observar en la Figura 7.

La energía cinética de esta ola con respecto a su nivel basal que es el punto más profundo en el que se percibe el movimiento de las olas [1–10]; está dada por la ecuación 1:

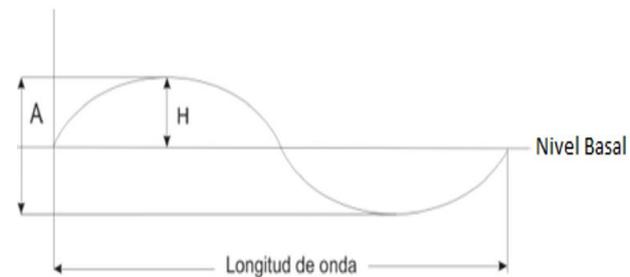


Figura 7. Parámetros de una ola sinusoidal. [11]

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde (m) es la masa de agua y (v) la velocidad de la ola, estas vienen dadas por las ecuaciones 2, 3.

$$m = \rho \times \frac{H}{2} \times \frac{\lambda}{2}b \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (3)$$

Para calcular la longitud de onda debemos aplicar la ecuación 4:

$$\lambda = \sqrt{gHT} \quad (4)$$

Donde

$\rho$  : Densidad de agua,  $\lambda$  : Longitud de onda,  
 $b$  : Ancho de frente de onda,  $A$  : Amplitud de onda,

$H$  : Altura de ola,  $g$  : Gravedad,  $T$  : Periodo.

Estos parámetros de mares ecuatorianos los conseguimos de la página web del Instituto Oceanográfico de la Armada, Inocar, para así poder calcular la cantidad de energía potencial y cinética por metro de frente de onda que produciría la ola ecuatoriana [5]. Tanto la altura de la ola ecuatoriana como los otros parámetros dependerán mucho de las estaciones climáticas, pero aproximadamente tienen una altura de 1,5 a 2 m; sacaremos un promedio de estas alturas para obtener una altura de 1,75 m, mientras que el periodo estará entre 12 y 18 s, haciendo el mismo procedimiento anterior conseguimos un periodo promedio de 15 s y la gravedad será 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Con estos parámetros podremos calcular la longitud de la onda utilizando la ecuación 4:

$$\lambda = \sqrt{1,75 \times 9,81 \times 15} = 62,15m \quad (5)$$

Con este valor utilizaremos la ecuación 3 para calcular la velocidad de la onda:

$$v = \sqrt{\frac{9,81 \times 62,15}{2\pi}} = 9,85 \frac{m}{s} \quad (6)$$

Ahora se calculará la masa del agua que depende de la densidad del agua, que es igual a 1027 kg/m<sup>3</sup> según el Instituto Nacional de Preinversión INP y el ancho de frente de onda (b) será de 1 m, a partir de estos datos se hará el cálculo de potencia por metro de frente de ola.

$$m = 1027 \times \frac{1,75}{2} \times \frac{62,15}{2} = 27870,6 \text{ kg} \quad (7)$$

Con los valores previamente calculados, se obtiene ahora el valor de la energía cinética de la ola ecuatoriana utilizando la ecuación 1:

$$E_c = \frac{1}{2} \times 27870,6 \text{ kg} \times \left(9,85 \frac{m}{s}\right)^2 = 1,354 \text{ MJ} \quad (8)$$

Para la potencia por metro de frente de ola se calcula utilizando la ecuación 9.

$$P = \frac{E_c}{T} \quad (9)$$

$$P = \frac{1,254 \text{ MJ}}{15 \text{ seg}} = 90,311 \frac{kW}{\text{mt de frente de ola}} \quad (10)$$

### 3. Sistemas de extracción de la energía undimotriz

A partir de los resultados obtenidos de la potencia que ofrece en las costas ecuatorianas se plantean los

siguientes generadores para poder captar esa energía y convertirla en energía eléctrica. La tecnología para poner en funcionamiento sistemas de extracción de energía undimotriz es costosa debido que para instalar los generadores y equipos se deben hacer a gran distancia con respecto a la costa. Además, la construcción de los equipos deben ser materiales lo bastante resistentes y anticorrosivos para el agua salada. Pero a partir de nuestro análisis de la potencia del golpe de ola vemos que estos generadores son muy grandes para nuestra costa por lo que se plantea un nuevo generador, pero quedaría para futuros análisis.

#### 3.1. Generadores empleados para obtener energía eléctrica

**OPT (Ocean Power Technologies):** La instalación de la planta tiene lugar en Escocia, España, Santander. Tiene una potencia de generación de 150 KW. El funcionamiento de esta planta undimotriz es a través de sistemas hidráulicos, turbinas hidráulicas, véase la Figura 8 [7].

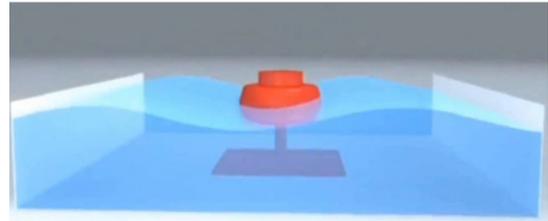


Figura 8. Planta undimotriz OPT. [7]

**MUTRIKU Sistemas de columna de agua oscilante OWS:** Su implementación se la realizó en España, en la región vasca con fecha de inicio el 8 de julio de 2011. Tiene una potencia de generación de 269 KW. El funcionamiento de esta planta undimotriz es a través de una cámara la cual genera aire a presión y produce movimiento de turbinas. Puede abastecer a 120 familias. El costo de estas plantas undimotrices es de 6,7 MM, véase la Figura 9 [7].

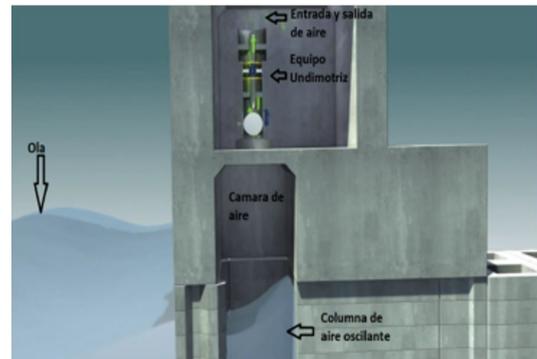


Figura 9. Sistemas de columna de agua oscilante. [7]

**PELAMIS:** La instalación de la planta tiene lugar en Portugal. Tiene una potencia de generación

de 750 KW. El funcionamiento de esta planta undimotriz es a través de unas boyas en cadena. La transformación a través de un sistema hidráulico, es decir, un movimiento de turbinas hidráulicas, véase la Figura 10 [7].

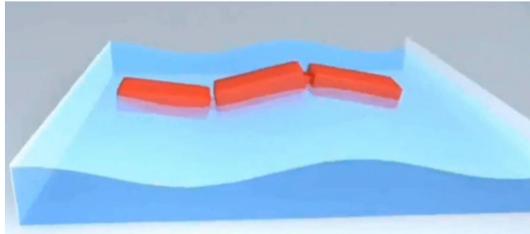


Figura 10. Planta undimotriz PELAMIS. [7]

#### 4. Conclusiones

Según los estudios y cálculos realizados sobre el potencial energético del mar ecuatoriano, se llegó a la conclusión que tiene un gran potencial. Se tendría que realizar un estudio de mercado y analizar su costo beneficio para conocer si es conveniente o no su aplicación. Según los cálculos realizados la potencia por metro de frente de ola promedio en el Ecuador es 90,31 KW, aunque esta distribución dista mucho de ser igualitaria, ya que las costas existentes en el Ecuador tienden a tener diferentes potenciales. Aun así se puede concluir que es un potencial bastante bueno. Según el español Víctor Comas, los países con mayor potencial en sus mares son Australia y Nueva Zelanda, alcanzando muchas veces potenciales en sus mares que alcanza los 100 KW por metro de frente de ola. Es por eso por lo que se puede decir que nuestro país tiene un excelente potencial de ola.

Existen diferentes tecnologías para extraer la energía undimotriz y convertirla en eléctrica. Se debe considerar qué convertidor es conveniente a partir de los datos obtenidos, analizando sus ventajas y desventajas.

Uno de los factores negativos es el costo de instalación de una planta undimotriz, ya que para la fabricación de esta planta se tendría que utilizar materiales que soporten el efecto corrosivo del agua salada y vegetación marina sabiendo que estos materiales son más costosos que los usados generalmente.

A pesar de los costos elevados de su implementación, creemos que sería muy importante su aplicación. En nuestras mentes está la frase de David Michael Ross que nos dice: «la energía de las olas no fue diseñada para ahorrar dinero, sino para salvar al mundo».

#### Referencias

[1] R. Calero Mendoza and D. Viteri Rivera, “Energía undimotriz alternativa para la producción de

energía eléctrica en la Provincia de Santa Elena.” Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) Campus la Libertad, 2015.

- [2] P. Roldán Chiriboga, “Evaluación de las energías renovables no convencionales factibles de desarrollarse en el Ecuador.” Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [3] Instituto Nacional de Preinversión, INP, “Estudio de la energía de las olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador,” 2013.
- [4] LATIn. (2014) Introducción al estudio de fuentes renovables de energía. [Online]. Available: <http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/prologo-e-introduccion/>
- [5] Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, INOCAR. (2005) Condiciones de olas y aguajes. [Online]. Available: <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/boletines/oleajeyaguaje/568condiciones-de-olas-y-aguaje-del-8-al-11-de-abril-2016>.
- [6] J. Fernández Chozas, “Energía undimotriz: Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad,” *Lambert Academic Publishing*, 2012.
- [7] M. Pelissero, P. A. Haim, G. Oliveto, F. Galia, and R. Tula, “Aprovechamiento de la energía undimotriz.” Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Buenos Aires., 2011.
- [8] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Water*, N. York, Ed. Cambridge University Press, 2007.
- [9] Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (INOCAR). (2001) Informe técnico de tsunami. [Online]. Available: <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/tabla-de-mareas/36-informes-tecnicos>.
- [10] C. Pastén, “Chile, energía y desarrollo,” *Obras y proyectos, Scielo, Chile*, pp. 28–39, 2012.
- [11] R. Zalba. (2013) Consultoría y educación (las olas). [Online]. Available: <http://ceambientalblog.blogspot.com/2013/08/las-olas>. Html.
- [12] ARCONEL. (2013) Plan maestro de electrificación 2013 – 2022. [Online]. Available: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol4-Aspectos-de-sustentabilidad-y-sostenibilidad-social-y-ambiental.pdf>



# OPERACIÓN REMOTA DE UN ROBOT MÓVIL USANDO UN TELÉFONO INTELIGENTE

## REMOTE OPERATION OF A MOBILE ROBOT USING A SMARTPHONE

Carlos Flores-Vázquez<sup>1,\*</sup>, Fco. Abiud Rojas de Silva G<sup>2</sup>, Karla A. Trejo Ramírez<sup>2</sup>

### Resumen

En este artículo se presenta un acercamiento al mando a distancia de un robot móvil que emplea un teléfono inteligente para comandarlo. La idea principal es recolectar los datos generados por el acelerómetro incluido en el teléfono inteligente. Los datos son los resultados de mover el teléfono en la dirección de los ejes Y y Z. Tales datos serán usados para entrenar dos redes neuronales que definirán la dirección del movimiento del robot móvil. Las salidas obtenidas de las redes neuronales serán procesadas para calcular y trazar la trayectoria, que es determinada por el modelo cinemático para un robot móvil tipo triciclo.

**Palabras clave:** sistemas remotos, redes neuronales, robot móvil, teléfono inteligente, acelerómetro.

### Abstract

This paper presents an approach to remote control a robot using smartphone. The main idea is to collect data generated by the accelerometer sensor included in the smartphone. The data are the results of moving the smartphone in direction of the axis Y and Z. Such data will be used for training two neural networks that will define the direction of the movement of the mobile robot. The outputs obtained from the neural networks will be processed to compute and plot the trajectory, which is determined by the kinematic model for a tricycle mobile robot.

**Keywords:** Remote System, Neural Network, Mobile Robot, Smartphone, Accelerometer.

---

<sup>1,\*</sup>Unidad Académica de Ingeniería Industria y Construcción, Universidad Católica de Cuenca – Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: cfloresv@ucacue.edu.ec

<sup>2</sup>Escuela de Doctorado en Automática, Robótica y Visión, Universidad Politécnica de Cataluña – España.

Recibido: 30-09-2016, aprobado tras revisión: 16-12-2016

Forma sugerida de citación: Flores, C.; Rojas, F.; Trejo, K. (2017). «Operación remota de un robot móvil usando un teléfono inteligente». INGENIUS. N.º 17, (Enero-Junio). pp. 29-35. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

La operación remota ha sido desarrollada durante muchos años y ha conducido a diversos usos prácticos de interacción del usuario con el entorno. El concepto de sistema remoto será abordado como un sistema para manipular y controlar un robot que requiere un operador humano a distancia. Esto implica la disponibilidad de interfaz de hombre-máquina [1].

Su función principal es brindar al operador la capacidad de realizar tareas complejas en entornos peligrosos y menos estructurados, por esta razón es necesario aplicar una concepción del sistema que permita la interacción con el entorno. La Figura 1 muestra una generalización de este sistema [2].

Debido a la reducción de costos en la tecnología de dispositivos móviles, se consideró conveniente aprovechar su *hardware* para desarrollar esta propuesta. En el presente artículo se presenta una aplicación de un sistema remoto para un robot móvil empleando un teléfono inteligente como mando a distancia.



Figura 1. Sistema remoto. [1]

## 2. Estado del arte

Durante las dos décadas pasadas diversos sistemas remotos han sido desarrollados usando varios medios de transmisión de datos, algunos de ellos están basados en protocolos de Internet. Empleando un navegador web, un operador a distancia es capaz de controlar un robot móvil, un mapa es generado y visualizado en pantalla para la navegación, simulando el entorno real [3]. Esta clase de sistema por lo general se usa para apoyar operaciones subterráneas, situaciones de rescate en desastres, entre otras. Sin embargo, el empleo de Internet puede ser una restricción en ciertas áreas donde no se encuentra disponible; adicionalmente, los retardos en la transmisión son la principal desventaja de esta clase de sistemas.

Tomando esto en consideración, otros sistemas han sido desarrollados para mejorar esta desventaja que usa estructuras complejas de control para compensar los retardos de tiempo distancia [3]. Como alternativa para lugares donde no exista servicio de Internet, Kimitsuka, Susuki y Sawai han desarrollado un sistema remoto aprovechando una red inalámbrica de sensores (WSN), [4]. Sistemas recientes de teleoperación emplean interfaces de usuario convencionales como

teclados, palancas de mando, controles para juegos, etc. [2]. Actualmente, muchas investigaciones trabajan con dispositivos comerciales, teléfonos inteligentes como mando a distancia para actividades de control, visualización y vigilancia. [5].

Un número importante de investigaciones en el desarrollo de sistemas remotos usan dispositivos de interfaz humana (*HID*) como el ratón, el teclado, palancas de mando o pantallas táctiles, para mejorar la experiencia de interacción, considerando la destreza y ergonomía de la anatomía humana. Recientemente dispositivos de sinestesia (*Haptic*), el procesamiento de videos y dispositivos de reconocimiento gestual se hacen más comunes, cambiando la interacción con ordenadores, teléfonos móviles y videojuegos. [2].

Los últimos teléfonos inteligentes ofrecen mayores capacidades multimedia, sensores (acelerómetros), comunicación (*Bluetooth*, *Wifi*, *GPRS/UMTS*), ubicación (*GPS*) y facilidad de programación por lo cual son actualmente los mejores candidatos para servir de interfaz entre las personas y su entorno [6].

Las capacidades tecnológicas de los teléfonos inteligentes han generado el interés para investigar fenómenos físicos como caídas [7] o el caminar humano [8,9]. La Figura 2 ilustra la secuencia para obtener señales de verificación e identificación del caminar usando el acelerómetro [10]. Esta estructura fue usada para la obtención de señales en nuestra propuesta.

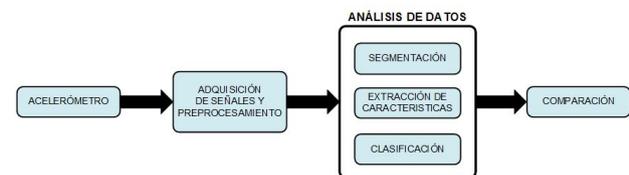


Figura 2. Procesamiento de señal para la identificación y verificación del caminar humano.

## 3. Metodología propuesta

Esta propuesta presenta el diseño e implementación de un sistema remoto para un robot móvil, controlando su trayectoria mediante un teléfono inteligente: La selección del teléfono inteligente como mando a distancia se debe a su disponibilidad, la alta aceptación social, el manejo intuitivo y el costo. Las órdenes de giro y desplazamiento del robot móvil se realizan mediante el movimiento del dispositivo.

Las señales obtenidas por los sensores del teléfono inteligente, serán procesadas usando un algoritmo de reconocimiento de patrones, la trayectoria resultante se puede visualizar en el ordenador. Este algoritmo será responsable de clasificar los movimientos que el robot móvil debería realizar: aceleración (+), aceleración (-), giro a la derecha, giro a la izquierda, según los

movimientos correspondientes hechos con el teléfono inteligente. Por esta razón, hemos puesto en práctica dos redes neuronales. Para desarrollar la generación de trayectorias del sistema remoto se procedió de la siguiente forma:

1. Selección de una aplicación móvil (App) para adquisición de datos.
2. Adquisición de datos y registro de estos.
3. Creación de una red neuronal.
4. Entrenamiento y simulación de la red neuronal.

El primer paso para desarrollar este proyecto fue definir la App que permita extraer los datos del acelerómetro. Después del análisis de varias App como *Wireless IMU*, *SensorUdp*, *iSeismo*, entre otras, que transmiten las mediciones de los sensores internos del teléfono inteligente. La selección fue *MlconnectApp*, que permite capturar los datos generados en el teléfono por el programa *Matlab* instalado en un ordenador [11], realizando una adquisición fácil y directa de los datos tratados. Las transmisiones usan protocolo *UDP* que cumple con las necesidades de velocidad para este sistema.

### 3.1. Adquisición de datos

Para la adquisición de las señales en los sensores es necesario definir ejes de referencia en la estructura física del teléfono, como se observa en la Figura 3. El eje Z es asignado a los movimientos de aceleración (+Z aceleración (+), -Z aceleración (-)); el eje Y corresponde a los giros (+Y giro a la izquierda, -Y giro a la derecha).



Figura 3. Ejes asignados en el teléfono inteligente.

El equipamiento tecnológico usado consiste de un teléfono inteligente *Sony Xperia* tipo, con sistema *Android*, en él se instaló la App *MLConnect* versión libre que obtiene las señales de sensor de aceleración. Los datos son capturados en tiempo real y convertidos en una matriz. Esta matriz almacenada en *Matlab* usa

datos en el rango desde 10 a -10 con cuatro decimales de precisión.

Eje Z: Tres registros de datos fueron generados con 1000 datos de entrada a los cuales se asignaron los objetivos correspondientes a los movimientos descritos considerando su rango de operación como se observa en la Tabla 1.

Los movimientos posibles en el eje Z se detallan a continuación:

- a) Inactivo: El estado donde el teléfono se encuentra en una posición neutral, lo cual implica una postura natural del operador para sostener el teléfono.
- b) Aceleración (+): Implica la orden de realizar el movimiento para desplazamiento frontal del robot.
- c) Aceleración (-): Posee dos interpretaciones, la primera si el robot se encuentra en movimiento frenar, la segunda orden si el robot se encuentra estático la dirección para desplazamiento del robot es en retroceso.

Eje Y: De similar forma al eje Z, tres registros de datos fueron generados con 1000 datos de entrada a los cuales se asignaron los objetivos correspondientes a los movimientos descritos considerando su rango de operación como se observa en la Tabla 2.

Los movimientos posibles en el eje Y se detallan a continuación:

- a) Inactivo: Permite mantener la dirección recta, se realiza cuando no existe una inclinación evidente del teléfono a un costado.
- b) Giro a la derecha: Es ejecutado cuando el teléfono se encuentra notablemente inclinado al costado derecho del operador. La inclinación del teléfono se realiza en forma natural.

Tabla 1. Objetivos y rango de operación del eje Z.

MOVIMIENTO	Eje Z			
	Rango datos de ingreso	Objetivos		
Inactivo	2 a 6	0	1	0
Aceleración (+)	6 a 10	1	0	0
Aceleración (-)	-10 a 2	0	0	1

Tabla 2. Objetivos y rango de operación del eje Y.

MOVIMIENTO	Eje Y			
	Rango datos de ingreso	Objetivos		
Inactivo	-2 a 2	0	1	0
Aceleración (+)	-2 a -10	0	0	1
Aceleración (-)	2 a 10	1	0	0

- c) Giro a la izquierda: Es ejecutado cuando el teléfono se encuentra notablemente inclinado al costado izquierdo del operador.

Como se evidencia en la Tabla 1, los rangos de los datos de ingreso para el eje  $Z$  no son simétricos debido al hecho que cuando el usuario sostiene el teléfono de modo vertical, este no se posiciona perpendicular con respecto al plano  $Y$ .

Para realizar esta adquisición de datos, se modificó el código original del programa sobre *Matlab*, para obtener los datos de cada eje de forma independiente con el fin de procesarlos posteriormente. En este punto, dos redes neuronales fueron implantadas: la primera solo para reconocer los datos de desplazamiento (con tres neuronas sobre la capa oculta) y la segunda para los datos correspondientes a movimientos de giro (dos neuronas sobre su capa oculta), el tipo de red implementada se detalla más adelante.

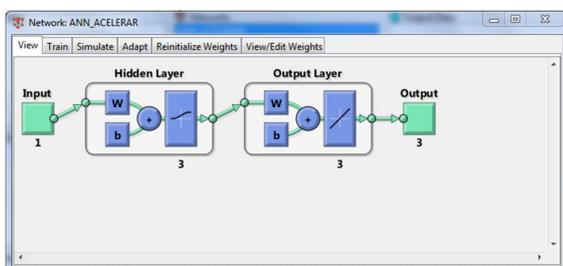
Como se evidencia en las Tablas 1 y 2, tendremos un conjunto de datos de entrada para cada red y tres objetivos de salida.

### 3.2. Generación de la red neuronal

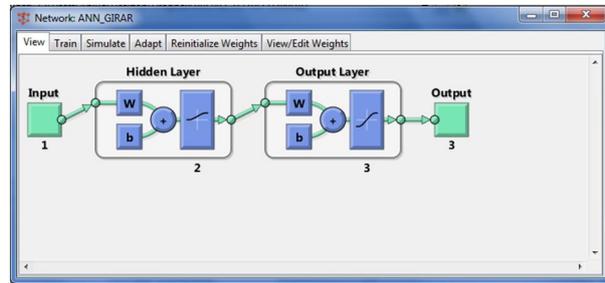
Para el diseño e implementación de las redes neuronales un análisis de varios tipos de redes existentes fue realizado con el fin de seleccionar las mejores características para este proyecto. Por consiguiente, de este análisis, se define la arquitectura para las redes neuronales a ser aplicadas.

**Tabla 3.** Resumen de características de las redes neuronales implementadas.

CARACTERÍSTICAS FUNCIÓN	RED NEURONAL 1 DESPLAZAMIENTO	RED NEURONAL 2 GIROS
Número de ingresos	1	1
Número de capas ocultas	1	1
Número de salidas	3	3
Número de neuronas	3	2
Función de transferencia de las capas ocultas	Logsig	Logsig
Función de transferencia de las capas de salida	Purelin	Tansig



**Figura 4.** Red neuronal para el desplazamiento.

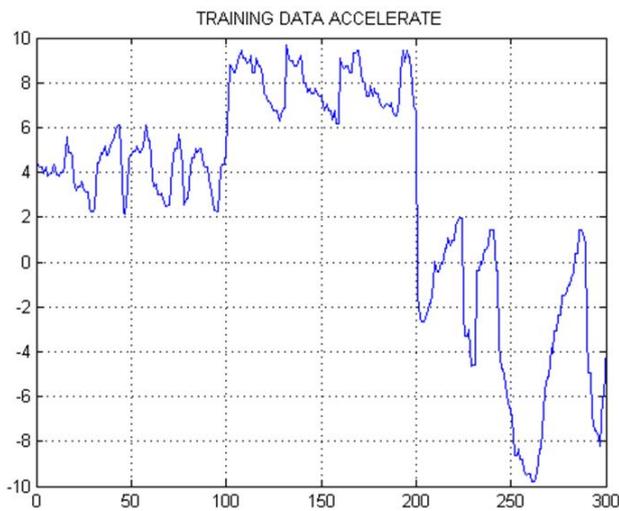


**Figura 5.** Red neuronal para los giros.

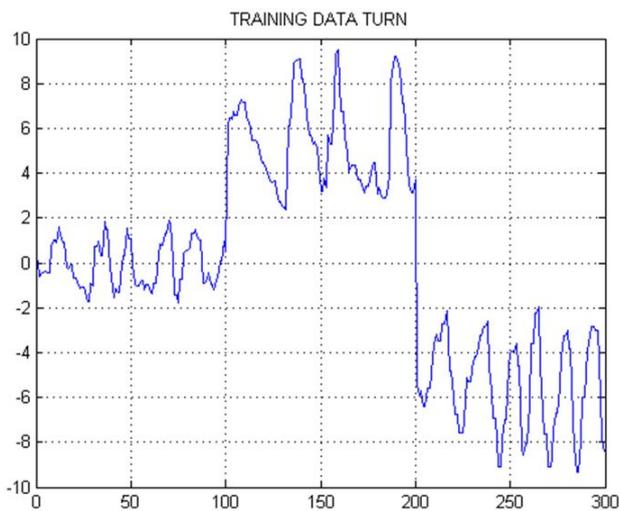
- Se escogió una red supervisada (*Supervised Networks*) la cual puede ser entrenada para producir salidas predefinidas por el usuario y es adecuada para clasificación de datos que contienen ruido.
- De los diferentes tipos de redes supervisadas se seleccionó la red *Feedforward* y de entre su clasificación la red *Backpropagation*. [12].
- Para la función de entrenamiento de la red se escogió *TRAINLM Levenberg – Marquardt* por ser generalmente la más rápida con la selección previa de red *Backpropagation*.
- La función de aprendizaje *LEARNGDM* que emplea gradiente descendente, para la ejecución se aplica el error cuadrático medio (*MSE*).
- Las funciones de transferencia deben ser continuas. Por esta razón sobre la base de [13] se escogió para la capa oculta *Logsig* como función de transferencia y *Pureline* y *Tansig* para las capas de salida.

Basado en las características descritas, dos redes neuronales fueron diseñadas para controlar el desplazamiento (eje  $Z$ ) y los giros (eje  $Y$ ) del robot móvil usando el *Neural Toolbox* de *Matlab*. Los resultados son mostrados en la Tabla 3 y las Figuras 4 y 5.

De los 6000 datos adquiridos con sus respectivas etiquetas, se decide utilizar solo 600 para realizar el entrenamiento de las redes neuronales y 120 de ellos sin etiquetar para la simulación. Las Figuras 6, 7, 8, 9 muestran las gráficas de los datos usados. Se necesitó un intervalo de tiempo igual a 300 segundos para la adquisición de datos en la función de desplazamiento, en cuanto a la función de giros el intervalo de tiempo fue menor es decir 60 segundos. Esta diferencia de tiempo se debe a la variación de los datos cuando se realizaba la posición correspondiente al desplazamiento con el teléfono inteligente.



**Figura 6.** Datos para entrenamiento de la red neuronal de desplazamiento. Eje horizontal corresponde al tiempo de captura en segundos, el eje vertical corresponde al valor de los datos del acelerómetro.



**Figura 7.** Datos para entrenamiento de la red neuronal de giros. Eje horizontal corresponde al tiempo de captura en segundos, el eje vertical corresponde al valor de los datos del acelerómetro.

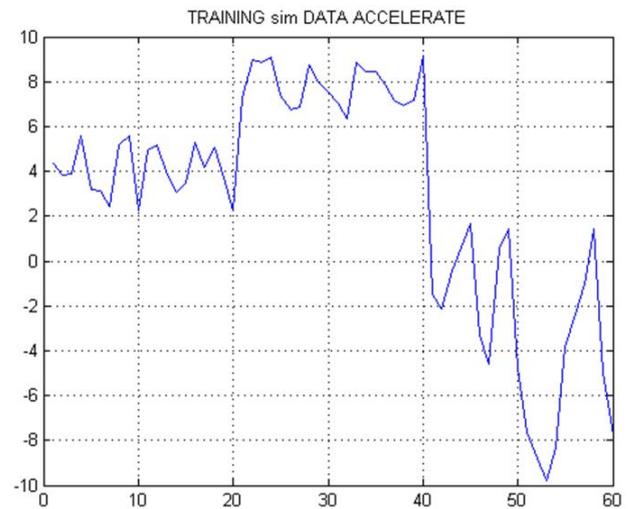
### 3.3. Implementación

Una vez que las redes fueron entrenadas, simuladas para verificar que los datos eran suficientes y la operación de las redes era apropiada, se incluyó en el programa de adquisición de datos las redes neuronales de desplazamiento y giros.

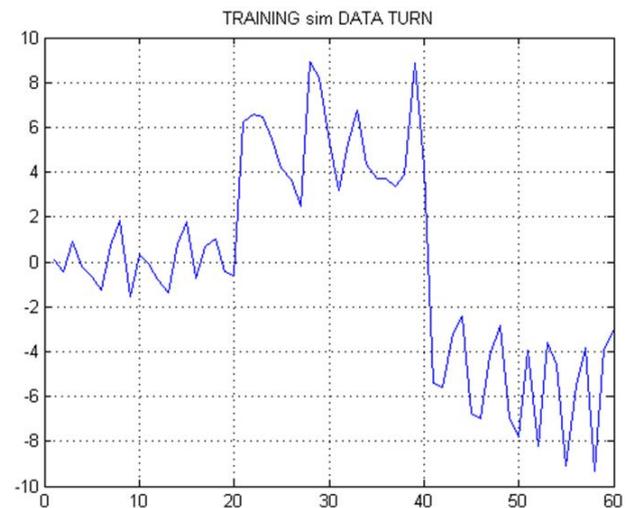
Para aplicar las redes neuronales creadas, antes de controlar la trayectoria de un robot móvil las actividades siguientes fueron realizadas:

1. Inclusión de las redes neuronales en el programa de adquisición de datos sobre *Matlab*.

2. Establecer una ecuación para calcular la trayectoria de un robot móvil.
3. Pruebas y resultados.



**Figura 8.** Datos para simulación de la red neuronal de desplazamiento. Eje horizontal corresponde al tiempo de captura en segundos, el eje vertical corresponde al valor de los datos del acelerómetro.



**Figura 9.** Datos para simulación de la red neuronal de giros. Eje horizontal corresponde al tiempo de captura en segundos, el eje vertical corresponde al valor de los datos del acelerómetro.

Para la inclusión de las redes neuronales, era necesario modificar una vez más el código original de *MLCONNECT* para adquisición de datos. Las modificaciones realizadas se describen a continuación:

1. Declaración de dos matrices de datos para almacenamiento de las salidas de redes neuronales (desplazamiento y giros).

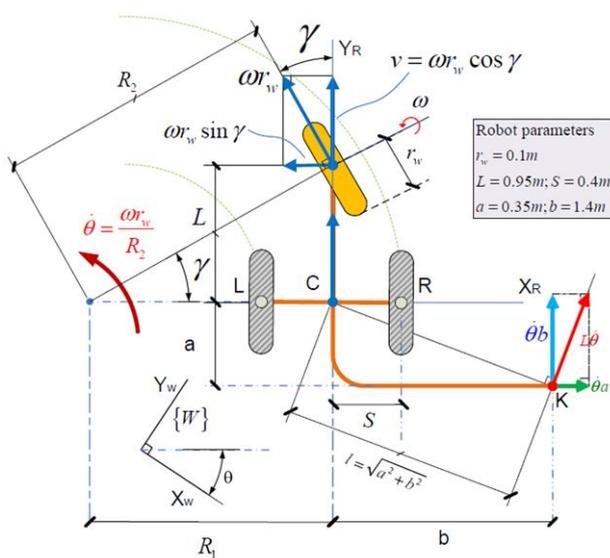
2. Declaración de dos variables, la primera corresponde a la aceleración ( $\text{rad/s}^2$ ) y la segunda es el ángulo de giro ( $\text{rad}$ ).
3. Inclusión del código de redes neuronales al programa.
4. Cálculo de aceleración y ángulo de giro basada en los datos de salida de las redes neuronales.
5. Asignación de límites para aceleración y ángulo de giro, según la configuración física del robot móvil.
6. Cálculo y trazado de la trayectoria (FCAC).

La función de FCAC fue creada para calcular y trazar trayectorias basándose en el modelo de cinemática avanzado para un robot de móvil tipo triciclo. En esta función se especifica la correspondencia de nuestra aceleración y ángulo de giro:

$$\text{aceleración} = \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\text{ángulo de giro} = \gamma \quad (2)$$

La Figura 10 muestra el esquema representativo del robot móvil y sus parámetros calculados para trazar las trayectorias. El detalle completo de la interpretación física y la derivación de las fórmulas fue propuesto por el Dr. Antonio Benito Martínez Velasco.



**Figura 10.** Modelo cinemático directo de un robot móvil tipo triciclo.

## 4. Resultados

El funcionamiento de cada red neuronal puede ser analizado considerando su matriz de confusión Figura 11. Como se evidencia en la matriz de confusión del desplazamiento, todos los elementos fueron clasificados sobre la clase correcta, obteniendo el 100 % de funcionamiento. Además, el funcionamiento de la red neuronal para los giros es el 99,7 % debido a un elemento de la clase 3 que fue erróneamente clasificado en la clase 2.

Dos tipos de pruebas fueron realizadas con el robot real, las primeras para ajustar algunos parámetros como el tiempo de desplazamiento y los ángulos de giros; mientras que, las segundas consistieron en la evaluación del comportamiento del robot móvil ante las órdenes enviadas por los movimientos del teléfono inteligente. Para evidenciar las pruebas mencionadas, se graficó las trayectorias 30 veces cada uno de los movimientos posibles (desplazamiento y giros), es decir, 30 veces para aceleración (+), 30 veces para aceleración (-), 30 veces giro a la izquierda, 30 veces giro a la derecha, obteniendo el comportamiento esperado en el 100 % de casos Figura 12.

Output Class \ Target Class	1	2	3	Total
1	100 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	100 33.3%
2	0 0.0%	100 33.3%	0 0.0%	100 33.3%
3	0 0.0%	0 0.0%	100 33.3%	100 33.3%
Total	100 0.0%	100 0.0%	100 0.0%	300 99.7%

Output Class \ Target Class	1	2	3	Total
1	100 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	100 33.3%
2	0 0.0%	100 33.3%	1 0.3%	101 33.7%
3	0 0.0%	0 0.0%	99 30.0%	99 32.7%
Total	100 0.0%	100 0.0%	99 1.0%	299 99.7%

(a) Desplazamiento

(b) Giros

**Figura 11.** Matrices de confusión de las redes neuronales.

## 5. Conclusiones

En este artículo se presentó una propuesta de sistemas remotos para robótica móvil usando la tecnología disponible de bajo costo como teléfonos inteligentes, considerando que la mayor parte de estos dispositivos cuenta con sensores que permiten una medición de parámetros físicos diferentes como la aceleración, la posición, ubicación, entre otros. Adicionalmente, el uso de dos redes neuronales permite clasificar los datos recibidos para controlar y trazar la trayectoria de un robot móvil usando como mando a distancia los movimientos de un teléfono inteligente.

El manejo del robot mediante el uso del teléfono inteligente permite movimientos intuitivos, lo cual proporciona al usuario facilidad de manejo.

La implementación de una red neuronal evita usar equipo electrónico adicional para el acondicionamiento

de señales como filtros y otros circuitos auxiliares. Por la simplicidad de las redes propuestas se podría realizar la implementación de estas en sistemas embebidos como *Raspberry Pi*, *Arduino*, entre otros como parte del robot móvil.

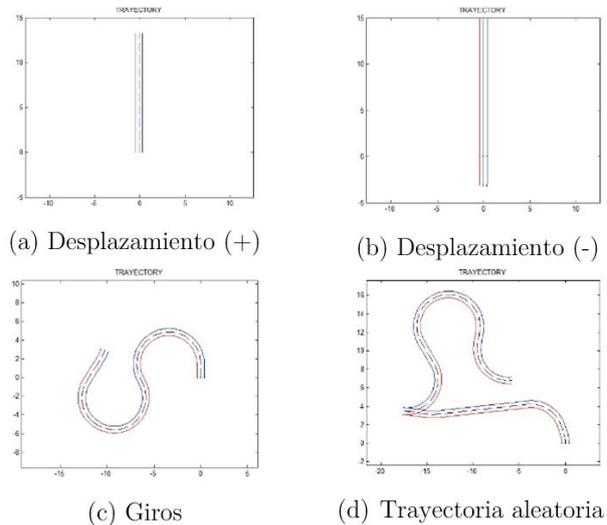


Figura 12. Resultados de las pruebas con el robot real.

## Agradecimientos

Los autores deseamos agradecer a Cristian M. Schmid por permitir usar su aplicación y modificar el código para el ordenador.

## Referencias

- [1] J. Cui, S. Tosunoglu, R. Roberts, C. Moore, and D. W. Repperger, "A review of teleoperation system control," *Proceedings of the Florida Conference on Recent Advances in Robotics (FCRAR)*, pp. 1–12, 2003.
- [2] P. Batsomboon, S. Tosunoglu, and D. W. Repperger, "Development of a mechatronic system: a telesensation system for training and teleoperation," *Chapter, Recent Advances in Mechatronics, Springer-Verlag, New York*, pp. 304–321, 2000.
- [3] E. Slawiński, V. A. Mut, and J. F. Postigo, "Teleoperation of mobile robots with time-varying delay," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 1071–1082, 2007.
- [4] Y. Kimitsuka, K. Sawai, and T. Suzuki, "Development of mobile robot teleoperation system utilizing robot sensor network," *Proceedings of INSS 2008 - 5th International Conference on Networked Sensing Systems*, vol. 23, no. 4, p. 250, 2008.
- [5] A. Uribe, S. Alves, J. M. Rosario, H. F. Filho, and B. Pérez-Gutiérrez, "Mobile robotic teleoperation using gesture-based human interfaces," *2011 IEEE 9th Latin American Robotics Symposium and IEEE Colombian Conference on Automatic Control, LARC 2011 - Conference Proceedings*, 2011.
- [6] H. Surmann, D. Holz, S. Blumenthal, T. Linder, P. Molitor, and V. Tretyakov, "Teleoperated Visual Inspection and Surveillance with Unmanned Ground and Aerial Vehicles," *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 4, pp. 1–13, 2008.
- [7] P. Vogt and J. Kuhn, "Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor," *The Physics Teacher*, vol. 50, no. 3, pp. 182–183, 2012.
- [8] A. Samà, C. Angulo, D. Pardo, A. Català, and J. Cabestany, "Analyzing human gait and posture by combining feature selection and kernel methods," *Neurocomputing*, vol. 74, no. 16, pp. 2665–2674, 2011.
- [9] G. Hache, E. D. Lemaire, and N. Baddour, "Mobility change-of-state detection using a smartphone-based approach," *2010 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2010 - Proceedings*, pp. 43–46, 2010.
- [10] M. Derawi, "Accelerometer-Based Gait Analysis, A survey Mohammad Omar Derawi Accelerometer Based Gait Analysis," *Norwegian Information Security Conference*, no. Mv, pp. 33–45, 2010.
- [11] C. Schmid. (2012) Mlconnect. [Online]. Available: <http://mlconnect.chschmid.com/index.php/Main Page>, 2012.
- [12] H. Demuth, *Neural Network Toolbox™ 6 User's Guide*, 2000, vol. 9, no. 4.
- [13] J. C. Moctezuma, "Neural network toolbox de matlab," in *Ciencias computacionales*, septiembre del 2006.



# DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE EN EL TORNEADO EN SECO DEL ACERO AISI 316L

## WEAR OF THE CUTTING TOOL IN TURNING DRY STEEL AISI 316L

Yoandrys Morales-Tamayo<sup>1,\*</sup>, Yusimit Zamora-Hernández<sup>2</sup>, Roberto Félix Beltrán-Reyna<sup>3</sup>, Kimberly Magaly López-Cedeño<sup>4</sup>, Ringo John López-Bustamante<sup>5</sup>

### Resumen

El presente estudio experimental se centra en determinar modelos estadísticos para predecir el desgaste del flanco durante el torneado en seco del acero inoxidable AISI 316L utilizando dos insertos de corte. Los parámetros de corte fueron comparados utilizando un análisis de varianza y de regresión múltiple. Como principales resultados se obtuvieron el efecto significativo del avance de corte y el tiempo principal en el desgaste del flanco. Se hallaron los modelos estadísticos para estimar el desgaste de flanco, así como los errores absolutos medios de cada ecuación. El mejor desempeño correspondió al inserto GC2015 según las ecuaciones de regresión.

**Palabras clave:** torneado en seco, desgaste del flanco, acero inoxidable AISI 316L, análisis de varianza y regresión.

### Abstract

The present experimental study focuses on determining statistical models to predict flank wear during dry turning of AISI 316L stainless steel using two cutting inserts. Cutting parameters were compared using analysis of variance and simple regression. As a main result the significant effect of cutting feed and main time was found. Statistical models were used to estimate flank wear, as well as the mean absolute errors of each equation. The best performance corresponded to the GC2015 insert according to the regression equations.

**Keywords:** Dry turning, Flank wear, AISI 316L Stainless steel, Analysis of variance and regression.

<sup>1,\*</sup>Coordinación de Investigación, Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná, Cotopaxi – Ecuador.  
Autor para correspondencia ✉: yoandrys.morales@utc.edu.ec

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Granma, Bayamo – Cuba.

<sup>3</sup>Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas, Cotopaxi – Ecuador.

<sup>4</sup>Facultad de Química, Universidad de Guayaquil – Ecuador.

<sup>5</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, Cotopaxi – Ecuador.

Recibido: 21-11-2016, aprobado tras revisión: 20-12-2016

Forma sugerida de citación: Morales, Y.; Zamora, Y.; Beltrán, R; López, K.; López, R. (2017). «Desgaste de la herramienta de corte en el torneado en seco del acero AISI 316L». INGENIUS. N.º17, (Enero-Junio). pp. 36-41. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

Las industrias dedicadas a la manufactura de elementos mecánicos están constantemente esforzándose para reducir costos e incrementar la calidad de las piezas maquinadas teniendo en cuenta la creciente demanda de productos con una elevada precisión dimensional.

El acero constituye un material básico para el desarrollo, debido a sus propiedades versátiles y posibilidades de reciclado. El acero se aplica en casi todos los sectores industriales importantes dedicados a la fabricación de piezas [1].

En los últimos tiempos, debido a la necesidad de materiales para herramientas de corte cada vez más resistentes al desgaste han aparecido materiales avanzados que revoluciona el corte de metales; sustentados en la aparición de recubrimientos de pequeños espesores y en los procesos de difusión térmica [2].

Muchas soluciones para aumentar la vida de la herramienta han estado dirigidas a disminuir la temperatura en la interface herramienta-pieza mediante la utilización y desarrollo de fluidos de corte de diferentes naturalezas. La utilización de estos encarece los costos de fabricación, provoca daños en la salud de los operarios y afecta el medioambiente [3]. Las nuevas tecnologías para atenuar los efectos perjudiciales de los fluidos de corte se sustentan en el corte en seco, en la mínima lubricación y en el desarrollo de nuevas fórmulas de fluidos [4].

El mecanizado en seco se considera como la mejor tecnología para eliminar el uso de los fluidos de corte en las empresas manufactureras y así reducir los costos de mecanizado y los riesgos ecológicos [5]. Esta investigación tiene como objetivo determinar modelos estadísticos para predecir el desgaste del flanco durante el torneado en seco del acero inoxidable AISI 316L.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Materiales

El material utilizado correspondió al acero inoxidable austenítico AISI 316L, acero utilizado en la manufactura de equipos para procesos químicos y alimenticios, en la industria aeroespacial, en la automotriz, en la biomédica para implantes médicos [6, 7]. La composición química del AISI 316L se puede observar en la Tabla 1, para ello se utilizó un espectrómetro de emisión de chispa.

**Tabla 1.** Composición química de la probeta

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	N
0,015	0,58	1,5	16,95	2,05	10,08	0,031	0,029	0,059

Las herramientas de corte correspondieron a insertos recubiertos, de marca *Sandvik PVD GC1115* y

*CVD GC2015*. La geometría seleccionada para los dos insertos fue *CCMT 120404 – MF* con rompevirutas. Esta plaquita es rómbica de  $80^\circ$  positiva, con un ángulo de incidencia  $\alpha_p = 7^\circ$ , espesor  $s = 4,76\text{mm} \pm 0,13\text{mm}$ , círculo inscrito  $iC = 12,7\text{mm} \pm 0,08\text{mm}$ . Es una plaquita tipo T, con una longitud de la arista de corte  $l = 12\text{mm}$ , radio de la punta  $r_\epsilon = 0,4\text{mm}$  y propuesta para operaciones de acabado de los aceros inoxidables austeníticos (MF) [8].

Se determinó el tipo y espesor de los recubrimientos utilizando el microscopio electrónico de barrido marca JEOL. Del mismo modo, se estableció la composición química de los insertos (Tabla 2).

**Tabla 2.** Objetivos y rango de operación del eje Y.

Parámetros Recubrimientos	Insertos	
	GC1115	GC2015
Primera capa	TiN	TiN
Segunda capa	-	Al2O3
Tercera capa	-	Ti(N,C)
Espesor ( $\mu\text{m}$ )	5	15
Sustratos (%)	GC1115	GC2015
W	94,67	96,35
Ti	2,23	1,57
Co	3,1	2,08

### 2.2. Equipos

Las pruebas durante el torneado fueron desarrolladas en un torno CNC Okuma modelo Multus B-200W. Para evitar confusión y errores entre las muestras se utilizó un borde de la herramienta de corte para cada ensayo. El criterio de desgaste adoptado de la Norma ANSI/ SME B94.55M fue de  $200 \mu\text{m}$  [9].

El análisis factorial completo fue el procedimiento utilizado para determinar la relación entre las variables independientes (parámetros de corte) y la variable dependiente (desgaste del flanco ( $w$ )). Un total de 64 ensayos para dos réplicas fueron desarrollados con dos niveles de velocidades de corte ( $v$ ), cuatro niveles de tiempo ( $T$ ), dos niveles de avances de corte ( $f$ ) y dos niveles de material de la herramienta, en la Tabla 3 aparecen las variables estudiadas.

**Tabla 3.** Variables consideradas en el estudio.

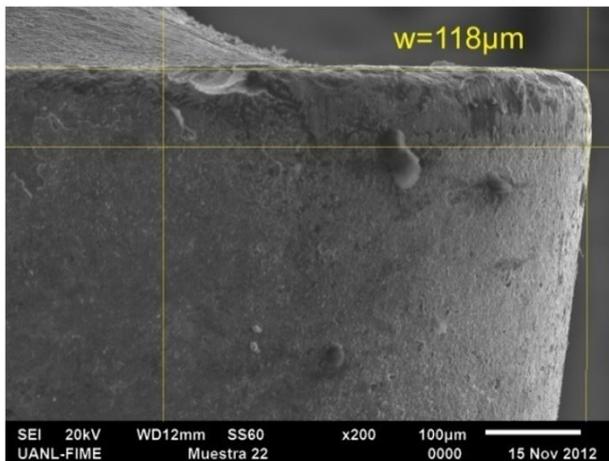
$v(\text{m}/\text{min})$	$f(\text{mm}/\text{rev})$	$T(\text{min})$
400	0,1 0,2	2; 3; 4; 5
450	0,1 0,2	0,6; 1,2; 2; 3

Luego fue desarrollado un análisis de regresión múltiple para construir los modelos estadísticos que describen el impacto de los dos factores estudiados, el tiempo de mecanizado y el avance de corte en el desgaste del flanco. El estado de los instrumentos de medidas, las máquinas y el personal de experimentación fue

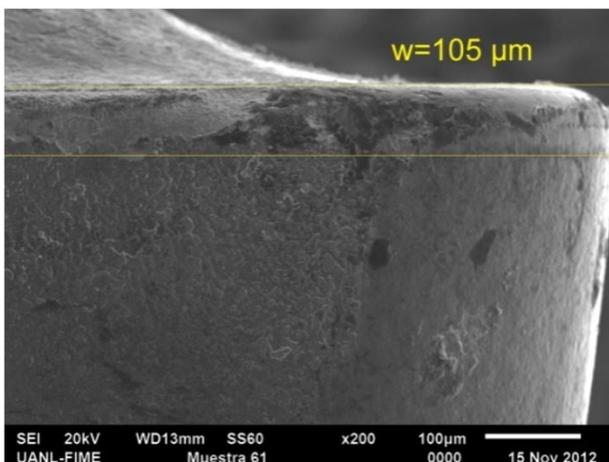
comprobado mediante pruebas iniciales. El desgaste del flanco de la herramienta de corte fue medido con un microscopio electrónico de barrido marca JEOL.

### 3. Resultados y discusión

En las Figuras 1 a la 4 se muestran las mediciones del desgaste del flanco de los insertos para  $400\text{ m/min}$  y  $450\text{ m/min}$  de velocidad de corte, para 5 y 3 min de tiempo de maquinado respectivamente. Se observa que para  $v = 400\text{ m/min}$  y  $f = 0,16\text{ mm/rev}$  los insertos GC1115 y GC2015 no exceden el criterio de fin de vida del desgaste del flanco ( $200\text{ }\mu\text{m}$ ). Para la velocidad de  $450\text{ m/min}$  y avance  $0,16\text{ m/min}$  el inserto GC1115 sufre un desgaste excesivo sobrepasando el criterio de fin de vida del desgaste del flanco y el inserto GC2015 se aproxima a este límite, aunque no lo sobrepasa.



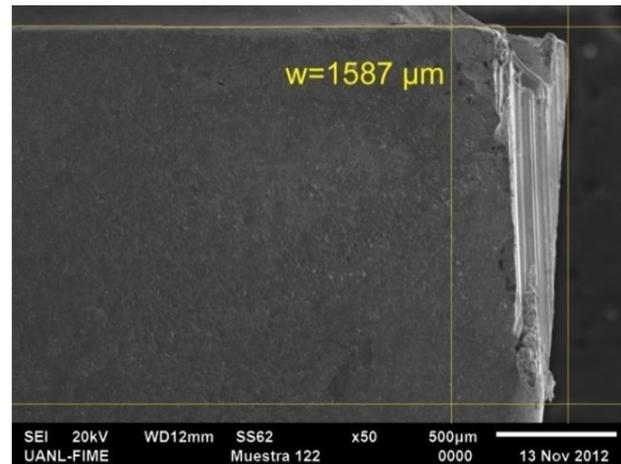
**Figura 1.** Desgaste del flanco de los insertos GC1115 para  $v = 400\text{ m/min}$  y  $f = 0,16\text{ mm/rev}$ , durante 5 min de corte.



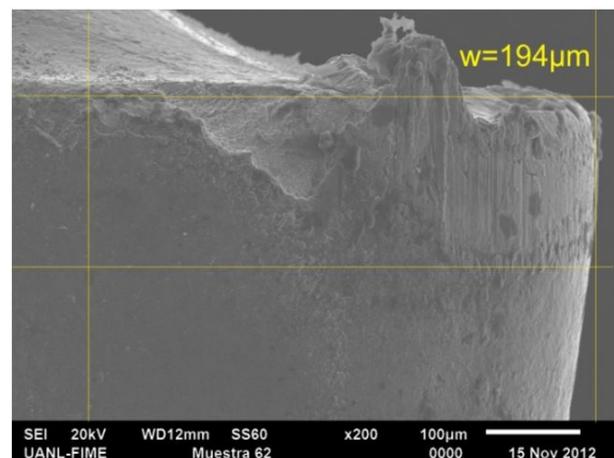
**Figura 2.** Desgaste del flanco de los insertos GC2015 para  $v = 400\text{ m/min}$  y  $f = 0,16\text{ mm/rev}$ , durante 5 min de corte.

La utilización de elevadas velocidades de corte provoca un aumento de la temperatura en la herra-

menta de corte, como consecuencia debilita la arista de corte [10].



**Figura 3.** Desgaste del flanco de los insertos GC1115 para  $v = 450\text{ m/min}$  y  $f = 0,16\text{ mm/rev}$ , durante 3 min de corte.

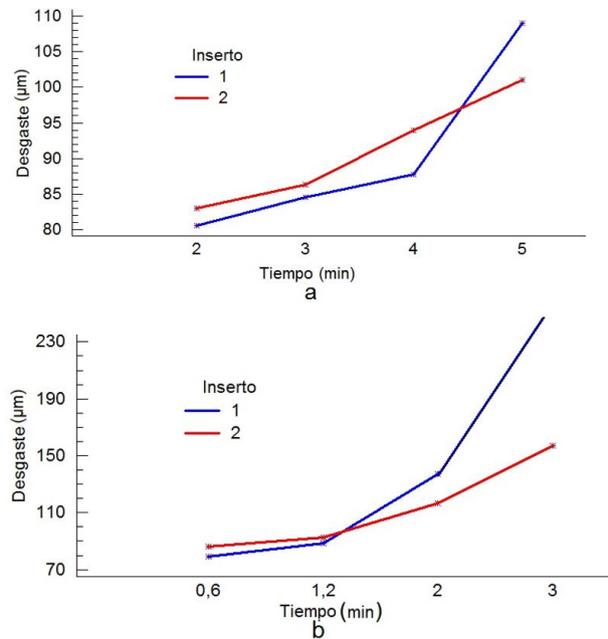


**Figura 4.** Desgaste del flanco de los insertos GC2015 para  $v = 450\text{ m/min}$  y  $f = 0,16\text{ mm/rev}$ , durante 3 min de corte.

Los insertos de corte muestran desgaste por abrasión, adhesión, difusión y fractura del borde cortante, similar resultado obtenido por Jianxin y otros [11].

En la Figura 5a se muestra la evolución del desgaste del flanco de los insertos para  $v = 400\text{ m/min}$ , se aprecia un mejor comportamiento del inserto GC1115 hasta 4 min de corte. Para los 5 min de maquinado el inserto GC2015 obtuvo un mejor resultado en cuanto al desgaste, ninguno de los dos insertos alcanzó el límite del criterio de fin de vida (Figura 5a).

Para la velocidad de corte de  $450\text{ m/min}$  (Figura 5b) el mejor desempeño hasta 1,2 min de corte fue también para el inserto GC1115; en cambio para los tiempos restantes el desgaste del flanco en sus filos de corte fue superior hasta colapsar antes de alcanzar el tiempo final de mecanizado.



**Figura 5.** Evolución del desgaste del flanco de los insertos (a) para 400 m/min y (b) 450 m/min.

En la investigación se encontró que la herramienta de menor dureza GC2015 (1404 HV) fue coincidentemente la de menor desgaste, debido a que posee tres recubrimientos específicos para mejorar la mecánica del corte. La capa compuesta por Ti(N,C) le proporciona resistencia al desgaste y estabilidad térmica, la capa de  $\text{Al}^2\text{O}^3$  le suministra resistencia al calor y disminuye el desgaste cráter y el recubrimiento de TiN le aporta resistencia al calor [12]. Además, la herramienta de mayor dureza solo presenta un recubrimiento 5  $\mu\text{m}$  de espesor mientras que la suma de los recubrimientos del inserto de tres capas alcanza 15  $\mu\text{m}$  de espesor.

El análisis de varianza fue realizado para determinar los factores estadísticamente significativos y las interacciones en el desgaste de flanco y, además, se realizó el análisis de regresión múltiple utilizando el software STATGRAPHICS Plus versión 5.1.

### 3.1. Análisis de varianza y de regresión múltiple

El análisis de varianza realizado en este estudio se puede observar en las Tablas 4 y 5 respectivamente. En ellas se muestran la contribución de cada factor y la importancia estadística para un 95 % de confianza. En la investigación fueron significativos el avance de corte y el tiempo principal de corte, similar conclusión determinada por Galanis y Manolacos [13] y Hamdan [14].

Se realizó un análisis de regresión múltiple para describir la relación entre el desgaste del flanco, el tiempo de corte principal y el avance de corte para cada velocidad e inserto utilizados en el estudio. El propósito fue obtener los modelos estadísticos para predecir el desgaste del flanco durante el torneado en seco

del acero inoxidable AISI 316L. Además, se observa el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que representa la bondad de ajuste y el error absoluto medio (MAE).

**Tabla 4.** Análisis de varianza factorial del desgaste del flanco para  $v = 400$  m/min.

Fuente	S. de cuadrado	Grado libertad	C. medio	Co.-F	p-v
Avance	318,7	1	318.781	27,64	0.0001
Inserto	5,2	1	5,28125	0,46	0,508
Tiempo	2841,5	3	947,198	82,14	0
Residuo	445,8	26	17,1466		
Total	3611.4	31			

**Tabla 5.** Análisis de varianza factorial del desgaste del flanco para  $v = 450$  m/min.

Fuente	S. de cuadrado	Grado libertad	C. medio	Co.-F	p-v
Avance	273430	1	273430	8,96	0,091
Inserto	245350	1	245350	2,77	0,108
Tiempo	989653	3	329884	3,72	0,024
Residuo	2,3 x106	26	88717,8		
Total	3,8 x106	31			

En las tablas 6 y 7 se muestran las ecuaciones del modelo ajustado, el error absoluto medio y el coeficiente de determinación para las diferentes velocidades de corte utilizadas teniendo en cuenta diferentes tipos de modelos.

Los modelos con menores errores absolutos medios correspondieron al tipo exponencial con el inserto GC1115 y al tipo cúbico con el GC2015 durante el mecanizado con la velocidad de 400 m/min.

Por otro lado, ambos insertos alcanzaron los menores valores de errores absolutos medios con el modelo del tipo exponencial cuando fueron mecanizados con la velocidad de 450 m/min.

## 4. Conclusiones

El desgaste del flanco aumentó con el tiempo de maquinado hasta un valor máximo de 1587  $\mu\text{m}$  para las velocidades de corte utilizadas en el estudio. Las ecuaciones de regresión múltiple obtenidas para cada inserto de corte utilizado en este experimento permitieron determinar el tiempo de vida útil teniendo en cuenta el criterio de fin de vida. El mejor desempeño corresponde al inserto GC2015 con tiempos de vida útil de 8,64 min superiores al inserto GC1115 (7,89 min) con la velocidad de 400 m/min, al igual que para la otra velocidad donde el inserto GC2015 alcanzó un valor de 3.32 min y el GC1115 solo 0,73 min.

**Tabla 6.** Análisis de regresión del desgaste del flanco para los insertos para  $v = 400$  m/min.

Inserto	Tipo	Ecuación del modelo ajustado	MAE	R <sup>2</sup>
GC1115	Lineal	$w = 50,125 + 81,25 \times f + 9,0 \times T$	4,76	75,81
	Polinomial	$w = 63,625 + 1,33333 \times T^2 + 81,25 \times f$	4,01	79,45
	Cúbica	$w = 68,0659 + 0,242127 \times T^3 + 81,26 \times f$	3,57	84,26
	Exponencial	$w = 80,3761 + 1,59068 \times e^{(T)} \times f$	2,81	92,21
GC2015	Lineal	$w = 58,4125 + 7,025 \times T + 76,5625 \times f$	2,28	89,87
	Polinomial	$w = 69,4119 + 1,00653 \times T^2 + 76,5625 \times f$	1,94	91,3
	Cúbica	$w = 73,07 + 0,177321 \times T^3 + 76,5625 \times f$	1,86	91,91
	Exponencial	$w = 84,498 + 1,11207 \times e^{(T)} \times f$	2,7	84,79

**Tabla 7.** Análisis de regresión de la rugosidad superficial para los insertos para  $v = 450$  m/min.

Inserto	Tipo	Ecuación del modelo ajustado	MAE	R <sup>2</sup>
GC1115	Lineal	$w = -764,171 + 312,454 \times T + 4346,88 \times f$	274	41,42
	Polinomial	$w = -571,863 + 91,5845 \times T^2 + 4346,88 \times f$	257	48,76
	Cúbica	$w = -507,355 + 29,7049 \times T^3 + 4346,88 \times f$	255	52,47
	Exponencial	$w = -142,146 + 440,234 \times e^{(T)} \times f$	159	80,02
GC2015	Lineal	$w = 26,0895 + 32,0062 \times T + 275,0 \times f$	9,60	84,65
	Polinomial	$w = 478235 + 8,8315 \times T^2 + 274,0 \times f$	8,12	88,52
	Cúbica	$w = 69,8528 + 2,74078 \times T^3 + 1145,83 \times f^2$	9,09	87,27
	Exponencial	$w = 80,5152 + 33,7093 \times e^{(T)} \times f$	5,04	96,32

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la SEP por proporcionar la beca posgraduada de investigación en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en México. Se le agradece al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica por el apoyo financiero y tecnológico, además, por todas las facilidades brindadas para el desarrollo del trabajo de investigación. Se agradece al Departamento de Ciencias Técnicas de la Universidad de Granma por el apoyo brindado.

## Referencias

- [1] I. Asiltürk and S. Neseli, "Multi response optimisation of CNC turning parameters via taguchi method-based response surface analysis," *Measurement*, vol. 45, no. 4, pp. 785–794, 2012.
- [2] A. E. Diniz, Á. R. Machado, and J. G. Corrêa, "Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 9, pp. 3157–3168, 2016.
- [3] O. Pereira, A. Rodríguez, A. Fernández-Abia, J. Barreiro, and L. L. de Lacalle, "Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of {AISI} 304," *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, pp. 440–449, 2016.
- [4] S. E. Cordes, "Thermal stability of  $\gamma$ -alumina {PVD} coatings and analysis of their performance in machining of austenitic stainless steels," *{CIRP} Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 20–25, 2012.
- [5] A. Shokrani, V. Dhokia, and S. Newman, "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, pp. 83–101, 2012.
- [6] M. Nalbant and Y. Yildiz, "Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304 stainless steel," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, no. 1, pp. 72–79, 2011.
- [7] S. Saketi, J. Östby, and M. Olsson, "Influence of tool surface topography on the material transfer tendency and tool wear in the turning of 316L stainless steel," *Wear*, vol. 368–369, pp. 239–252, 2016.
- [8] Sandvik, "Torneado general coromant, s.: A4-a54," 2012.
- [9] *Tool-life testing with single-point turning tools. B94.55M.*, ANSI/ASME Std., 1985.
- [10] G. Bartarya and S. Choudhury, "State of the art in hard turning," *International Journal of Ma-*

- chine Tools and Manufacture*, vol. 53, no. 1, pp. 1–14, 2012.
- [11] D. Jianxin, Z. Jiantou, Z. Hui, and Y. Pei, “Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels,” *Wear*, vol. 270, no. 7, pp. 520–527, 2011.
- [12] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. Gaitonde, and G. Samuel, “Machinability investigations on hardened {AISI} 4340 steel using coated carbide insert,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 33, pp. 75–86, 2012.
- [13] N. I. Galanis and D. E. Manolakos, “Surface roughness prediction in turning of femoral head,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 79–86, 2010.
- [14] A. Hamdan, A. A. D. Sarhan, and M. Hamdi, “An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 81–91, 2012.



# ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN *BILLETS* DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

## QUANTITATIVE ANALYSIS OF MAIN PRECIPITATE ALLOYING ELEMENTS IN ALUMINUM ALLOY 6063 CAST BILLETS MADE IN HORIZONTAL CONTINUOUS CASTING MACHINE FOR THE EXTRUSION PROCESS

Hernán Alberto Navas-Moscoso<sup>1,\*</sup>, Wilson Henry Vaca-Ortega<sup>2</sup>, Juan Gilberto Paredes-Salinas<sup>2</sup>, Fabián Rodrigo Morales-Fiallos<sup>2</sup>, Diego Fernando Núñez-Núñez<sup>2</sup>

### Resumen

La escasez de estudios *in situ* sobre procesos de colada continua horizontal en aleaciones de aluminio, impulsa la necesidad de investigar la influencia de temperatura, velocidad y materia prima en *billets* de aluminio homogenizados AA6063. Aplicando ensayos de espectrometría, permiten cuantificar el porcentaje en peso de aleantes principales magnesio y silicio. Estos elementos al precipitar forman siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) durante el proceso de homogenizado. Para este estudio se produjo *billets* de aleación normal y experimental, demostrando una relación inversa entre los niveles de siliciuro de magnesio y dureza Brinell; así también la influencia de bajos niveles de porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  en la reducción de la resistencia a la tracción en el material.

**Palabras clave:** aleación 6063, billet, precipitado.

### Abstract

Lack of *in situ* studies about horizontal continuous casting process applied in production of aluminum alloy 6063 cast billets, promotes to investigate the direct influence of: temperature, velocity and raw material. Applying spectrometric tests to quantify the weight percent of main alloying elements such as Magnesium and Silicon. These elements precipitate to form magnesium silicide ( $Mg_2Si$ ) during homogenization process. For this study it was necessary to produce billets with normal and experimental alloy levels to demonstrate an inverse relation between magnesium silicide and Brinell hardness. Equally important, the effect of reduction of the material tensile strength due to low levels of magnesium silicide.

**Keywords:** Alloy 6063, billet, precipitate.

<sup>1,\*</sup>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador.  
 Autor para correspondencia ✉: [hernannavasmoscoso@gmail.com](mailto:hernannavasmoscoso@gmail.com)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador.

Recibido: 21-11-2016, aprobado tras revisión: 20-12-2016

Forma sugerida de citación: Navas, H.; Vaca, W.; Paredes, J.; Morales, F.; Núñez, D. (2017). «Análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados en *billets* de aluminio de aleación 6063 en equipo de fundición de colada continua horizontal para el proceso de extrusión». INGENIUS. N.º 17, (Enero-Junio). pp. 42-50. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

El proceso de fundición de colada continua horizontal con equipo tipo HERTWICH es aplicable para convertir chatarra de aluminio en *billets* o lingotes de aleación según sea su clase, sin embargo, cabe recalcar que HERTWICH diseñó este tipo de equipo para el proceso de *remelting*. [1]

Pocas empresas poseen la capacidad para incluir en su proceso de fundición este tipo de equipo, sea esto debido a la complejidad y singularidad del mismo, ya que se requiere de meticulosos procedimientos manejados de forma confidencial en cada empresa; no obstante, la formación del *billet* de aluminio de manera horizontal representa un gran reto, por lo cual es necesario un control continuo de los principales elementos que constituyen la aleación en cada turno de producción. [2] Sin embargo, uno de los métodos no destructivos que ayuda a proporcionar información con tolerancia más estrecha, rápida y predilecto para monitorear los niveles de aleación 6063 es el espectrómetro de emisión óptica porque tiene la ventaja de ser un ensayo que permite en tiempo real conocer si la aleación cumple con estándares nacionales e internacionales. [2]

Varios estudios han permitido obtener a partir de modelos matemáticos, ecuaciones que son aplicadas en muchos estudios experimentales con resultados favorables que confirman un alto nivel de exactitud y confianza en los resultados.

La distribución longitudinal de los elementos aleantes principales (silicio y magnesio) demuestran la naturaleza del proceso de colada continua horizontal, así también la importancia del proceso de homogenizado como complemento para la formación de una solución homogénea; el resultado será un material con características mecánicas intrínsecas de la aleación 6063 para que al final del proceso de extrusión los perfiles que sean sometidos a tratamiento térmico T5 o T6 adquieran las propiedades ideales cumpliendo los estándares de calidad.

### 1.1. Aleación 6063

La aleación 6063 pertenece a la serie 6000 de aleaciones de aluminio. Estas poseen como elementos aleantes principales al magnesio y silicio porque ambos contribuyen a la formación de siliciuro de magnesio, este compuesto ayuda a fortalecer su estructura cristalina durante el proceso de solución sólida. [3,4]

Forma parte de una de las cuatro series de aleaciones que acepta tratamiento térmico, sin embargo, la aleación 6063 al estar incluida en la serie 6000 admite el temple y la maduración natural o artificial. [3,4]

### 1.2. Propiedades del magnesio en aleación

Las aleaciones de la serie 6000 se benefician de la alta solubilidad en sólido del magnesio, incrementando su

resistencia a la corrosión, ductilidad y conductividad térmica. También mejoran su respuesta al proceso de anodizado. [2] [4]

Está demostrado que el magnesio incrementa la ductilidad y fortalecimiento de la aleación; sin embargo, al sobrepasar una concentración de 0,7 en porcentaje de peso, disminuye el límite de solubilidad sólida y dificulta la extrusión del *billet*. [2] [4]

### 1.3. Propiedades del silicio en aleación

El silicio en las aleaciones de la serie 6000 es un elemento endurecedor, debido a su alta solubilidad en aluminio es agregado en colada en pequeños trozos o barras para mezclarse con otros elementos en el aluminio fundido sin llegar a sobrecalentar el metal. [2] [4]

Facilita la respuesta de los perfiles extruidos al proceso de envejecido artificial para proveer de un mayor fortalecimiento que aquel por medio de envejecido natural. [2] [4]

Garantiza una óptima fluidez de la aleación y consigue un adecuado moldeo; también reduce el coeficiente de expansión térmica del material. [4]

### 1.4. El siliciuro de magnesio

El siliciuro de magnesio en la aleación 6063 produce un efecto de fortalecimiento por medio de la solución sólida molecular fijando las dislocaciones. [3] Como referencia a señalar en la serie 6000, indica la dificultad de considerar dentro de un diagrama ternario por separado al silicio y magnesio con el aluminio; por lo cual se encuentra descrito en memorias de varias investigaciones que el  $Mg_2Si$  forma un sistema cuasibinario. [3] Estudios experimentales han determinado en aleaciones industriales 6063 que precisan un exceso de silicio para controlar niveles de magnesio y para dar lugar a la formación de siliciuro de magnesio el cien por ciento de magnesio se precipita. [2] [4]

### 1.5. Proceso de colada continua horizontal

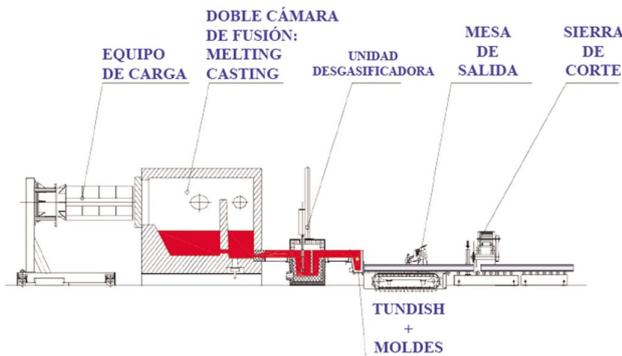
Es un proceso diseñado para empresas extrusoras de aluminio con el fin que puedan realizar el proceso de refundido con chatarra de alta calidad proveniente de su propio proceso de extrusión. [1]

Este equipo sirve para una operación continua logrando maximizar la producción en periodos de tiempo desde un mínimo de tres días y reportados en mejor de los casos tres semanas ininterrumpidas. [1]

Por medio de la técnica de molde abierto se logra producir con un mismo equipo: lingotes, *billets* (cilindros), barras T, entre otros; cada uno de ellos con diferentes dimensiones y longitudes con la integración de un sistema con sierra de corte. En la Figura 1 se aprecia las partes principales del equipo de colada continua horizontal, además a continuación se establece brevemente una descripción de los mismos:

**Equipo de carga:** Compuesto por la máquina de carga de material la cual posee en su plataforma de trabajo una báscula para pesar los elementos que se van a adicionar en el horno de fusión.

**Horno de fusión:** Posee doble cámara siendo la primera cámara de fusión (*melting*) y la segunda cámara de colado (*casting*), cada cámara tiene su respectivo quemador, sistema de recuperación de calor y ductos de salida de gases con respectivo sistema de filtrado y control automático de temperatura.



**Figura 1.** Equipo completo para proceso de colada continua horizontal. [1]

**Equipo de *casting*:** Contiene el sistema de control de flujo, los canales de moldeo que guían la aleación a la unidad desgasificadora que posee su rotor con impulsor de grafito para inyectar argón y refinador de grano.

**Tundish:** En conjunto con el filtro se encarga de albergar el aluminio para suministrar a los moldes y permitir la producción continua de *billets*.

**Moldes:** Se encuentran adaptados en la base de *tundish*, son elaborados con aleación de cobre; poseen forma circular con sistema de lubricación combinado con aceite biodegradable y grafitos, tiene un sistema de refrigeración con agua.

**Mesa de moldeo horizontal:** También llamada mesa de salida donde facilita el avance guiado de los *billets* moldeados con un sistema de rodillos y cadena.

**Sierra de corte:** Conocida también como sierra volante, corta automáticamente los *billets* según longitud específica de acuerdo con el lote de producción.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Toma de muestras y procedimientos

El presente análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados, en su inicio no cuenta con datos históricos de estudios anteriores ni métodos experimentales de estudio aplicados en proceso de colada continua horizontal en *billets* de aluminio AA6063.

En la comparación de muestras entre *casting* y *tundish* se decidió tomar 22 muestras respectivamente

porque control de calidad ase dos muestras de *tundish* en cada hora por turno de ocho horas de producción y someter las muestras a ensayo de espectrometría para controlar los niveles de aleación basados en norma ASTM E716 y E1251 con discos tipo B.

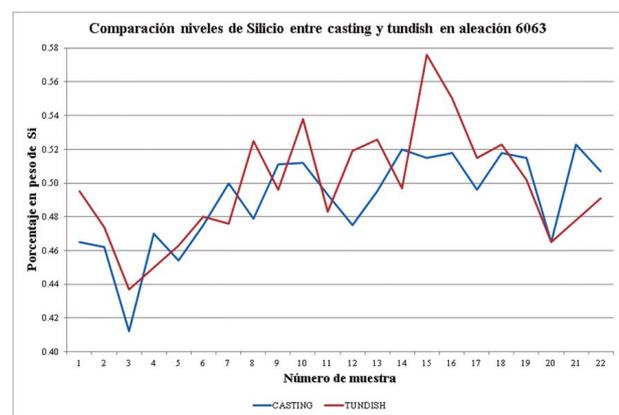
La recolección de datos estadísticos descriptivos sobre la relación entre temperatura de moldeo y el avance de mesa, fue realizada en los turnos de trabajo durante la producción de la aleación A y B, mismas que serán descritas en el literal 2.2 y se los obtuvieron por medio de tableros de control y medición de avance de mesa con cronómetro en intervalos de tiempo cada 10 minutos.

Para ensayos de dureza Brinell y espectrometría de los *billets*, fueron necesarios un total de ocho *billets* (cuatro de aleación A y cuatro de aleación B) con un costo de producción de \$700 USD cada uno, luego se compararon rangos de aleación con el objetivo de discriminar información y quedarse con un *billet* por cada aleación con la intención de realizar cortes consecutivos con espesor promedio de 35 mm y reservándose un corte mayor de la sección media a fin de obtener las probetas para ensayo de tracción, medición de dureza y espectrometría completando así un total de 59 muestras por *billet*.

### 2.2. Comparación entre muestras de *casting* y *tundish*

Esta comparación espectrométrica sirve para averiguar si existe una diferencia significativa en los niveles de aleantes principales al momento de tomar una muestra de *casting* o *tundish*.

Se debe tener en cuenta lo siguiente: todos los valores a ser mencionados durante todo este análisis corresponden al porcentaje en peso de los aleantes principales (magnesio y silicio) en aleación 6063.



**Figura 2.** Comparación niveles de Si entre *casting* y *tundish*.

Al realizar los ensayos espectrométricos para conocer los porcentajes en peso de silicio (Figura 2), en ambos casos se obtuvo que un cincuenta por ciento

de las muestras están por encima del valor 0,496 con un valor máximo en *casting* de 0,523 y en *tundish* de 0,576, el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0,496 con un valor mínimo en *casting* de 0,412 y en *tundish* de 0,437.

En promedio los niveles de silicio de la aleación se encuentran en 0,49 en *casting* y desviándose 0,028 unidades del promedio. De la misma forma, el nivel promedio de silicio en la aleación tomada de *tundish* es de 0,498 con una desviación estándar de 0,034 unidades.

Continuando, en la Figura 3 se observa la respectiva comparación entre *casting* y *tundish* en relación con el porcentaje en peso de magnesio, por medio de los ensayos espectrométricos se obtuvo que en *casting* un cincuenta por ciento de las muestras están por encima del valor 0,508 con un valor máximo de 0,559 y el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0,508 con un valor mínimo de 0,439. En el caso de las muestras tomadas de *tundish*, el cincuenta por ciento está por encima del valor 0,528 con un valor máximo de 0,591; el porcentaje restante está por debajo del valor de 0,528 con un valor mínimo de 0,461.

En promedio los niveles de magnesio de la aleación se encuentran en 0,508 en *casting* con una desviación estándar de 0,035 unidades. De la misma forma, el nivel promedio de magnesio en la aleación tomada de *tundish* es de 0,524 y desviándose 0,035 unidades del promedio.

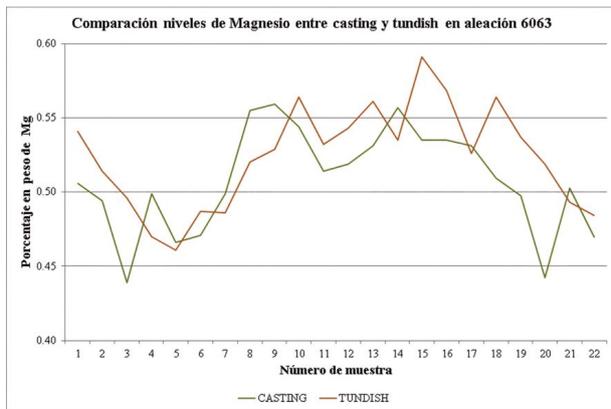


Figura 3. Comparación niveles de Mg entre *casting* y *tundish*.

Considerando la diferencia encontrada al momento de tomar muestras en *casting* y *tundish*, indistintamente del tipo de aleación a ser producida es preferible tomar muestras de *tundish* cuando se precisa equiparar los niveles de aleantes principales.

De aquí en adelante se va a denominar la aleación con niveles normales como aleación «A» y los niveles de porcentaje en peso a controlar se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación «A».

Rango de porcentaje en peso de elementos principales en aleación «A»		
Elemento	Máximo	Mínimo
Magnesio (Mg)	0,5	0,48
Silicio (Si)	0,49	0,44
Hierro (Fe)	0,2	No aplica según norma

En cambio, de aquí en adelante se va a denominar la aleación con niveles experimentales como aleación «B», cuyos rangos de porcentaje en peso de los elementos principales a controlar se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación «B».

Rango de porcentaje en peso de elementos principales en aleación «B»		
Elemento	Máximo	Mínimo
Magnesio (Mg)	0,49	0,45
Silicio (Si)	0,42	0,38
Hierro (Fe)	0,17	No aplica según normas

### 2.3. Relación entre temperatura de moldeo y velocidad de avance de mesa

La relación con respecto a dos variables importantes como son la temperatura registrada de moldeo en *tundish* y la velocidad de avance de mesa, se determinó que la velocidad de avance de mesa está en relación directa a la temperatura en *tundish*.

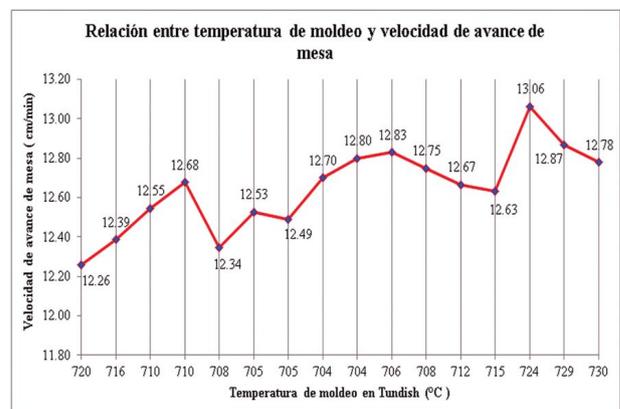


Figura 4. Velocidad avance de mesa vs. temperatura de moldeo.

El control del avance de mesa es automático y es fácil apreciar en ciertos puntos de la Figura 4 que el mismo sistema trata de regular esa velocidad en relación con la temperatura de moldeo en *tundish*.

#### 2.4. Ensayos de dureza Brinell

El ensayo respectivo de dureza Brinell (HB) tuvo lugar en el laboratorio de calidad perteneciente a la empresa CEDAL S. A., mismo que se lo realizó bajo norma ASTM-E10. Con una fuerza aplicada de 613 N con el indentador de bola de diámetro 2,5 mm. Los resultados obtenidos se los resume en la Tabla 3.

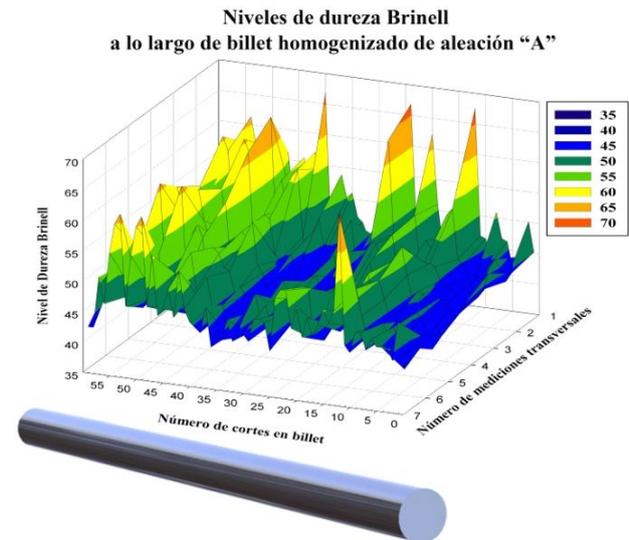
**Tabla 3.** Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación «B».

ENSAYO DE DUREZA BRINELL		
Departamento:	Fundición	
Origen:	As cast	
Proceso:	Colada continua horizontal	
Aleación:	6063	
Longitud de <i>billet</i> :	2794 mm	
Tratamiento térmico:	Homogenizado	
Total muestras:	59	
Mediciones por muestra:	7	
Identador	2,5 mm	
Fuerza:	613 N	
Tiempo:	10 s	
Tipo de aleación:	A	B
Promedio	47,6	47,34
Mediana	46,08	46,65
Desviación estándar	3,6	3,33
Máximo	56,5	57,31
Mínimo	43,08	42,7

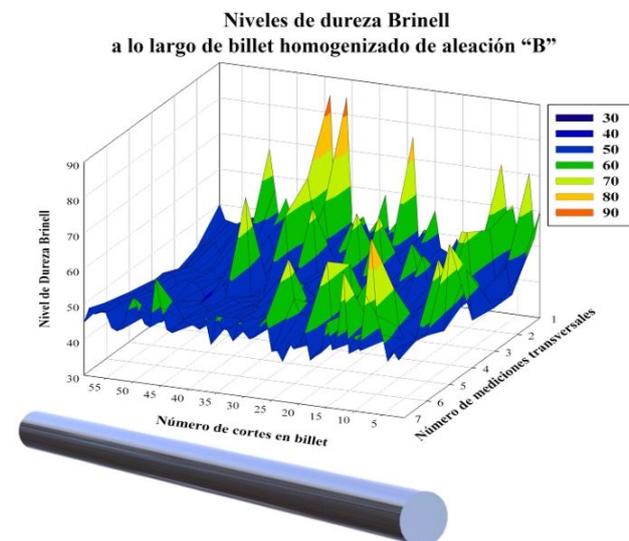
Los valores obtenidos referentes a nivel de dureza Brinell, en el *billet* de aleación «A» se obtuvo que un cincuenta por ciento del *billet* posee niveles de dureza que están sobre el 46,08 HB alcanzando una dureza máxima de 56,0 HB y el otro cincuenta por ciento del *billet* posee niveles de dureza por debajo de 46,08 HB llegando a una dureza mínima de 43,08 HB y con una dureza promedio en su total de 47,60 HB. La distribución de los niveles de dureza HB transversalmente en los siete puntos de medición del *billet* de aleación «A» se contempla en la Figura 5.

La aleación «B» en todo el *billet*, un cincuenta por ciento posee niveles de dureza sobre los 46,65 HB con un máximo de 57,31 HB y el otro cincuenta por ciento del mismo alcanzó niveles por debajo del 46,65 HB con un mínimo de 42,70 y alcanzando una dureza promedio en todo el *billet* de 47,34 HB. A continuación

se puede avistar los niveles de dureza HB transversal de la aleación «B» en la Figura 6.



**Figura 5.** Dureza Brinell a lo largo del billet homogenizado de aleación «A».



**Figura 6.** Dureza Brinell a lo largo del billet homogenizado de aleación «B».

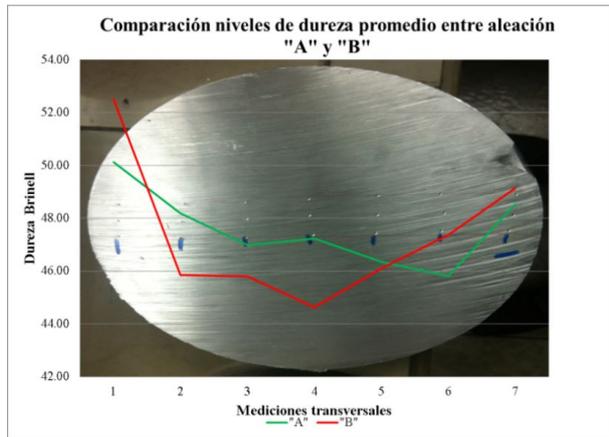
Gráficamente advierte en la Figura 7 la comparación entre ambas aleaciones. Al contrario de lo que se podría esperar por los niveles en aleantes principales que posee la aleación «B», esta posee apenas en promedio un 0,55 % menor dureza que la aleación «A».

#### 2.5. Cuantificación de los aleantes principales precipitados

La cuantificación de los elementos aleantes principales precipitados en la aleación 6063, parte al comprender el concepto que el magnesio y silicio precipitan

para formar siliciuro de magnesio ( $2Mg + Si = Mg_2Si$ ), mismo que fue descrito anteriormente.

El cálculo es posible al poder obtener por medio de espectrometría el porcentaje en peso de silicio y magnesio que son los principales elementos aleantes en aleaciones de la serie 6000.



**Figura 7.** Comparación dureza transversal en billets homogenizados de aleaciones «A» y «B».

La cuantificación, se realizó aplicando la relación estequiométrica entre magnesio y silicio por encontrarse en la formulación química del  $Mg_2Si$  porque al ser un cuerpo compuesto claramente se ve que posee dos átomos de magnesio y un átomo de silicio, si se conoce el peso atómico de cada elemento se obtiene la siguiente razón para las aleaciones de la serie 6000: [3–7]

$$\frac{Mg}{Si} = \frac{48,61}{28,0855} = 1,73 \quad (1)$$

Si la relación indica niveles mayores a 1,73, la aleación posee exceso de Mg, menor a 1,73 la aleación posee exceso de Si y si es igual a 1,73 la aleación es de tipo estequiométrica.

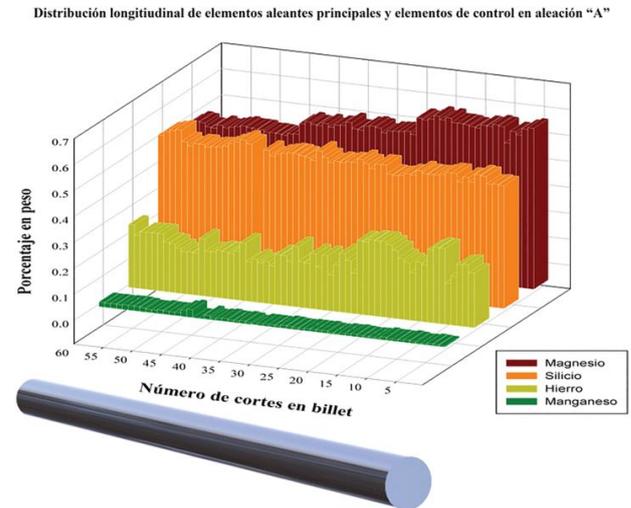
La aleación «A» con porcentaje en peso promedio: Si (0,4969), Fe (0,2081), Mg (0,547), Mn (0,0111) y aplicando la ecuación 1 se obtuvo 1,101 lo que demuestra la aleación posee exceso de silicio, adicionalmente en la Figura 8 se examina gráficamente la distribución longitudinal de elementos principales de control en aleación «A» y de la misma forma en la Figura 9 lo correspondiente a la aleación «B».

Para la aleación «B» registra con porcentaje en peso promedio: Si (0,4169), Fe (0,1663), Mg (0,4055), Mn (0,0273) de la misma manera aplicando ecuación 1 se obtuvo 0,973 menor a 1,73.

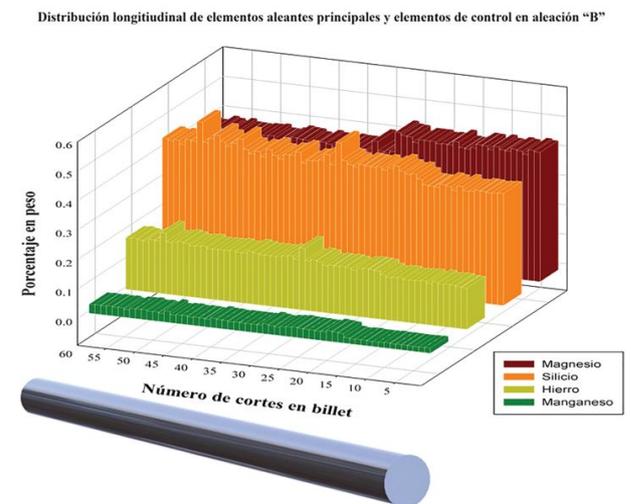
En la formación de  $Mg_2Si$  se valora que todo el contenido de magnesio en la aleación 6063 se precipita para combinarse con la mitad de silicio disponible y así formar  $Mg_2Si$ ; por lo contrario, estos niveles de silicio disponible se ven afectados por la presencia de hierro y manganeso en la aleación; con el fin de cuantificar

el nivel de silicio disponible se procede a aplicar la siguiente ecuación: [3–7]

$$Si \text{ disponible} = \frac{\% Si - (\% Fe + \% Mn)}{4} \quad (2)$$



**Figura 8.** Distribución longitudinal en billet homogenizado de elementos principales de control en aleación «A».



**Figura 9.** Distribución longitudinal en billet homogenizado de elementos principales de control en aleación «B».

Para la aleación «A» a partir de los niveles promedio obtenidos de porcentaje en peso, posee 0,442 de silicio disponible para formar  $Mg_2Si$ .

En el caso de la aleación «B», se obtuvo 0.369 de Si disponible para la formación de  $Mg_2Si$ .

A continuación, es necesario conocer cuánto silicio es consumido para formar  $Mg_2Si$ ; mediante la relación estequiométrica se puede establecer aplicando la siguiente ecuación: [3–7]

$$\%Si = \frac{\%Mg}{1,73} \cong 0,578 \times \%Mg \quad (3)$$

Donde los valores de Mg y Si están en porcentaje de peso de cada elemento y se obtiene para la aleación «A» un total de silicio consumido de 0,3162 para formar  $Mg_2Si$ .

En la aleación «B» se obtuvo 0,234 de silicio consumido para formar  $Mg_2Si$ .

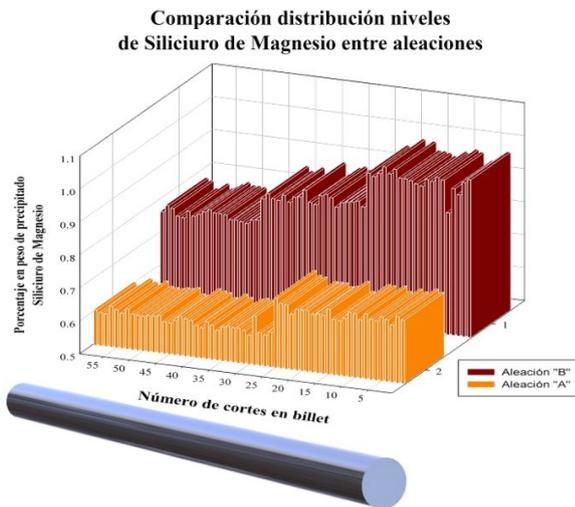
Uno de los objetivos es el poder cuantificar los precipitados de los aleantes principales que son Mg y Si, sabiendo que el producto de esta precipitación es el siliciuro de magnesio. Para calcular el porcentaje de peso de  $Mg_2Si$  obtenido para cada caso a partir de la siguiente ecuación: [3-7]

$$\%Mg_2Si = \%Mg + \%Si \text{ consumido} \quad (4)$$

Para la aleación «A» se obtuvo un valor promedio de 0,863 de porcentaje de peso de  $Mg_2Si$  y en la aleación «B» se obtuvo un valor promedio de 0,640 en porcentaje de peso de  $Mg_2Si$ .

Como recomendación técnica, es importante que los niveles obtenidos cuantitativamente de siliciuro de magnesio para las aleaciones de la serie 6000 debe estar entre 0,61 a 1,0 de porcentaje en peso. [2]

En promedio ambas aleaciones presentan sus niveles de siliciuro de magnesio dentro del rango recomendado técnicamente; dicha comparación es posible avistar en la Figura 10. [2]



**Figura 10.** Comparación distribución longitudinal de siliciuro de magnesio en *billet* homogenizado de aleación «A» y «B».

## 2.6. Relación entre dureza Brinell y precipitados de siliciuro de magnesio

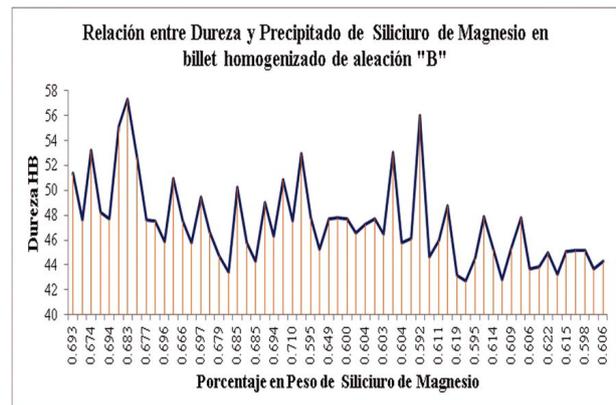
Acerca de la relación entre dureza Brinell y porcentaje en peso de precipitados de siliciuro de magnesio

en el *billet* de aleación «A», se puede distinguir en la Figura 11 que en secciones del *billet*, la dureza es inversamente proporcional al contenido de porcentaje en peso de siliciuro de magnesio, en otras palabras, a menor porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  mayor dureza Brinell y a mayor porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  menor dureza Brinell.



**Figura 11.** Relación entre dureza Brinell y precipitados de  $Mg_2Si$ .

Con respecto a la aleación «B», se muestra los resultados similares en la Figura 12, en secciones del *billet* con valores indicando una relación inversamente proporcional debido a secciones con niveles altos en porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  que registran baja dureza Brinell y en secciones del *billet* con niveles altos en porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  demuestra una baja dureza Brinell.



**Figura 12.** Relación entre dureza Brinell y precipitados de  $Mg_2Si$ .

## 2.7. Ensayo de tracción

No existe registro alguno de estudio *in situ* que haya realizado una prueba de esta naturaleza de *billets* homogenizados procedentes del proceso de colada continua horizontal.

A partir de las tres probetas extraídas del billet de aleación «A», se registró un límite de fluencia promedio de 66,73 MPa y una resistencia a la tracción promedio de 153 MPa.

**Tabla 4.** Resultados prueba de tracción de aleación «A».

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN					
Departamento:	Fundición	Origen:	As cast	Aleación:	6063
Proceso:	Colada continua horizontal			Tipo:	«A»
Tratamiento Térmico:			Homogeneizado		
Probetas bajo norma:	ASTM B557M		Probetas analizadas:		3
Descripción	Resistencia a la tracción	Carga máxima registrada	Límite de fluencia	Carga de fluencia	Elongación en 50 mm
	MPa	kg	MPa	kg	%
A1	153	2450	67,00	1070	36,30
A2	155	2470	67,40	1070	36,50
A3	151	2400	65,80	1050	34,90
<b>Promedio</b>	<b>153</b>	<b>2440</b>	<b>66,73</b>	<b>1063,33</b>	<b>35,90</b>

Con relación a las tres probetas procedentes del *billet* de aleación «B», tuvieron un límite de fluencia promedio de 52,70 MPa y su resistencia a la tracción promedio de 134 MPa.

**Tabla 5.** Resultados prueba de tracción de aleación «B».

RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN					
Departamento:	Fundición	Origen:	As cast	Aleación:	6063
Proceso:	Colada continua horizontal			Tipo:	«B»
Tratamiento Térmico:			Homogeneizado		
Probetas bajo norma:	ASTM B557M		Probetas analizadas:		3
Descripción	Resistencia a la tracción	Carga máxima registrada	Límite de fluencia	Carga de fluencia	Elongación en 50 mm
	MPa	kg	MPa	kg	%
B1	136	2160	53,90	859	38,50
B2	131	2080	52,00	829	39,50
B3	135	2150	52,20	832	37,90
<b>Promedio</b>	<b>134</b>	<b>2130</b>	<b>52,7</b>	<b>840</b>	<b>38,63</b>

### 3. Resultados y discusión

Como resultado obtenido, se considera que la diferencia promedio entre *casting* y *tundish* es del 1,6 % con respecto a los niveles de silicio en aleación y la diferencia promedio con respecto a los niveles de magnesio en aleación es del 3,05 % debido a que varios elementos y combinaciones van a precipitar fuera de la aleación en función del descenso de temperatura; en este caso la temperatura en *tundish* es menor a la temperatura de *casting* en un promedio de 35 °C. [2]

El porcentaje en peso promedio de silicio de magnesio en un *billet* de aluminio homogeneizado de aleación «A» fue de 0,863 y en el *billet* de aluminio homogeneizado de aleación «B» registró 0,64 equivalente a un 25 % menos contenido de Mg<sub>2</sub>Si; conforme a estos resultados no se puede contrastar con otras investigaciones porque en principio el equipo de colada continua horizontal fue diseñado para aplicar un proceso de *remelting* en empresas extrusoras y en el presente estudio la materia prima está compuesta por aluminio primario, perfiles extruidos y aleaciones de aluminio reciclado; por esta razón se aprecia en la Figura 8 los resultados de variación con respecto al Mg<sub>2</sub>Si a lo largo del *billet* debido a que el proceso

es incesante y la carga de material es intermitente durante la producción, obligando a controlar los niveles de aleación de forma continua para mantener los rangos máximos y mínimos de los elementos aleantes principales.

Esta diferencia del 25 % entre ambas aleaciones significó que la aleación «A» obtenga un límite de fluencia promedio de 66,73 MPa mayor al 21 % con respecto a la aleación «B» que alcanzó un límite de fluencia promedio de 52,70 MPa; sin embargo, no existió una diferencia significativa con respecto a su dureza en escala Brinell, porque la aleación «A» es apenas 0,55 % más dura que la aleación «B» 175 de acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla 3.

Al cuantificar los niveles de precipitados de Mg<sub>2</sub>Si a lo largo del *billet* homogeneizado tanto en la aleación «A» como en la aleación «B», y la medición de dureza Brinell, mostraron la existencia de una relación inversamente proporcional entre ambos; es decir, en puntos donde se registró un mayor porcentaje de peso promedio de Mg<sub>2</sub>Si demostró un menor nivel de dureza HB y en lugares con menor porcentaje de peso de Mg<sub>2</sub>Si se registró un mayor nivel de dureza HB.

### 4. Conclusiones

A lo largo de la investigación se logró mostrar la diferencia al tomar muestras de *casting* y *tundish*; indistintamente del tipo de aleación a ser producida es preferible tomar muestras de *tundish* cuando se precisa equiparar los niveles de aleantes principales.

A mayor temperatura de moldeo la velocidad de avance de mesa es menor y a menor temperatura de moldeo la velocidad de avance de mesa es mayor, lo que permite determinar la existencia de una relación directa entre temperatura en *tundish* y velocidad de avance de mesa.

La distribución longitudinal de los niveles de Mg y Si en los *billets* AA6063 después del proceso de homogeneizado, demostró la fluctuación de sus niveles a lo largo del proceso, revelando zonas de fluctuación en los valores de la aleación; otras zonas donde la aleación comienza a estabilizar sus niveles y luego otra vez muestra zonas donde la aleación presenta puntos de variación permitiendo inferir que su fluctuación a lo largo del *billet* son propios del proceso de colada continua horizontal.

La relación entre los niveles de precipitación de Mg<sub>2</sub>Si y el límite de resistencia a la tracción en el *billet* de aleación normal con un porcentaje de peso promedio de 0,863 en Mg<sub>2</sub>Si, registró un valor de 153 MPa; con respecto al *billet* con niveles de aleación experimental que mostró un valor promedio de 0,640 en porcentaje de peso de Mg<sub>2</sub>Si alcanzó un valor de 134 MPa como límite de resistencia a la tracción; ultimando que existe una relación directa entre los niveles

de precipitados de  $Mg_2Si$  con respecto al límite de fluencia y resistencia a la tracción.

La cuantificación de los elementos aleantes principales, permitieron mostrar la distribución longitudinal de estos a lo largo del *billet* de aluminio de aleación 6063 homogenizado, mostrando una buena distribución a pesar de su naturaleza propia como proceso de colada continua horizontal y determina que este equipo a pesar de ser diseñado por HERTWICH para un proceso normal de *remelting*, es posible obtener *billets* de calidad utilizando chatarra de aluminio reciclada.

## Agradecimientos

El presente estudio fue gracias a la colaboración de la empresa CEDAL S. A. en la ciudad de Latacunga, al facilitar sus instalaciones, materiales y la cooperación de su talento humano perteneciente a los departamentos de Fundición, Calidad, Matricería y Mantenimiento.

## Referencias

- [1] HERTWICH ENGINEERING SMS GROUP. (2016) The universal caster. [Online]. Available: [www.hertwich.com](http://www.hertwich.com)
- [2] M.J.G. (Jan. 2007) M.J.G'S technical recommendation, private communication.
- [3] P. Barrand, R. Gadeau, and A. Dumas, "Metalurgia estructural del aluminio," *Enciclopedia del Aluminio, vol. 2. PECHINEY GROUP, España: Ediciones URMO*, pp. 13–30, 39–57, 61–87, 89–94, 95–123, 2001.
- [4] S. E. Cordes, "Aluminum extrusion technology," Ed. Ohio, United States of America: ASM International, pp. 120–147, 2000.
- [5] K. Thanaporn, J. Pearce, M. Ponboon, and U. Phongsophitanan, "Quantification of precipitated phases in 6063 aluminium billet by image analysis for improvement of homogenization condition," *National Metal and Materials Technology Center, Bangkok, China*, 2008.
- [6] X. Fang, M. Song, K. Li, and Y. Du, "Precipitation sequence of an aged al-mg-si alloy," *State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University of Changsha, China*, 2011.
- [7] J. Arsenio Lozano and B. Suárez Peña, "Análisis cuantitativo y caracterización morfológica de la aleación 6063. diferencias microestructurales y mecánicas entre la superficie y el núcleo de barras cilíndricas de colada semicontinua," *Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Oviedo, España*, 2012.



# ROBOT SALAMANDRA ANFIBIO CON LOCOMOCIÓN BIOINSPIRADA

## ROBOTICS AMPHIBIOUS SALAMANDER WITH BIO-INSPIRED LOCOMOTION

Marco A. Luna<sup>1</sup>, Julio F. Moya<sup>1</sup>, Wilbert G. Aguilar<sup>2,3,4,\*</sup>, Vanessa Abad<sup>5</sup>

### Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un robot anfibio con una dinámica de movimiento bioinspirada en la locomoción de la salamandra (Cryptobranchidae). El robot es teleoperado mediante una aplicación para dispositivos móviles (Smartphones, tablets, etc.). Se propone una estructura que permita al robot llevar a cabo dos acciones: caminar y nadar. Los movimientos de una salamandra real se han estimado basándose en una cámara cenital y se ha diseñado un algoritmo de control de locomoción que replique esos movimientos. El desempeño del robot se ha evaluado utilizando como métrica el error cuadrático medio entre el movimiento del robot y de la salamandra obteniendo errores menores al 5 % en los ángulos de movimiento de la espina dorsal.

**Palabras clave:** cinemática, locomoción, robótica, robots anfibios, salamandra.

### Abstract

This paper presents the development of an amphibious robot with a motion dynamics bioinspired on the locomotion of the salamander (Cryptobranchidae). The robot is teleoperated by an application for handled devices. We propose a structure to perform two different motions: walk and swim. We extract the movements from a real salamander by a zenith camera, and a locomotion control algorithm is designed to reply this movements. We evaluate the performance of the robot in comparison with the real animal movements using the RMSE (Root Mean Square Error) as metric of evaluation. We obtain errors less than 5 % in the angles of backbone movement.

**Keywords:** Amphibious Robot, Kinematics, Locomotion, Robotics, Salamander.

---

<sup>1</sup>Departamento de Eléctrica y Electrónica DEEE, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>2</sup>Departamento de Seguridad y Defensa DESD, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>3</sup>Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>4,\*</sup>Grup de Recerca en Enginyeria del Coneixement GREC, Universitat Politècnica de Catalunya UPC, Barcelona – España. Autor para correspondencia ✉: [wgaguilar@espe.edu.ec](mailto:wgaguilar@espe.edu.ec)

<sup>5</sup>Departament de Genètica, Universitat de Barcelona UB, Barcelona – España.

Recibido: 01-11-2016, aprobado tras revisión: 20-12-2016

Forma sugerida de citación: Luna, M.; Moya, J.; Aguilar, W.; Abad, V. (2017). «Robot salamandra anfibio con locomoción bioinspirada». INGENIUS. N.º 17, (Enero-Junio). pp. 51-59. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

La salamandra es un anfibio cercano a los primeros tetrápodos [1], cuya dinámica de movimiento requiere un gasto energético bajo respecto a las dimensiones de su cuerpo, a diferencia de los robots terrestres de estructura cuadrúpeda [2, 3] o aéreos de estructura cuatirotores [4, 5]. Cuando la salamandra se desplaza en tierra, la forma de movimiento que utiliza es la reptación, es capaz de moverse utilizando pequeñas extremidades. La dinámica de movimiento de la salamandra es óptima desde el punto de vista de consumo energético y adaptable a diversos entornos [6, 7], por lo que algunos de los robots bioinspirados utilizan esta estructura.

Cuando la salamandra se desplaza en tierra el movimiento lo lleva a cabo coordinando las extremidades en forma de X (se mueven la pata superior derecha junto con la inferior izquierda y viceversa). Adicionalmente, la espina dorsal lleva a cabo un movimiento oscilatorio que contribuye al movimiento general de la salamandra. En agua, las extremidades son orientadas hacia la parte trasera permitiendo que la mayor parte del trabajo lo realice la espina dorsal [4]. Las patas de la salamandra gigante son pequeñas respecto a su cuerpo y no contribuyen significativamente a la locomoción del animal.

Estudios realizados en [9] y [8] muestran que la locomoción de la salamandra depende en mayor medida de la espina dorsal. En animales con extremidades pequeñas, la flexión lateral de la columna contribuye al movimiento en entornos acuáticos y facilita el movimiento en entornos terrestres [1]. En [10] se analiza la cinemática de la salamandra para usarla como base de algoritmos de locomoción en robots. En ese trabajo los autores utilizan técnicas de seguimiento de movimientos y calibración de cámaras de video.

En la literatura se puede encontrar un amplio número de robots inspirados en morfología animal como: serpientes [11–14], peces [15], langostas [16], hexápodos [17], entre otros. Algunos robots, presentados en [18] y [19], no tienen estructuras bioinspiradas, no obstante, se pueden desplazar en ambientes acuáticos y terrestres.

Existen pocos prototipos de robots salamandra como el descrito en [1] que cuenta con dos grados de libertad (DOF) para la columna vertebral, y dos para cada extremidad. Sin embargo, la movilidad de este robot es limitada y está enfocado en estudios biológicos. El Pleurobot presentado en [20] es un robot autónomo terrestre con cuatro grados de libertad en cada pata y utilizado en aplicaciones de rescate. En [21] se presenta un robot salamandra autónomo, capaz de caminar y nadar, con diseño hidrodinámico y modular. Algunos robots con patas y columna vertebral flexible son construidos por aficionados, con descripciones en Internet, no orientados a propósitos científicos.

Nuestro enfoque propone la utilización de materiales de bajo costo para la construcción de un robot teleoperado, con estructura modular hidrodinámica, utilizando un número de articulaciones reducido para simular el movimiento de la salamandra y desplazarse en entornos acuáticos y terrestres.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: En la siguiente sección, se presenta una descripción del diseño de nuestro prototipo propuesto. Los resultados y discusión son presentados en la sección 3 y, finalmente, la sección 4 está destinada a conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Diseño del prototipo

### 2.1. Diseño mecánico

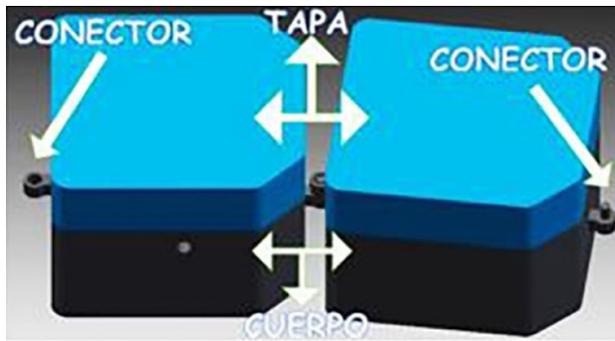
El sistema debe ser capaz de desplazarse en entornos acuáticos y terrestres, es decir, que debe ser impermeable. Para garantizar la impermeabilidad del sistema se llevaron a cabo pruebas en las que se sumergió en agua cada uno de los elementos, durante una hora, a una profundidad de un metro y se comprobó que no existiesen filtraciones. Otra de las características que el robot debe poseer es la flotabilidad. El esqueleto se ha construido con polietileno, un elemento con una densidad menor a la del agua ( $0,905 \text{ g/cm}^3$ ).

Cada una de las secciones del cuerpo de la salamandra ha sido diseñada en un *software* CAD (Computer Assistance Design) y se describen a continuación:

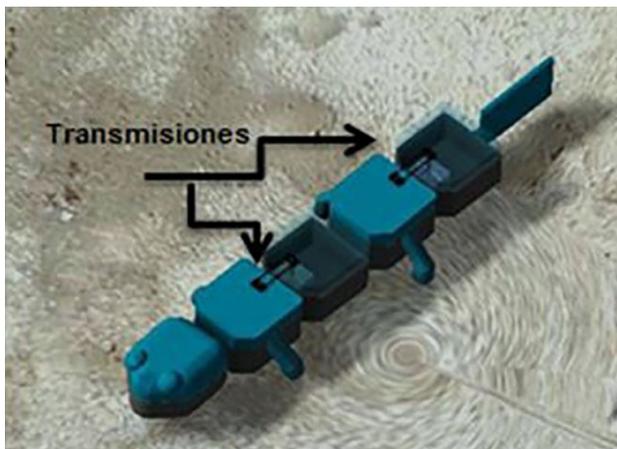
#### 1) *Espina dorsal*

La espina dorsal está constituida por cuatro módulos con el objetivo de alcanzar una flexibilidad comparable con la de la salamandra. Cada módulo contiene en su interior elementos mecánicos de transmisión de movimiento y componentes electrónicos que serán explicados en la sección 2.2. Los módulos se han diseñado con base en estructuras previas propuestas en [11], [22], [10], en las que cada módulo posee un DOF y está conformado por cuatro partes estructurales: cuerpo, tapa y dos conectores. (Figura 1). Los componentes mecánicos como electrónicos deben ser distribuidos en el interior de los módulos optimizando el espacio.

El diseño modular permite que las piezas puedan ser montadas y desmontadas de forma rápida. Los daños en un componente no comprometerán a todo el sistema. En la Figura 1 se puede observar que los módulos no son cúbicos sino poliedros lo que mejora su desempeño hidrodinámico. Los dos motores encargados del movimiento de la columna se encuentran acoplados a una transmisión tipo cadena en el interior de cada módulo. Estos motores son los responsables del movimiento de la espina dorsal como se muestra en la Figura 2.



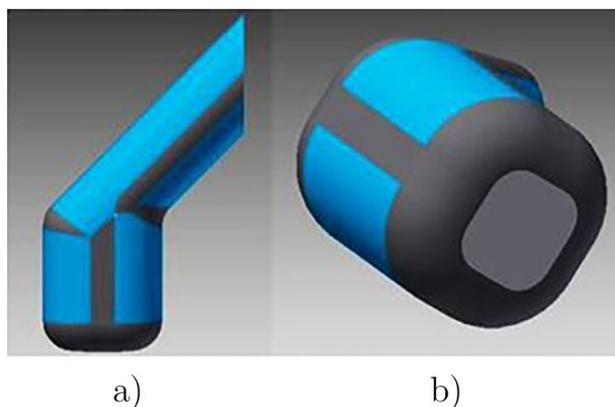
**Figura 1.** Partes estructurales del cuerpo. Los conectores tipo acople permiten la transmisión de movimiento entre módulos y la tapa brinda facilidad para montar y desmontar el circuito electrónico y los elementos mecánicos.



**Figura 2.** Elementos de transmisión de movimiento en el prototipo. Cada transmisión está acoplada a un motor para el movimiento.

## 2) Extremidades

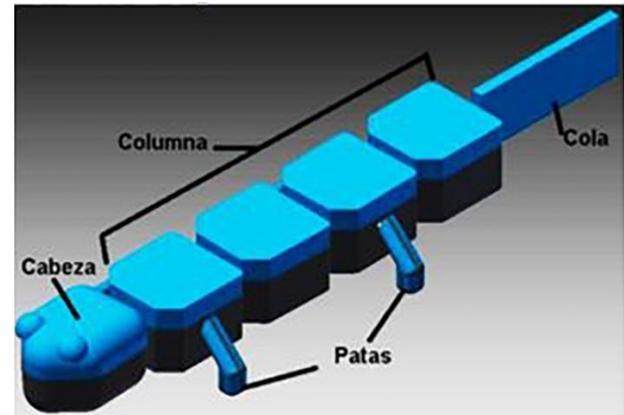
Las extremidades poseen un DOF y están unidas a los elementos del cuerpo a través de un eje. A diferencia del animal real, tienen la capacidad de rotar 360 grados, sin embargo, su función es similar. En la Figura 3 se puede observar el diseño 3D de las extremidades.



**Figura 3.** Extremidades. a) Vista frontal de las extremidades. b) Vista inferior del diseño 3D.

Durante la natación, las extremidades giran hacia atrás hasta alinearse con el cuerpo lo que permite al robot desplazarse con menor resistencia hidrodinámica. En la parte inferior poseen una superficie plana que maximiza el contacto con el suelo y la fricción necesaria para la tracción al caminar (Figura 3).

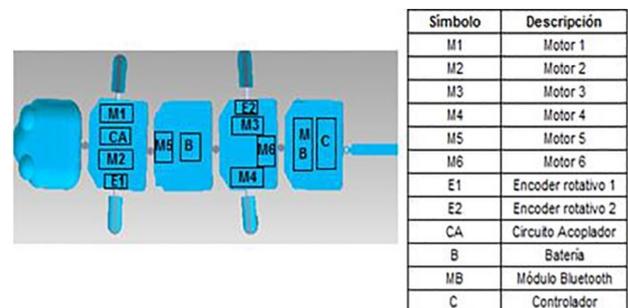
El diseño completo del prototipo se presenta en la Figura 4.



**Figura 4.** Cuerpo completo del robot salamandra. La cabeza y la cola son elementos que replican la morfología de la salamandra real, sin embargo, estos elementos no contribuyen a la dinámica de movimiento del robot.

## 2.2. Diseño electrónico e interfaz

El circuito del robot se alimenta de forma centralizada con una batería de litio para cuatro servomotores, un microcontrolador, dos encoders rotativos y un módulo bluetooth. La distribución de los elementos electrónicos se presenta en la Figura 5.



**Figura 5.** Distribución de elementos electrónicos en el cuerpo del robot.

Se implantó un circuito de acondicionamiento para regular el voltaje de la batería de litio de 9 a 5 V usado en la alimentación del microcontrolador y el módulo bluetooth. El microcontrolador posee una interfaz serial para la transmisión y recepción de datos a través de una aplicación en Android.

Los servomotores de las patas se han acondicionado para la obtención del giro de 360°. La posición y el giro

se controlan mediante PWM (modulación por ancho de pulso), con base en los datos obtenidos de un encoder rotativo electromecánico acoplado a una transmisión circular.

Para la selección del tipo de transmisión se realizaron pruebas utilizando engranes y poleas, cuyos resultados pueden ser observados en la sección 5.

En el movimiento oscilatorio y la posición de la columna se utilizan dos servomotores truncados controlados por una segunda señal PWM.

Se desarrolló una aplicación para dispositivos inteligentes que permite controlar al robot mediante comunicación bluetooth. La interfaz humano-máquina (HMI) desarrollada para teleoperación se presenta en la Figura 6.



**Figura 6.** Interfaz de teleoperación del robot. Antes de iniciar es necesario que el usuario se conecte al robot por medio de *bluetooth*.

La interfaz de teleoperación recibe los comandos de alto nivel y ejecuta las acciones de control con base en los algoritmos de movimiento. El prototipo implementado se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7.** Prototipo implementado del robot salamandra.

### 2.3. Algoritmos de movimiento

Con base en el movimiento observado en el animal, se han diseñado dos algoritmos de locomoción (uno para agua y uno para tierra), los mismos que se presentan a continuación:

---

#### Algoritmo 1 Control de locomoción en tierra

---

```

Input: Posición Encoder 1
Input: Posición Encoder 2
1: if Posición Encoder 1= 360 grados then
2: Detener M1, M4
3: Reiniciar Posición Encoder 2
4: else
5: Mover M1, M4
6: Giro M5 30 grados
7: Giro M6 -30 grados
8: end if
9: if Posición Encoder 2 = 360 grados then
10: Detener M2, M3
11: Reiniciar Posición Encoder 2
12: else
13: Mover M2, M3
14: Giro M5 -30 grados
15: Giro M6 30 grados
16: end if

```

---

---

### Algoritmo 2 Control de locomoción en agua

---

```

Input: Posición Encoder 1
Input: Posición Encoder 2
1: Mover M1, M4
2: Mover M2, M3
3: if Posición Encoder 1 = 90 grados then
4: Detener M1, M4
5: end if
6: if Posición Encoder 2 =90 grados then
7: Detener M2, M3
8: end if
9: Giro M5 30 grados
10: Giro M6 -30 grados
11: Retraso 0,5 segundos
12: Giro M5 30 grados
13: Giro M6 -30 grados
14: to 9

```

---

En el algoritmo 1, el movimiento de las patas se lleva a cabo de forma simultánea con la espina dorsal lo que magnifica el movimiento.

En el algoritmo 2, la oscilación de la espina dorsal es más rápida, las patas se ubican hacia atrás en posición de nado permitiendo al robot desplazarse con su columna vertebral.

#### 2.4. Comparación con otras propuestas

En la Tabla 1 se muestra una comparación de nuestro enfoque con prototipos propuestos en la literatura. Se analizan parámetros de diseño, debido a que en la literatura no se encontraron parámetros estandarizados de eficiencia.

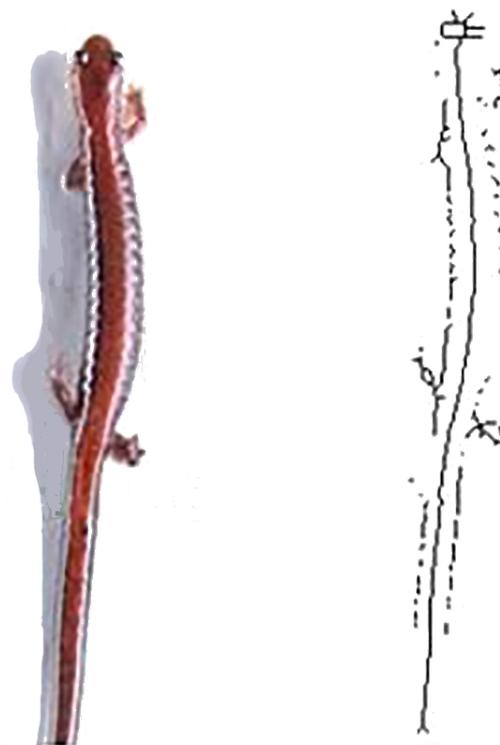
**Tabla 1.** Comparación del primer prototipo con robots presentados en la literatura

Robot	Columna vertebral	Extremidades	Número de motores
Robo-Salamander [1]	Posee 2 módulos principales. Baja funcionalidad	Un DOF en cada pata.	5 motores
Salamandra Robótica II [21]	Posee 9 módulos distribuidos a lo largo de la columna. Alta funcionalidad	Un DOF en cada pata.	12 motores
Pleurobot [20]	Posee 12 módulos en toda la columna. Alta funcionalidad	Cuatro DOF en cada pata.	19 motores
Nuestro Enfoque	Posee 5 módulos en la columna. Funcionalidad media	Un DOF en cada pata.	6 motores

En la Tabla 1 se observa la cantidad de módulos y motores utilizados en robots salamandra encontradas en la literatura. Nuestro prototipo presenta una complejidad media y utiliza un número reducido de elementos para su movimiento. El movimiento obtenido utilizando este diseño se ha comparado con el de una salamandra real; los resultados del desempeño del prototipo son presentados en la sección 3.

### 3. Resultados y discusión

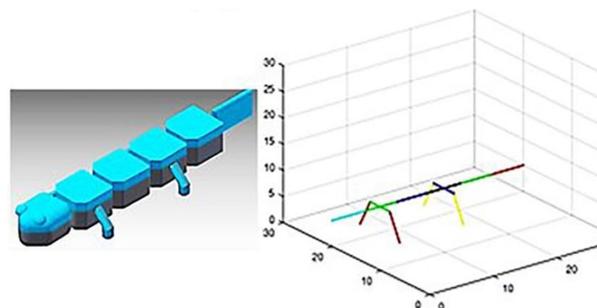
Para analizar y comparar el movimiento del robot con el movimiento de una salamandra real, se tomó como referencia un video en perspectiva cenital de la caminata de una salamandra real que se encuentra disponible en [26]. Utilizando morfología matemática se llevó a cabo la esqueletización de las imágenes obtenidas (Figura 8) y se extrajo el movimiento de la salamandra sin considerar sus extremidades.



**Figura 8.** Esqueletización de la imagen para comparación de movimiento. (a) Imagen original (b) Imagen esqueletizada.

#### 3.1. Simulación

Una vez adquiridos los datos del movimiento real del animal se realizó una simulación cinemática descomponiendo al robot en eslabones y articulaciones (Figura 9).



**Figura 9.** Descomposición en eslabones.

Esta simulación se la realizó mediante geometría computacional [23] utilizando el diseño propuesto.

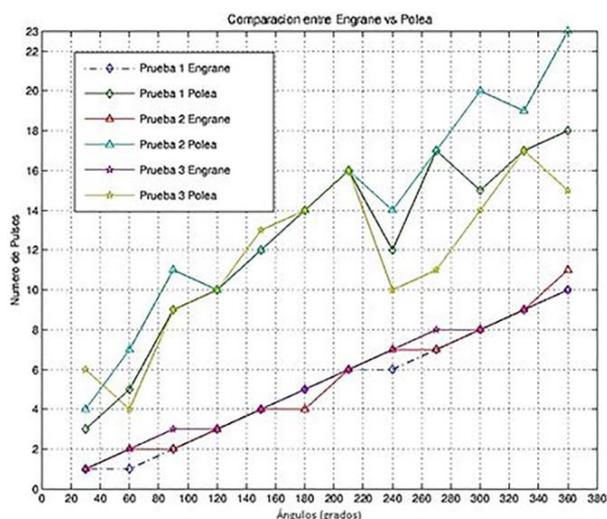
Una vez verificado el comportamiento cinemático del esqueleto de la salamandra se hizo una simulación CAD de la estructura completa.

### 3.2. Acoplamiento de encoder

Para la selección del acople del encoder se realizaron pruebas con dos tipos de transmisión: poleas y engranes. Se obtuvieron diferentes ángulos como respuesta al conteo de pulsos del encoder. Los resultados se muestran en la Tabla 2. Y de forma gráfica en la Figura 10.

**Tabla 2.** Comparación del primer prototipo con robots presentados en la literatura

Ángulos	Pulsos del encoder					
	Engranes			Poleas		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
30°	1	1	1	6	4	3
60°	2	1	2	4	7	5
90°	3	2	2	9	11	9
120°	3	3	3	10	10	10
150°	4	4	4	13	12	12
180°	5	5	4	14	14	14
210°	6	6	6	16	16	16
240°	7	6	7	10	14	12
270°	8	7	7	11	17	17
300°	8	8	8	14	20	15
330°	9	3	9	17	19	17
360°	10	10	11	15	23	18



**Figura 10.** Descomposición en eslabones.

Para un adecuado funcionamiento del acople se requiere que la respuesta del encoder sea lineal. Como

métrica de evaluación se tomó el coeficiente de determinación para la regresión lineal, cuya fórmula viene dada por la ecuación 1.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma_{XY}$  Es la covarianza de (X,Y)
- $\sigma_X$  Es la desviación típica de la variable X
- $\sigma_Y$  Es la desviación típica de la variable Y

El coeficiente de determinación es mejor mientras sea más cercano a 1. El promedio del coeficiente de determinación para las tres pruebas en engranes y poleas se muestra en la Tabla 3.

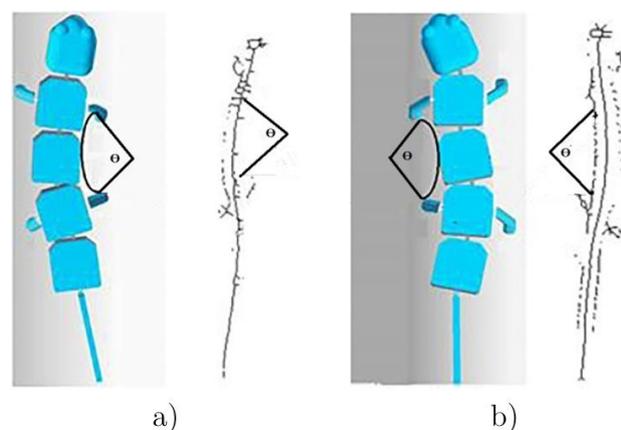
**Tabla 3.** Coeficientes de determinación promedio obtenidos en las pruebas

Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	
Engranes	Poleas
0,882	0,801

Basándose en los resultados obtenidos en la Tabla 3 se eligió la transmisión por engranes porque su  $R^2$  está más cerca del 1 en comparación con las poleas.

### 3.3. Comparación de movimientos

Se comparó los ángulos formados por la espina de la salamandra en el movimiento de derecha e izquierda al caminar (Figura 11). Los ángulos se midieron tomando como vértice el centro de la curvatura con un radio constante.



**Figura 11.** Comparación de movimiento del robot con una salamandra real. (a) Ángulo flexión derecha. (b) Ángulo flexión izquierda.

Se hicieron diez pruebas con la extracción de tres ciclos de movimiento de la salamandra real y se comparó con tres ciclos de movimiento del robot y la simulación (cada ciclo se definió como dos pasos hacia adelante de

la salamandra ya que se puede apreciar el movimiento de la columna hacia la izquierda y la derecha).

Los datos obtenidos de simulación (S), salamandra real (R) y del prototipo (P) se muestran en las Tablas 4, 5 y 6.

**Tabla 4.** Coeficientes de determinación promedio obtenidos en las pruebas

N.º	Ángulos de giro (radianes)					
	Derecha			Izquierda		
	R	S	P	R	S	P
1	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4
2	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4
5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
6	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
7	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4
8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
9	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
10	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4

**Tabla 5.** Coeficientes de determinación promedio obtenidos en las pruebas

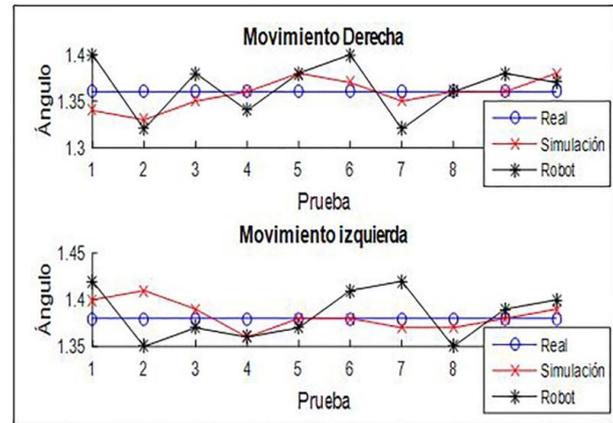
N.º	Ángulos de giro (radianes)					
	Derecha			Izquierda		
	R	S	P	R	S	P
1	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4
2	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4
3	1,4	1,41	1,4	1	1,4	1,4
4	1,4	1,4	1,3	1	1,4	1,4
5	1,4	1,4	1,5	1	1,4	1,4
6	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4
7	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4
8	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4
9	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4
10	1,4	1,4	1,4	1	1,4	1,4

**Tabla 6.** Coeficientes de determinación promedio obtenidos en las pruebas

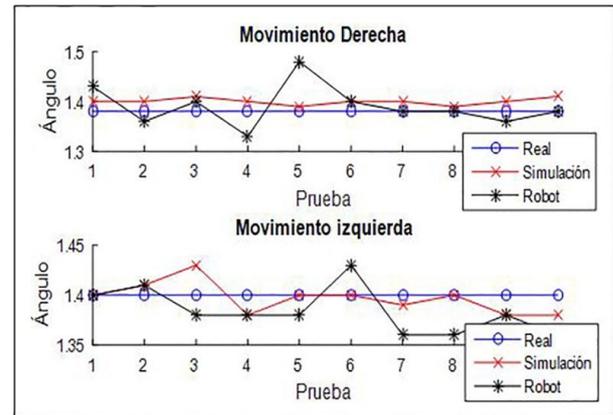
N.º	Ángulos de giro (radianes)					
	Derecha			Izquierda		
	R	S	P	R	S	P
1	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
6	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4
7	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
9	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
10	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3

En las Figuras 12, 13 y 14 se puede apreciar la variación en los ángulos para los tres ciclos de

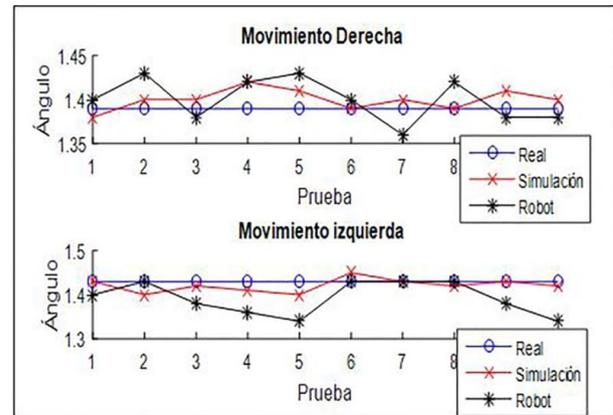
movimiento de acuerdo con los datos tabulados anteriormente.



**Figura 12.** Variación de ángulos durante el primer ciclo de movimiento.



**Figura 13.** Variación de ángulos durante el segundo ciclo de movimiento.



**Figura 14.** Variación de ángulos durante el tercer ciclo de movimiento.

Para determinar la precisión de los ángulos de movimiento se utilizó como métrica de evaluación el error cuadrático medio [24, 25], dado por la ecuación 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2} \quad (2)$$

En la Tabla 7 se muestran los resultados del RMSE obtenido para los diferentes ciclos de movimiento, se tabulan los errores obtenidos de la simulación y del robot con respecto al movimiento real de la salamandra.

**Tabla 7.** Cálculo del error cuadrático medio para los diferentes ciclos de movimiento

Ciclo	Movimiento	Sim./Robot	RMSE
1	Derecha	Simulación	0,015
		Robot	0,028
	Izquierda	Simulación	0,014
		Robot	0,026
2	Derecha	Simulación	0,021
		Robot	0,041
	Izquierda	Simulación	0,015
		Robot	0,027
3	Derecha	Simulación	0,015
		Robot	0,026
	Izquierda	Simulación	0,015
		Robot	0,052

Como se puede observar en la Tabla 7, el error máximo obtenido en la simulación es de 0,021, que representa aproximadamente el 1,5 % de ángulo de error con respecto al movimiento real de la salamandra, mientras que en el caso del prototipo, el error máximo obtenido fue de 0,052, lo cual representa el 3,5 % de error aproximadamente. El error medio obtenido en simulaciones y durante el movimiento del robot puede ser observado en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Cálculo del error medio en todos los ciclos de movimiento

Error medio (%)	
Simulación	Robot
1,14	2,40%

Con base en estos datos podemos decir que la implementación de nuestro diseño imita el movimiento de la salamandra con un error en los ángulos de 2,4 %

## 4. Conclusiones

La estructura de la salamandra adoptada al robot se traduce en un diseño sencillo para lograr que el prototipo propuesto como robot anfibio, tenga un buen desempeño en agua y en tierra.

El enfoque modular propuesto hace al prototipo versátil por utilizar dos diferentes tipos de elementos:

el cuerpo y las extremidades (patas), que facilitan la alimentación de los circuitos y hace que los módulos se adapten para construir distintos tipos de robots.

La transmisión circular-circular entre engranes proporciona un censado de ángulo de movimientos casi lineal al usar un encoder rotativo.

En el prototipo se evidenció la importancia del movimiento de la columna, en la caminata dio un empuje a las patas ayudando en la movilización y en la natación proporcionó velocidad al reproducir el movimiento.

La comparación de movimientos demostró la similitud entre los movimientos al caminar de una salamandra real con el prototipo, siendo la diferencia menor al 5 %.

El bajo presupuesto se tradujo en un diseño simple, con una aceptable funcionalidad; una mayor inversión mejoraría algunos aspectos, debido al conocimiento que ha proporcionado el estudio y el primer prototipo.

## Agradecimientos

El presente trabajo es parte del proyecto de investigación 2016 «Vehículo terrestre multipropósito no tripulado (MultiNavCar)» de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, dirigido por el Dr. Wilbert G. Aguilar.

## Referencias

- [1] R. Breithaupt, J. Dahnke, K. Zahedi, J. Hertzberg, and F. Pasemann, "Robo-Salamander - an approach for the benefit of both robotics and biology", *Proc. Fifth Int. Conf. Climbing Walk. Robot. their Support. Technol. CLAWAR 2002, 25-27th Sept. 2002*, no. January, p. 55, 2002.
- [2] W. G. Aguilar and C. Angulo, "Compensación de los Efectos Generados en la Imagen por el Control de Navegación del Robot Aibo ERS 7," *Memorias del VII Congr. Cienc. y Tecnol. ESPE 2012*, pp. 165–170, 2012.
- [3] —, "Compensación y Aprendizaje de Efectos Generados en la Imagen durante el Desplazamiento de un Robot," *X Simposio CEA de Ingeniería de Control*, 2012.
- [4] —, "Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles," *Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD), 2014 11th International*, pp. 1–6, 2014.
- [5] —, "Estabilización de video en micro vehículos aéreos y su aplicación en la detección de caras," *Memorias del IX Congr. Cienc. y Tecnol. ESPE 2014*, pp. 155–160, 2011.

- [6] R. Pfeifer, M. Lungarella, and F. Iida, "Self-Organization, Embodiment, and Biologically Inspired Robotics," *Science*, vol. 318, no. 2007, pp. 1088–1093, 2007.
- [7] A. J. Ijspeert, A. Crespi, and J.-M. Cabelguen, "Simulation and robotics studies of salamander locomotion: applying neurobiological principles to the control of locomotion in robots," *Neuroinformatics*, vol. 3, no. 3, pp. 171–195, 2005.
- [8] D. R. Carrier, "Action of the Hypaxial Muscles During Walking and Swimming in the Salamander *Dicamptodon ensatus*," *J. exp. Biol.*, vol. 180, pp. 75–83, 1993.
- [9] M. A. Ashley-Ross and G. V. Lauder, "Motor patterns and kinematics during backward walking in the pacific giant salamander: evidence for novel motor output," *Journal of neurophysiology*, vol. 78, pp. 3047–3060, 1997.
- [10] A. Crespi, "Design and Control of Amphibious Robots with Multiple Degrees of Freedom," *Optimization*, vol. 3786, 2007.
- [11] J. Monsalve, J. León, and K. Melo, "Modular snake robot oriented open simulation software," *4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, IEEE-CYBER 2014*, pp. 546–550, 2014.
- [12] P. Liljebäck, S. Fjerdingen, K. Y. Pettersen, and Ø. Stavdahl, "A snake robot joint mechanism with a contact force measurement system," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, no. 978, pp. 3815–3820, 2009.
- [13] N. Kamamichi, M. Yamakita, K. Asaka, and Z. W. Luo, "A snake-like swimming robot using IPMC actuator/sensor," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2006, no. May, pp. 1812–1817, 2006.
- [14] S. Yu, S. Ma, B. Li, and Y. Wang, "An amphibious snake-like robot with terrestrial and aquatic gaits," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2960–2961, 2011.
- [15] K. Hirata, "Development of Experimental Fish Robot," *Sixth International Symposium On Marine Engineering*, no. 650, pp. 711–714, 2000.
- [16] F. W. Grasso, T. R. Consi, D. C. Mountain, and J. Atema, "Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 115–131, 2000.
- [17] U. Saranlı, M. Buehler, and D. E. Koditschek, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. July, pp. 616–631, 2001.
- [18] A. S. Boxerbaum, P. Werk, R. D. Quinn, and R. Vaidyanathan, "Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: part I mechanical design for multi-mode mobility," *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1459–64, 2005.
- [19] S. Guo, S. Mao, L. Shi, and M. Li, "Design and kinematic analysis of an amphibious spherical robot," *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012*, pp. 2214–2219, 2012.
- [20] T. Horvat, "Control of a Salamander-Like Robot for Search and Rescue Applications," pp. 1–8.
- [21] A. Crespi, K. Karakasiliotis, A. Guignard, and A. J. Ijspeert, "Salamandra Robotica II: An amphibious robot to study salamander-like swimming and walking gaits," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 2, pp. 308–320, 2013.
- [22] A. Crespi and A. J. Ijspeert, "Salamandra Robotica: A biologically inspired amphibious robot that swims and walks," *Artificial Life Models in Hardware*, pp. 35–64, 2009.
- [23] W. G. Aguilar and S. Morales, "3D Environment Mapping Using the Kinect V2 and Path Planning Based on RRT Algorithms," *Electronics*, vol. 5, no. 4, p. 70, 2016.
- [24] W. G. Aguilar and C. Angulo, "Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles," *Neural Process. Lett.*, vol. 43, no. 2, pp. 459–477, 2016.
- [25] —, "Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles," *EURASIP J. Image Video Process*, no. 1, p. 46, 2014.
- [26] Shutterstock. Salamander walks across white surface, shot from above. Vibe Images. [Online]. Available: <http://www.shutterstock.com/es/video/clip-8807212-stock-footage-salamander-walks-across-white-surface-shot-from-above.html?src=rel/8807005:1/gg>.



# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE Y FRECUENCIA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA A ESCALA PARA LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE CUENCA

## IMPLEMENTATION OF A CONTROL SYSTEM OF VOLTAGE AND FREQUENCY FOR AN ELECTRICAL POWER SYSTEM OF SCALE OF THE UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

José Lucero<sup>1</sup>, Jorge Ñauta<sup>1</sup>, Marco Carpio<sup>2,\*</sup>

### Resumen

El presente artículo presenta la simulación e implementación de un controlador PID, mediante el uso del *software* MATLAB y LabView. El proceso controlado es un sistema eléctrico de potencia a escala, el cual se encuentra operativo en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca. El controlador descrito tiene el objetivo de mantener fijos los valores de frecuencia y voltaje producido por un generador síncrono y un motor trifásico acoplado por sus ejes mediante una banda, ante los distintos agentes externos de perturbaciones como la variación de la carga en la red eléctrica.

**Palabras clave:** control, frecuencia, tiempo real, voltaje, sistema eléctrico de potencia.

### Abstract

This paper presents the simulation and implementation of a PID controller by using the MATLAB and LabView software. The controlled process is an Electrical Power System scale, which is operating in the laboratories of the Universidad Politécnica Salesiana of Cuenca. The controller's purpose described is to maintain fixed the values of frequency and voltage produced by a synchronous generator and a coupled three-phase motor by their shafts by a band, to various external agents disturbances such as load variation in the power grid.

**Keywords:** Control, frequency, real time, voltage, Electrical Power System.

---

<sup>1</sup>Carrera de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

<sup>2,\*</sup>Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: [mcarpio@ups.edu.ec](mailto:mcarpio@ups.edu.ec)

Recibido: 09-30-2016, aprobado tras revisión: 20-12-2016

Forma sugerida de citación: Lucero, J.; Ñauta, J.; Carpio, M. (2017). «Diseño e implementación de un sistema de control de voltaje y frecuencia de un sistema eléctrico de potencia a escala para la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca». INGENIUS. N.º 17, (Enero-Junio). pp. 60-66. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

En los sistemas de generación eléctrica es importante mantener los valores de frecuencia y voltaje dentro de límites aceptables basados en una norma para garantizar una buena calidad de energía generada y así el correcto funcionamiento de los elementos eléctricos o electrónicos que se conecten a la red eléctrica; además, se debe poder controlar las variaciones que puede sufrir la frecuencia ante las variaciones de potencia activa o las de voltaje ante las variaciones de potencia reactiva, para lo cual existen los AVR (reguladores de voltaje automático), que son más de tipo comercial, por lo cual se propone el diseño e implementación de un controlador PID (proporcional, integral, derivativo), el cual tiene la función de mantener en un rendimiento deseado la planta (equipo o máquina que realiza una operación específica) que controla ante posibles perturbaciones. [1,2]

Un sistema de control [3] se puede diseñar por diferentes métodos para los cuales son de mucha utilidad programas de computadora como Matlab para la identificación, sintonización y simulación de los sistemas de control y LabVIEW para realizar las acciones de control en tiempo real y la interacción con el usuario por medio de una interfaz gráfica y con ello manipular las variables de interés como voltaje y frecuencia.

### 1.1. Sistema eléctrico de potencia a escala

- Descripción del sistema a controlar

La etapa de generación eléctrica que forma parte de un sistema eléctrico de potencia a escala se encuentra conformada por un primotor acoplado a un generador síncrono (12 polos) mediante sus ejes por una banda, las variables a controlar son la frecuencia y voltaje generado.

El primotor dentro del sistema a escala simula la acción que provocaría un caudal que en la vida real impulsaría a las paletas presentes en una turbina, la cual es representada por el generador, esto se lo puede observar en la Figura 1. Además, el sistema a escala cuenta con el sistema de transmisión y subtransmisión.

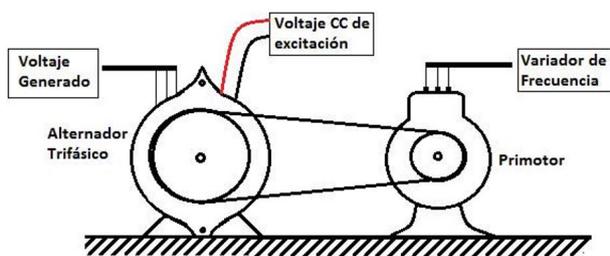


Figura 1. Planta a controlar.

- Funciones de transferencia de los sistemas de frecuencia y voltaje

Las funciones de transferencia de los sistemas fueron obtenidas mediante Matlab, de la misma manera los valores de las constantes del controlador PID. [3]

- Función de transferencia del sistema de frecuencia y constantes del controlador

Los datos con que se obtiene la función de transferencia aparecen mediante la medición de las revoluciones por minuto que se obtiene al aplicar voltaje a un variador de frecuencia que controla la velocidad de giro del primotor el cual mueve al generador, manteniendo la tensión de excitación constante. Realizando una variación de tipo escalón al voltaje aplicado se obtiene datos mediante LabView de las revoluciones por minuto los cuales son procesados mediante el comando «ident» en Matlab, obteniendo la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{1,0296}{1 + 1,0932 \times s} \quad (1)$$

Obtenida la función de transferencia mediante la herramienta de Matlab (Sisotools) se obtendrán las constantes del controlador (KP, KI, KD), dentro de esta opción permite hacer rápido o lento, robusto o no robusto al control según las consideraciones de diseño, en este caso se obtuvieron los siguientes valores de las constantes de control para la primera función de transferencia.

$$\begin{aligned} K_p &= 0,1981 \\ K_i &= 1,0506 \\ K_d &= 0,0212 \end{aligned}$$

- Función de transferencia del sistema de voltaje y constantes del controlador

La función de transferencia se obtiene mediante la medición del voltaje generado y la tensión de excitación, variando esta y manteniendo constante la frecuencia. Mediante el método de los puntos se obtiene la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{2,2612}{1 + 0,1835 \times s}$$

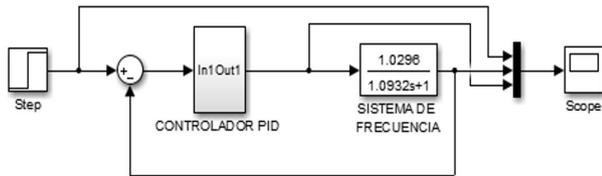
$$\begin{aligned} K_{p2} &= 0,85578 \\ K_{i2} &= 5,6421 \\ K_{d2} &= 0,0068517 \end{aligned}$$

## 2. Simulación del controlador PID

A continuación se procede a realizar la simulación de los controladores del sistema de frecuencia y voltaje por separado para verificar el funcionamiento y los tiempos de respuesta.

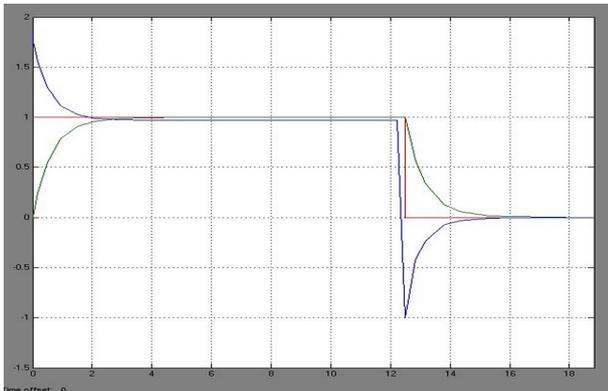
- Simulación del controlador PID con la función de transferencia del sistema de frecuencia

En la Figura 2 se presenta la simulación del controlador PID aplicado a la planta de frecuencia.



**Figura 2.** Simulación del controlador PID para el sistema de frecuencia.

En la Figura 3 se muestra como actúa el controlador PID (señal morada) y la respuesta de la planta ya controlada (señal verde).

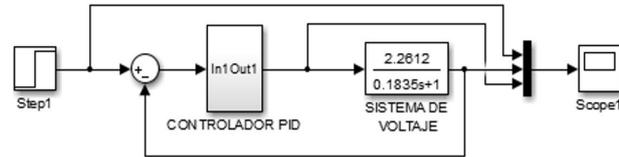


**Figura 3.** Respuesta del sistema de frecuencia y controlador.

Como se puede observar en la Figura 3 el tiempo de estabilización de la planta es aproximadamente de 2,5 segundos, este lapso de respuesta se puede considerar aceptable ya que el criterio en que se basa el desarrollo del controlador prioriza la precisión.

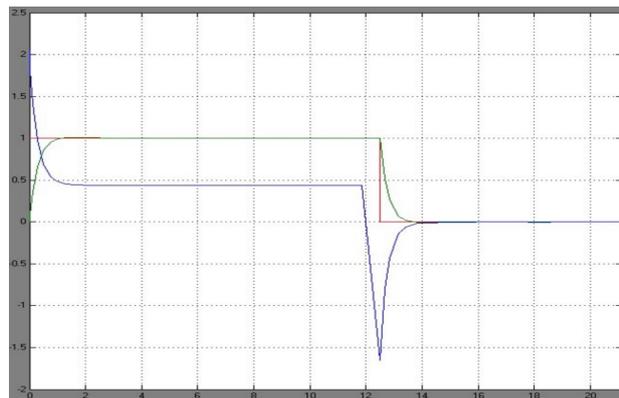
- Simulación del controlador PID con la función de transferencia del sistema de voltaje

En la Figura 4 se presenta la simulación del controlador PID aplicado al sistema de voltaje.



**Figura 4.** Simulación del controlador PID para el sistema de voltaje.

En la Figura 5 se puede observar la respuesta del controlador (señal morada) y la repuesta de la planta controlada (señal verde).



**Figura 5.** Respuesta del sistema de voltaje y controlador.

Como se puede apreciar en la Figura 5 el tiempo de estabilización de la planta del sistema de voltaje es aproximadamente de 1,3 segundos.

Se debe tomar en cuenta que en la vida real los tiempos de respuesta pueden variar, debido a que los dos controladores se van a relacionar.

## 3. Implementación

La implementación del sistema de control se logra mediante el uso de LabVIEW, el controlador PID se lo diseña por bloques, es decir, la acción proporcional, integral y derivativa se lo realiza por separado y se los coloca en paralelo para obtener la respuesta deseada tal como se puede observar en la Figura 6. Para la acción integral se basa en la integración trapezoidal, y para la acción derivativa se utiliza el método de diferencias finitas (diferencias hacia adelante).

Además de implementar el control, se realiza una interfaz gráfica para una interacción sencilla, tal como se muestra en la Figura 7.

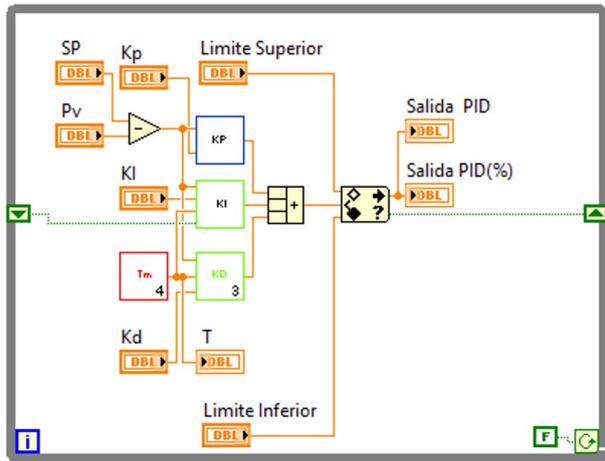


Figura 6. Implementación del controlador PID en LabVIEW.

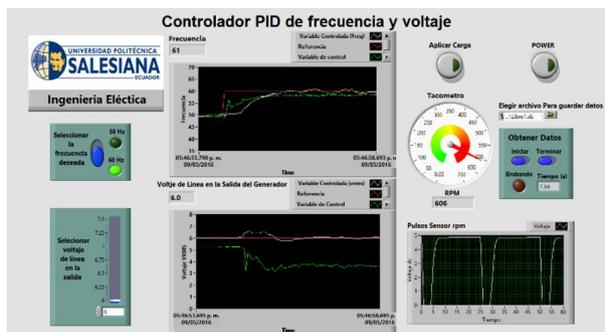


Figura 7. Interfaz del sistema de control en LabVIEW.

## 4. Análisis de resultados

En el presente bloque se indica las diferentes pruebas realizadas en LabVIEW con sus respectivos resultados analizados mediante Matlab.

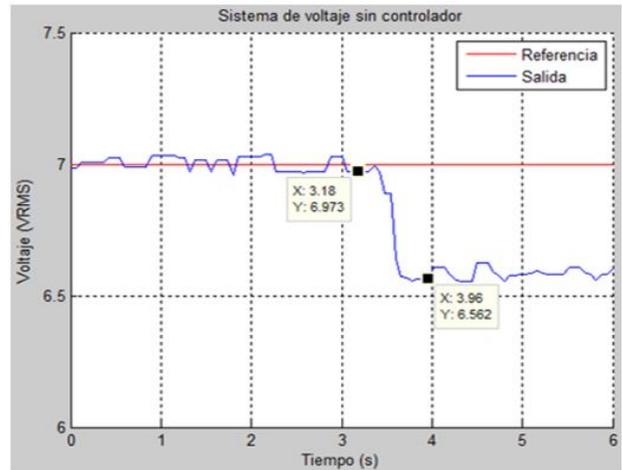
### 4.1. Comparación del sistema con y sin controlador

- Comparación del sistema con y sin controlador ante la conexión del generador al sistema de transmisión y subtransmisión

En este apartado se muestra de manera gráfica cómo es la reacción del sistema sin controlador y con controlador, para apreciar la funcionalidad del controlador implementado en el sistema eléctrico de potencia.

En la Figura 8 que no se muestra la gráfica de la frecuencia porque la frecuencia no se afecta cuando se conecta el sistema de transmisión y subtransmisión, lo contrario sucede con el voltaje debido a que el voltaje de salida en el sistema sin controlador tiene una caída de 352 milivoltios y que se transforman en una caída de 9,85 voltios en la etapa de amplificación, ya que

el transformador elevador tiene una relación de 1:28. Además, se puede observar que durante el régimen permanente existen unas variaciones, debidas a que la adquisición de las señales de los sensores se realiza cada 60 milisegundos por motivos de procesamiento en tiempo real de las mismas.



a)

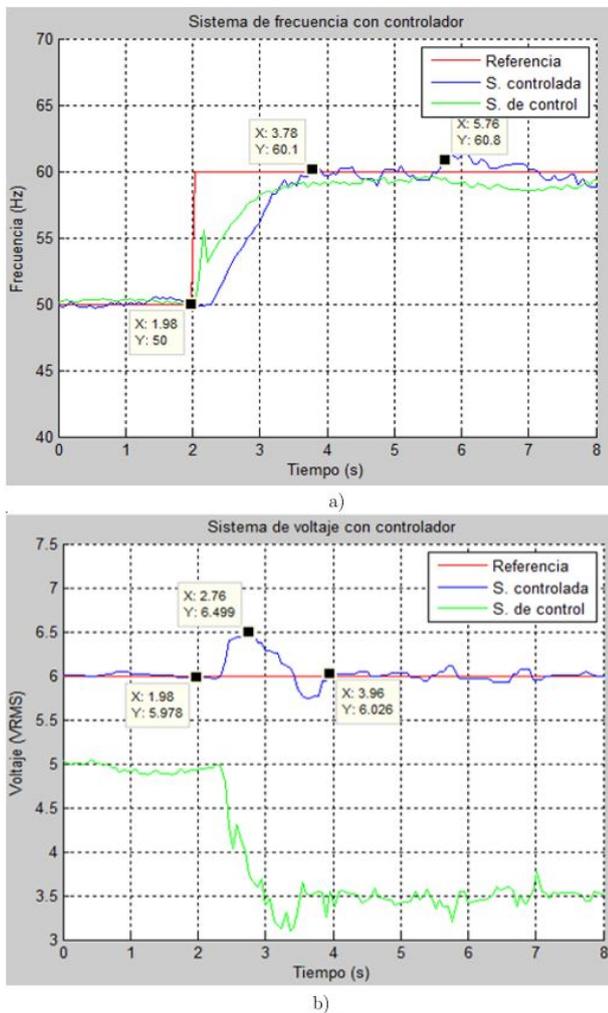


b)

Figura 8. Comparación del sistema con y sin controlador ante la conexión de carga al sistema, a) respuesta sin controlador, b) respuesta con controlador.

- Sistema sometido a un cambio en la referencia de 50 a 60 Hertz con 6 voltios en la salida

La prueba realizada a continuación muestra el desempeño del controlador, con el cual hacemos énfasis que nos basamos en la precisión más no en la velocidad de respuesta, dado que se busca no tener sobrepasos porque esto afectaría no solo al sistema de generación [4-6], sino a todos los equipos que podrían estar conectados a la red eléctrica a escala, y esto se puede observar en la Figura 9, en donde se varía la referencia de la frecuencia, cambiando de 50 a 60 Hertz.



**Figura 9.** Respuesta del sistema con controlador y sin carga ante una variación en la referencia de la frecuencia, a) respuesta de frecuencia, b) respuesta de voltaje.

En la Figura 9 se puede observar las tres señales presentes en el sistema, en donde: la curva roja es la señal de referencia, la azul es la señal controlada y la verde es la señal de control, que en el sistema de frecuencia corresponde a la conversión del voltaje enviado al variador de frecuencia, observando que es similar a la señal controlada, es decir, está por los mismos niveles, en cambio, la señal de control en el sistema de voltaje corresponde a la tensión que se manda a una etapa de potencia en donde se amplifica el voltaje en un 100 % con una capacidad de corriente necesaria para la excitación del generador.

En cada sistema los tiempos de establecimiento divergen del sistema calculado, es decir, para el sistema de frecuencia el tiempo de establecimiento es de 1,8 segundos y en el sistema de voltaje es de 1,98 segundos por ello para procesar los valores medidos se basó en el tiempo de mayor duración con el cual el sistema se recupera.

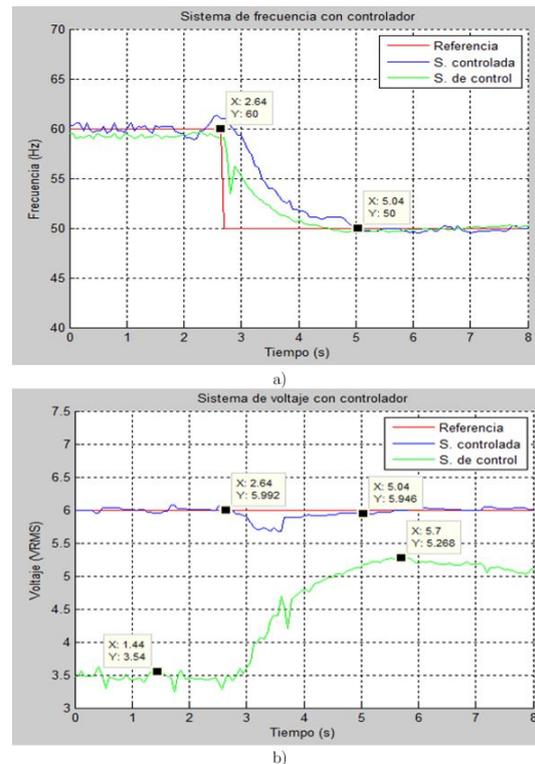
El sistema de voltaje se ve un poco afectado por el incremento de la frecuencia y esto se ve reflejado en los

sobrepasos de voltaje existentes, pero estos son corregidos por el controlador dentro de un tiempo aceptable según lo propuesto, dentro de este tiempo la respuesta varía aproximadamente en un rango de  $\pm 8\%$  del valor deseado.

- Sistema sometido a un cambio en la referencia de 60 a 50 Hertz con 6 voltios en la salida

En esta prueba se hace lo inverso que en la prueba anterior en relación del cambio de referencia de la frecuencia, obteniéndose lo indicado en la Figura 10.

En la comparación entre las Figuras 9 y 10 se puede observar que los tiempos de establecimiento varían, con lo cual se puede decir que el sistema se estabiliza de manera más rápida cuando se incrementa la frecuencia, asimismo, se puede notar cómo la frecuencia y el voltaje generados se correlacionan, es decir, un incremento o reducción repentina en la frecuencia provoca un incremento o decremento en el voltaje.



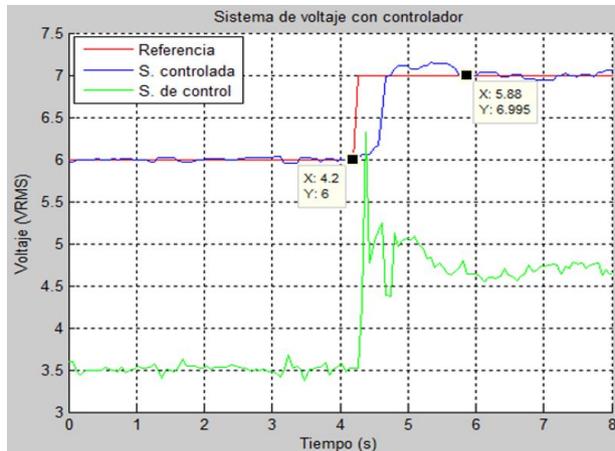
**Figura 10.** Respuesta del sistema con controlador y sin carga ante una variación en la referencia de la frecuencia, a) respuesta de frecuencia, b) respuesta de voltaje.

- Sistema sometido a un cambio en la referencia del voltaje de salida variando de 6 a 7 voltios

A continuación, se mostrará la reacción del sistema con el controlador cuando se realiza un cambio de referencia en el voltaje [7], en donde el sistema se encuentra generando 6 voltios de corriente alterna con una frecuencia de 60 Hz, y después de un instante se

cambia únicamente la referencia de 6 a 7 voltios de corriente alterna, de esta manera, obtenemos lo indicado en la Figura 11.

En la Figura 11 se puede apreciar cómo la señal de control inicia con un valor aproximado de 3,5 voltios y en un instante de tiempo (120 ms) pasa a un valor máximo aproximado a 6,4 voltios, la cual sirve para compensar el incremento realizado en la referencia. La variación se la realiza a los 4,2 segundos y se obtiene un valor estable a los 5,88 segundos, esto quiere decir que el sistema se estabiliza en un tiempo de 1,68 segundos.



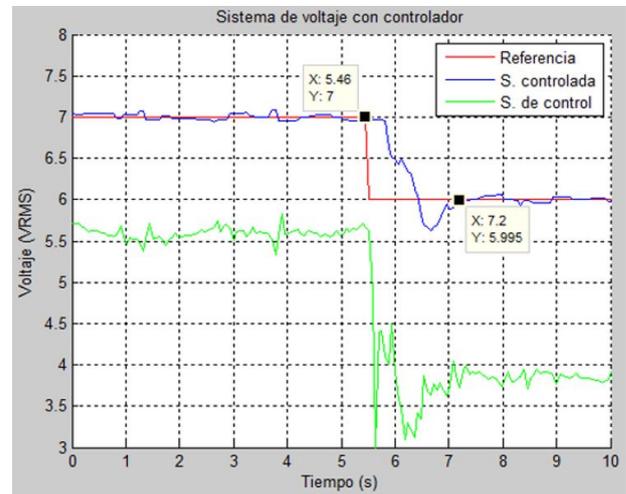
**Figura 11.** Respuesta del sistema con controlador y sin carga ante una variación en la referencia de voltaje.

Según los datos obtenidos se puede observar que los valores máximo y mínimo dentro de los instantes de tiempo 0 a 4,2 segundos y 5,88 a 8 segundos están dentro de valores tolerables debido a factores de adquisición, y el valor pico que tiene el voltaje hasta establecerse es de 7,15 voltios de alterna, lo que implica que el sistema se pasa de la referencia por 0,15 voltios, los mismos se reflejan como 4,2 voltios después que pasa la etapa de elevación.

- Variación de la referencia de voltaje de 7 a 6 voltios manteniendo constante la referencia de la frecuencia de 60 Hertz con carga

A continuación, en la Figura 12 se puede observar cómo el controlador se comporta ante un cambio en la referencia del voltaje deseado. En este caso el pico mínimo de voltaje es pronunciado, alcanzando el valor de 5,62 voltios de corriente alterna cuando debería estar cerca de los 6 voltios de corriente alterna, es decir, su caída de tensión está alrededor de un 6,4 %.

Al observar los valores obtenidos de la experimentación, el valor de la frecuencia no varía notablemente, los únicos valores críticos que existieron en esta experimentación se dieron durante el tiempo de transición que existe desde que se cambia la referencia hasta que el sistema es estable.



**Figura 12.** Respuesta del sistema con controlador y con carga ante una variación en la referencia de voltaje.

- Con disturbio en la frecuencia

A continuación, en la Figura 13 se muestra la reacción del controlador implementado en el sistema ante la introducción de un disturbio, este disturbio representa o hace analogía a una disminución crítica en el caudal en una central hidroeléctrica, por lo tanto, ante esta perturbación en nuestro caso el controlador da más tensión al variador de frecuencia para que incremente la velocidad de giro.

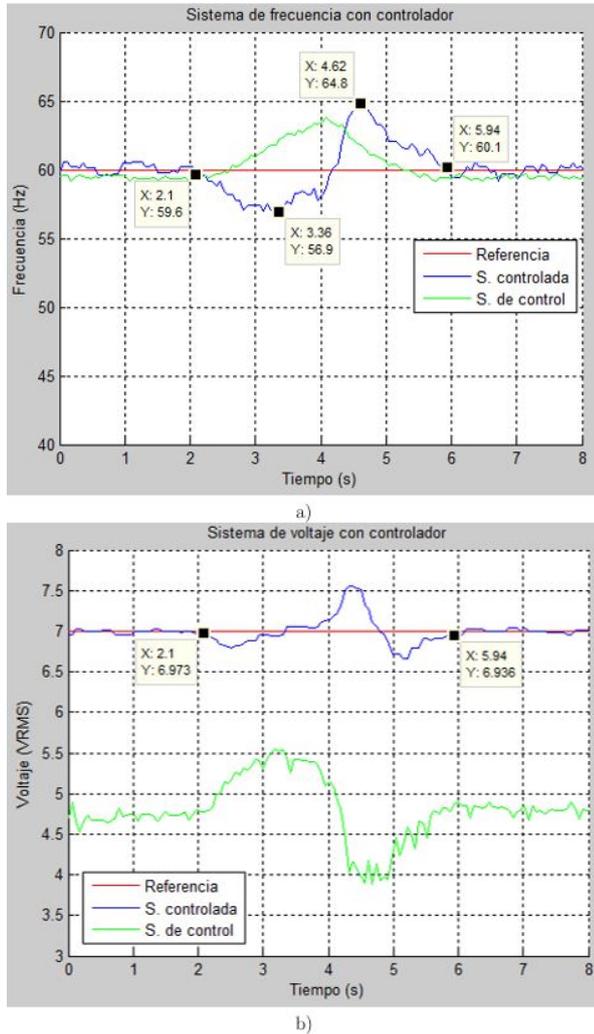
Según la Figura 13, ante una caída en la frecuencia de salida el controlador incrementa su señal para compensarla, lo mismo sucede en el sistema de voltaje, pero después de un instante el sistema de frecuencia llega a un pico máximo correspondiente a 64,8 Hertz, se eleva demasiado debido a la inercia propia existente en el generador.

## 5. Conclusiones

Las consideraciones para el cálculo de las constantes de control son un poco variables debido a la vibración propia de la máquina, sensibilidad y velocidad del sensor y por la correlación que existe entre el voltaje y la frecuencia; provocando la realización de ajustes pequeños en las constantes calculadas de los controladores; el ajuste realizado se basó mediante la prueba y error, tratando de obtener el mejor resultado. La velocidad de respuesta podría mejorarse si se adquiriera las señales del sensor con mayor rapidez.

El desempeño del controlador PID implementado tiene una respuesta satisfactoria a pesar de que al momento de acoplar los dos controladores aumentó el tiempo de respuesta, ya que por separado se tenía un tiempo de 1,2 segundos de estabilización y juntos aumentó a 1,8 segundos sin importar el tipo de perturbación. Una variación en la frecuencia (revoluciones

en el generador) implica una variación considerable en el voltaje generado, en cambio, cuando existe una perturbación en el voltaje no hay cambio en la frecuencia, y por medio de las pruebas realizadas se puede comprobar cómo el controlador actúa al mismo tiempo tratando de estabilizar la frecuencia y el voltaje generado por el sistema en los valores deseados.



**Figura 13.** Variación de ángulos durante el segundo ciclo de movimiento.

## Referencias

- [1] G. Silva, S. Datta, and Bhattacharyya, "Control System Design Using the PID Controller," pp. 191–222, 2005.
- [2] A. Robles and I. Fernández, "Centrales de generación de energía eléctrica," *Universidad de Cantabria*, pp. 6–7, 2012.
- [3] B. Kuo, *Sistemas de control automático*. Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [4] M. Álvarez and J. González, "Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad y voltaje utilizando Matlab," Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005.
- [5] M. A. Ashley-Ross and G. V. Lauder, "Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad y voltaje para la unidad 4 de generación de la central termoeléctrica Guangopolo," Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2013.
- [6] M. Álvarez, J. González, and J. D. Pozo, "Diseño e implementación de un sistema de control de frecuencia y voltaje," *Revista Tecnológica ESPOL*, vol. 20, pp. 47–55, 2007.
- [7] J. Bernal and M. Sánchez, "Construcción de un sistema de control de voltaje y frecuencia del generador síncrono Siemens, DM-SN/DG2240.Q4-R3 del laboratorio de máquinas eléctricas de la UPS, sede Cuenca," Universidad Politécnica Salesiana, 2010.



# MOBILE ROBOT WITH VISION BASED NAVIGATION AND PEDESTRIAN DETECTION

## ROBOT MÓVIL CON NAVEGACIÓN BASADA EN VISIÓN Y DETECCIÓN DE PEATONES

Marco A. Luna<sup>1</sup>, Julio F. Moya<sup>1</sup>, Wilbert G. Aguilar<sup>2,3,4,\*</sup>, Vanessa Abad<sup>5</sup>

### Abstract

This article proposes the design and implementation of a low-cost vision based navigation mobile robot that tracks pedestrians in real time using an IP camera onboard. The purpose of this prototype is the navigation based on people tracking keeping a safe distance by PID and on-off controllers. For the implementation we evaluate two pedestrian detection algorithms: HOG cascade classifier and LBP cascade classifier off-line and onboard the robot. In addition, we implement a communication system between the robot and the ground station. The metrics of evaluation for the pedestrian detection proposals were precision and sensibility, obtaining better results with HOG. Finally, we evaluate the communication system, computing the delay of the controller response; the results show that the system works properly with a transmission rate of 115200 bauds.

**Keywords:** AdaBoost, HOG, LBP, Pedestrian Detection, Urban Navigation.

### Resumen

Este artículo propone el diseño e implementación de un robot móvil con navegación basada en visión, de bajo costo, que sigue la trayectoria de peatones en tiempo real usando una cámara IP a bordo. El propósito de este prototipo es la navegación basada en el seguimiento de personas conservando una distancia segura a través de controladores PID y *on-off*. Para la puesta en marcha se evalúan dos algoritmos de detección de peatones: cascada de clasificadores HOG y cascada de clasificadores LBP, tanto fuera de línea como a bordo del robot. Adicionalmente, se implantó un sistema de comunicación entre el robot y una estación de tierra. Las métricas de evaluación para las propuestas de detección de personas fueron la precisión y sensibilidad, obteniendo mejores resultados con HOG. Al final, se evaluó el sistema de comunicación, calculando el retraso de la respuesta del controlador. Los resultados mostraron que el sistema trabaja adecuadamente para una tasa de transmisión de 115200 baudios.

**Palabras clave:** AdaBoost, detección de peatones, HOG, LBP, navegación urbana.

<sup>1</sup>Departamento de Eléctrica y Electrónica DEEE, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>2</sup>Departamento de Seguridad y Defensa DESD, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>3</sup>Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>4,\*</sup>Grup de Recerca en Enginyeria del Coneixement GREC, Universitat Politècnica de Catalunya UPC, Barcelona – España. Autor para correspondencia ✉: [wgaguilar@espe.edu.ec](mailto:wgaguilar@espe.edu.ec)

<sup>5</sup>Departament de Genètica, Universitat de Barcelona UB, Barcelona – España.

Recibido: 01-11-2016, aprobado tras revisión: 27-12-2016

Forma sugerida de citación: Luna, M.; Moya, J.; Aguilar, W.; Abad, V. (2017). «Mobile robot with vision based navigation and pedestrian detection ». INGENIUS. N.º17, (Enero-Junio). pp. 67-72. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introduction

Autonomous navigation is a research line with growing interest from DARPA Grand Challenge 2004. Several vision based vehicles have been developed [1–3]. There are a lot of challenges in urban navigation like perception [4, 5], obstacles avoidance [6, 7], people detection [8–11] and video stabilization [12–14].

Multiple pedestrian detection algorithms have been developed due their different applications that include: surveillance [15–17], driver assistance systems [11, 18, 19], robotics [20, 21], and others. According to [22] most approaches use detectors based on HAAR-like features [23], HOG [24, 25], LBP [26] and some combinations like: HOG-HAAR [27] or HOG-LBP [28]. In [29], HAAR-like features have a low performance in pedestrian detection task.

In this work, we experimentally test Histogram of Oriented Gradients (HOG) [24] and Local Binary Patterns (LBP) [26], feature extraction algorithms for pedestrian detection with Adaptive Boosting (AdaBoost), a supervised learning algorithm, applied in mobile robot navigation. The video is transmitted via Wi-Fi to a ground station to determine the motion direction of the robot using image processing, and the control actions are sent by Bluetooth from the computer to the robot.

The rest of the article is distributed as follows: In the next section, we do a review of the related work. In the section III, we make a review of two algorithms used for pedestrian detection. We describe our approach for robot development in the section IV. Finally the results obtained and the conclusions are presented in the sections V and VI.

## 2. Related Works

In the literature, there are several applications that integrate people tracking with mobile robots. A ground autonomous vehicle designed to track people based on a vision was proposed in [30], in this work the person to be tracked should wear a discriminable rectangle.

In [20], a mobile platform that uses a multiple sensor fusion approach and combines three kinds of sensors in order to detect people using RGB-D vision, lasers and a thermal sensor is presented. The mobile robot in [21] uses an omnidirectional camera and laser range finder to detect and track people. In [31] is introduced a robot to assist elderly people with a Kinect device and ROS packages. The detection and localization of people is an important aspect in robotic applications for interaction. The work presented in [32] deals with the task of searching for people in home environments with a mobile robot. The method uses color and gradient models of the environment and a color model of the user. Evaluation is done on real-world experiments with the robot searching for the user at different places.

We propose a simple structure robot (equipped only with a smartphone camera for navigation) capable of detect and track people orientation and translation based on pedestrian detection algorithms. In contrast with some works presented in the literature, our robot performs the navigation task using a PI control to achieve relatively fast speed, avoiding braking issues.

## 3. Pedestrian Detection Algorithms

### 3.1. Histogram of Oriented Gradients (HOG)

This algorithm is a feature descriptor for object detection focused on pedestrian detection and introduced in [24]. The image window is separated into smaller parts called cells. For each cell, we accumulate a local 1-D histogram of gradient orientations of the pixels in the cell. The gradient orientation is given by equations 1 and 1:

$$I_X = I \times D_X \quad I_Y = I \times D_Y$$

$$D_X = [1, 0, 1] \quad D_Y = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\phi = \alpha \tan(I_Y, I_X) \quad (2)$$

Where:  $I$  is the image and  $I_X$ ,  $I_Y$  are the derivatives of the image in  $x, y$ .

Each cell is discretized into angular bins according to the gradient orientation and each pixel of the cell contributes with a gradient weight to its corresponding angular bin. The adjacent cells are grouped in special regions called blocks and the normalized group of histograms represents the block histogram. Finally, the set of these block histograms represents the descriptor.

### 3.2. Local Binary Patterns (LBP)

This algorithm was presented like a texture descriptor for object detection. This compares a central pixel with the neighbors. The central pixel value is taken as threshold and a value of “1” is assigned if the neighbor is greater or equal to the central pixel, otherwise the value is “0”. In each pixel we set a weight of  $2^n$  according to the position respect to the central pixel [26]. The parameters of LBP operator are  $R$  and  $P$ , where  $R$  is the distance to the central pixel and  $P$  is the number of pixels [14]. LBP is defined mathematically as:

$$LBP_{P,R}(X_C, Y_C) = \sum_{P=0}^{P-1} s(g_P - g_C) \cdot 2^P \quad (3)$$

In the equation,  $g_P$  is the value of the central pixel,  $g_C$  the value of the neighbors and  $2^P$  is the weight established for each operation. And  $s(g_P - g_C)$  is given by:

$$s(g_P - g_C) = \begin{cases} 1 & g_P - g_C \geq 0; \\ 0 & g_P - g_C < 0 \end{cases} \quad (4)$$

### 3.3. Adaboost

Adaboost is a machine learning algorithm [33] that initially keeps uniform distribution of weights in each training sample. In the first iteration the algorithm trains a weak classifier using a feature extraction methods or mix of them achieving a higher recognition performance for the training samples.

In the second iteration, the training samples, misclassified by the first weak classifier, receive higher weights.

The new selected feature extraction methods should be focused in these misclassified samples. The final result is a cascade of linear combinations with selected weak classifiers:

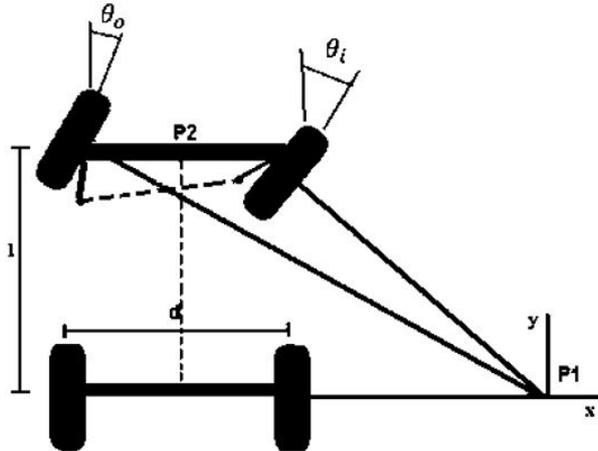
$$g(x) = \sum_{t=1}^T \varphi^t h^t(x) \quad (5)$$

where:  $h^t$  is a classifier, and  $\varphi^t$  is a coefficient.

## 4. Our Approach

### 4.1. Mobile Robotic Platform

We are using the Ackerman steering configuration for the robot [19], i.e. two wheels with rear haulage and two with front direction presented in the Fig. 1. The system is designed so that the interior front wheel in a gyre has an angle slightly sharper than the exterior, in order to avoid skidding; the normal wheels intersect at a point on extension of the axis of the rear wheels and make the toolpath for constant rotation angles.



**Figure 1.** Position of wheels in Ackerman steering configuration.

The relationship between the angles of the wheels of direction is in equation 6:

$$\cot \theta_i - \cot \theta_o = \frac{d}{l} \quad (6)$$

where:

$\theta_i$ = Relative angle of the inner wheel.

$\theta_o$ = Relative angle of an outer wheel.

$l$ = Longitudinal separation between wheels.

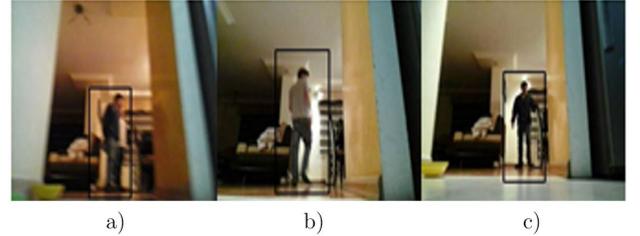
$d$ = Lateral separation between wheels.

For traction and steering control the system use Pulse Width Modulator (PWM) with Chopper configuration [34]. Additionally, there is a smart device (smartphone) camera for navigation.

The robot has two motors, one for forward/reverse displacement and other that controls direction. An H bridges circuit for motor control is implemented. The camera of smartphone is used as IP camera for image capture.

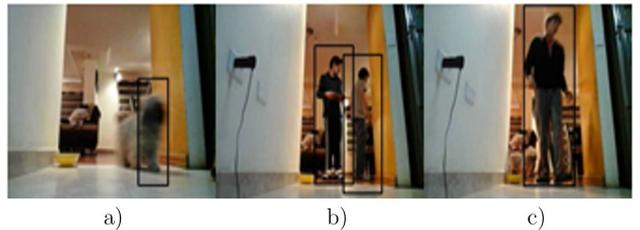
### 4.2. Pedestrian Detection

The feature extraction algorithms previously described are applied on the mobile robot to obtain an autonomous navigation system based on pedestrian tracking. We use Adaboost as machine learning method. It is an algorithm in machine learning based on the notion of creating a highly accurate prediction rule by combining many relatively weak and inaccurate rules [33]. Fig. 2 shows images of the HOG algorithm performance in the mobile robot.



**Figure 2.** Pedestrian detection with HOG algorithm. (a) Side detection of a person. (b) Back detection of a person. (c) Frontal Detection of a person.

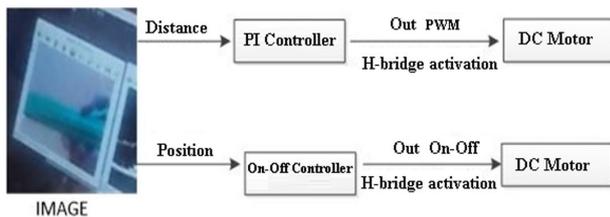
Performance of LBP algorithm in images captured from the mobile robot is presented on Fig. 3.



**Figure 3.** Fig. 3. Pedestrian detection with LBP algorithm. (a) Detection of a false positive. (b) Detection of two people. (c) Frontal detection of a person.

### 4.3. Controller

The mobile robot uses two main inputs for the controller (needed for 2D navigation [35]): horizontal position and distance obtained from the bounding box of the pedestrian detection. Horizontal position depends of x coordinate of the bounding box centroid and the distance depends of the width of the bounding box. We use PI control for the distance that reduces overshoot in order to have a soft controller. For horizontal position we use an on-off controller with hysteresis, i.e. with a band of maximum and minimum values in the output due to the variation range of the actuators is small and precision is not necessary (Fig. 4).



**Figure 4.** Robot navigation control scheme.

### 4.4. Communication

Wi-Fi communication is implemented for transmitting data from the IP camera to the computer. This is because Wi-Fi is able to send image data. In the other side we use Bluetooth communication to send control command from the computer to the robot. The transmission speed obtained from experimentation is 115200 baud. (See section 5).

## 5. Experimentation and Results

### 5.1. Pedestrian Detection

The performance of pedestrian detection algorithms was compared using online and offline videos. We are using recall and precision as metrics of evaluation. The formulas used are presented in equations 7 and 8 respectively.

$$recall = \frac{VP}{VP + FN} \times 100\% \quad (7)$$

$$precision = \frac{VP}{VP + FP} \times 100\% \quad (8)$$

where:

TP: true positives.

FN: false negative.

FP: false positives.

We realized two experiments, offline and online. For the online test, we used four different security cameras videos obtained from Internet. We captured

1000 frames separated in groups of 30 frames. For each group, we determined true positives, true negatives, false positives and false negatives using HOG and LBP algorithms. The image processing was realized with a 2.4 GHz processor and RAM memory of 4 GB. In the online test we recorded 7 minutes of video, i.e. 12600 frames, and the same procedure in offline test was performed. The results are presented in Table 1 and Table 2.

The Table 1 presents the results of recall of the detectors tested offline and online.

**Table 1.** Detection recall of the algorithms previously trained

Algorithm	Recall	
	Offline	Online
HOG + Adaboost	78%	74,20%
LBP + Adaboost	76,50%	75%

**Table 2.** Detection precision of the algorithms previously trained.

Algorithm	Accuracy	
	Offline	Online
HOG + Adaboost	76%	74%
LBP + Adaboost	73%	72%

The HOG precision test is better than LBP because LBP performance give more false positives in both cases (offline and online). The LBP algorithm compares image textures and confuses other objects with persons easily. HOG is a descriptor based on objects shape and focused principally on pedestrians [24], thus it has better performance but with higher computational cost. Based on the results, we choose HOG because the computational cost problem can be reduced using a processor with better characteristics.

### 5.2. Controller response and communication

During implementation of the robot, it was found that the response time of the controller varied according to Bluetooth transmission speed, the results of the test are presented in Table 3.

**Table 3.** Delay in the controller's response to different transmission speeds.

Transmission Speed (bauds)	Delay(s)
9600	≈ 2,5
14400	≈ 2
19200	≈ 1,5
56000	1
115200	≈ 0

It should be noted that the delays were measured according to the perceived response of the controller. A transmission rate of 115200 baud was chosen based on results.

## 6. Conclusiones

The HOG algorithm has better performance off-line; however, the implementation represents a higher computational cost. LBP had a lower performance offline but was not affected for online experiments. The false positive detection rate involves low precision.

Classical method of PI control provided a smooth braking control to keep a safe distance between the mobile robot and the pedestrian. On-Off control for the horizontal position is a simple controller that had a good performance maintaining the direction of the navigation.

A slow controller response endangered the safety of pedestrians, so it was necessary to increase the transmission speed obtaining better results. The response time also was affected by the parameters of the PI controller. People tracking algorithms have benefits in several applications. We can improve the algorithms for pedestrian detection, based on obtained results, with some techniques like specialized training or video treating, but this involves an increased computational cost.

## Acknowledgments

This work is part of the research project “Vehículo terrestre multipropósito no tripulado (MultiNavCar)” from Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, directed by Dr. Wilbert G. Aguilar.

## References

- [1] M. Bertozzi, A. Broggi, and A. Fascioli, “Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 1–16, 2000.
- [2] W. Aguilar and C. Angulo, “Compensación de los Efectos Generados en la Imagen por el Control de Navegación del Robot Aibo ERS 7,” *Memorias del VII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2012*, no. JUNE, pp. 165–170, 2012.
- [3] —, “Compensación y Aprendizaje de Efectos Generados en la Imagen durante el Desplazamiento de un Robot,” *X Simposio CEA Ingeniería de Control 1,2 Marzo, 2012*, pp. 165–170, 2012.
- [4] A. Geiger, P. Lenz, and R. Urtasun, “Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite,” *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3354–3361, 2012.
- [5] U. Franke, D. Gavrila, S. Görzig, F. Lindner, F. Paetzold, and C. Wöhler, “Autonomous driving goes downtown,” *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, vol. 13, no. 6, pp. 40–48, 1998.
- [6] U. Franke and I. Kutzbach, “Fast stereo based object detection for stop&go traffic,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 339–344, 1996.
- [7] W. Aguilar and S. Morales, “3D Environment Mapping Using the Kinect V2 and Path Planning Based on RRT Algorithms,” *Electronics*, vol. 5, no. 4, p. 70, 2016.
- [8] W. G. Aguilar and C. Angulo, “Estabilización de vídeo en micro vehículos aéreos y su aplicación en la detección de caras,” pp. 155–160, 2014.
- [9] D. Gavrila, J. Giebel, and S. Munder, “Vision-based pedestrian detection: the PROTECTOR system,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*, pp. 13–18, 2004.
- [10] a. Shashua, Y. Gdalyahu, and G. Hayun, “Pedestrian detection for driving assistance systems: single-frame classification and system level performance,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*, pp. 1–6, 2004.
- [11] D. Gerónimo, A. M. López, A. D. Sappa, and T. Graf, “Survey of pedestrian detection for advanced driver assistance systems,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 7, pp. 1239–1258, 2010.
- [12] W. G. Aguilar and C. Angulo, “Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles,” *Neural Processing Letters*, vol. 43, no. 2, pp. 459–477, 2016.
- [13] —, “Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2014, no. 1, p. 46, 2014.
- [14] —, “Robust Video Stabilization based on Motion Intention for Micro Aerial Vehicles,” *Systems Signals and Devices (SSD), 2014 International Multi-Conference on*, pp. 1 – 6, 2014.
- [15] T. Teixeira, D. Jung, and A. Savvides, “Tasking networked cctv cameras and mobile phones to identify and localize multiple people,” *Proceedings of the 12th ACM . . .*, pp. 213–222, 2010.
- [16] H. Torresan, “Advanced surveillance systems: combining video and thermal imagery for pedestrian detection,” *Proceedings of SPIE*, vol. 5405, pp. 506–515, 2004.

- [17] L. Zhang, B. Wu, and R. Nevatia, "Pedestrian Detection in Infrared Images based on Local Shape Features," *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 0–7, 2007.
- [18] D. M. Gavrila, "Pedestrian Detection from a Moving Vehicle," *System*, pp. 37–49, 2000.
- [19] M. Enzweiler and D. M. Gavrila, "Monocular pedestrian detection: Survey and experiments," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 12, pp. 2179–2195, 2009.
- [20] O. H. Jafari, D. Mitzel, and B. Leibe, "Real-Time RGB-D based People Detection and Tracking for Mobile Robots and Head-Worn Cameras," *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, no. May 2016, pp. 5636–5643, 2014.
- [21] M. Kobilarov, G. Sukhatme, J. Hyams, and P. Batavia, "People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2006, no. May, pp. 557–562, 2006.
- [22] Benenson, Rodrigo; Omran, Mohamed; Hosang, Jan; Schiele, Bernt, "Ten Years of Pedestrian Detection, What Have We Learned?" *Proceedings of the Computer Vision-ECCV 2014 Workshops*, pp. 613–627, 2014.
- [23] P. Viola and M. Jones, "Robust real-time face detection," *International journal of computer vision*, vol. 57, no. 2, pp. 137–154, 2004.
- [24] N. Dalal and W. Triggs, "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection," *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR05*, vol. 1, no. 3, pp. 886–893, 2004.
- [25] Q. Zhu, S. Avidan, M. C. Yeh, and K. T. Cheng, "Fast Human Detection Using a Cascade of Histograms of Oriented Gradients," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 1491–1498, 2006.
- [26] T. Ojala, M. Pietikäinen, and T. Mäenpää, "A generalized local binary pattern operator for multiresolution gray scale and rotation invariant texture classification," *Advances in Pattern Recognition*, vol. 2013, pp. 399–408, 2001.
- [27] C. Wojek and B. Schiele, "A Performance Evaluation of Single and Multi-feature People Detection," *Pattern Recognition*, vol. 11, no. 2, pp. 82–91, 2008.
- [28] X. Wang, T. X. Han, and S. Yan, "An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling," *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, no. Iccv, pp. 32–39, 2009.
- [29] P. Dollar, C. Wojek, B. Schiele, and P. Perona, "Pedestrian detection: an evaluation of the state of the art," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 34, no. 4, pp. 743–61, 2012.
- [30] Y. Aleksandrovich, "Mobile Robot Navigation Based on Artificial Landmarks with Machine Vision System," *World Applied Sciences . . .*, vol. 24, no. 11, pp. 1467–1472, 2013.
- [31] H. M. Gross, C. Schroeter, S. Mueller, M. Volkhardt, E. Einhorn, A. Bley, C. Martin, T. Langner, and M. Merten, "Progress in developing a socially assistive mobile home robot companion for the elderly with mild cognitive impairment," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2430–2437, 2011.
- [32] M. Volkhardt, S. Müller, C. Schröter, and H.-M. Groß, *Detection of Lounging People with a Mobile Robot Companion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 328–337.
- [33] R. E. Schapire and Y. Singer, "Improved boosting algorithms using confidence-rated predictions," *Machine Learning*, vol. 37, no. 3, pp. 297–336, 1999.
- [34] M. Hagiwara and H. Akagi, "PWM control and experiment of modular multilevel converters," *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, pp. 154–161, 2008.
- [35] W. G. Aguilar, R. Costa-castelló, and C. Angulo, "Control autónomo de cuadricopteros para seguimiento de trayectorias," *IX Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2014*, pp. 144–149, 2014.

## NORMAS PARA PUBLICAR EN LA REVISTA INGENIUS

Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

### Aspectos generales

1. Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.
2. La revista INGENIUS publica artículos relacionados con investigaciones culminadas, revisiones bibliográficas, informes de desarrollo tecnológico, ensayos científicos, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología.
3. La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos en español e inglés; es decir, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico.
4. Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.
5. Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.
6. Es indispensable presentar una carta dirigida al Consejo Editorial autorizando a la revista INGENIUS la publicación de la investigación, dando fe de la originalidad y de ser autor de la misma. Además, debe consignar constancia o credencial que confirme la adscripción a la Universidad o centro de investigación, tal como lo confirma el artículo.

7. Como reconocimiento a su aporte, a cada autor se le remiten dos ejemplares de la edición en la cual se publica el artículo.
8. El artículo propuesto se debe remitir a: <revistaingenius@ups.edu.ec> o <jcalle@ups.edu.ec>.
9. El sitio de consulta de ediciones anteriores de la revista es <<http://ingenius.ups.edu.ec/>>

### Requerimientos técnicos

10. Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word® (.doc o .docx) o L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X (.tex). Las plantillas a ser utilizadas pueden ser descargadas del sitio web de la revista.
11. Las ilustraciones y tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas.
12. Cuando presente el artículo, no intente diseñar el manuscrito. Use un tamaño de letra de 12 puntos en todo el manuscrito. Justifique el margen derecho.
13. Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.
14. Use doble “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.
15. No centre encabezamientos o subencabezamientos y déjelos estar alineados a la izquierda.
16. Las tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento, pero deben estar guardadas en un archivo separado. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será aproximadamente de 21 x 28 cm,

entonces sus tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

## Instrucciones para preparación de manuscritos

17. El manuscrito no debe tener más de 5000 palabras de extensión e incluir algunos o todos los siguientes elementos:

### Encabezamiento

- Título
- Autores y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja
- Resumen en español e inglés
- Palabras clave en español e inglés

### Cuerpo del trabajo

- Introducción
  - Fundamentación
  - Definiciones
  - Revisión de literatura
  - Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis
- Materiales, fuentes y métodos
  - Recopilación de datos
  - Tratamiento de las variables
  - Análisis estadístico
- Resultados
- Discusión
- Conclusiones

### Referencias bibliográficas

- Referencias

### Material adicional

- Elementos gráficos
  - Tablas
  - Agradecimientos
18. El artículo debe incluir en el encabezado: el ‘Título’, a continuación se debe informar los datos de cada uno de los autores con nombre completo, y con referencia al final de la página el título universitario de pregrado y el de posgrado más alto obtenido, cargo e institución donde labora, números telefónicos (convencional y celular), la dirección y correo electrónico. Si hay más que

un autor, indicar quien es el autor a quien la correspondencia debe ser enviada.

19. El ‘Resumen’ y el ‘Abstract’ deben ser en español e inglés, respectivamente en todos los manuscritos; deben ser de un solo párrafo, corto y conciso (máximo de 250 palabras) y resumir los resultados del artículo. Deben ser informativos no indicativos.
20. Las palabras clave serán de tres a seis y representarán los principales temas del artículo y deberán ser colocadas al final del resumen.
21. Las secciones de ‘Introducción’, ‘Materiales y métodos’, ‘Resultados’, ‘Discusión’ y ‘Conclusiones’ del artículo pueden estructurarse divididas en diferente forma. Si el artículo describe un estudio efectuado en un área particular, esta debe ser escrita en subencabezamientos bajo ‘Materiales y métodos’.
22. Los ‘Resultados’, ‘Discusión’ y ‘Conclusiones’ pueden ser en algunos casos combinados.
23. Los ‘Agradecimientos’ deben ser cortos, no deben exceder de un párrafo y se colocan al final del artículo.
24. Para la integración de citas dentro del artículo, debe usarse un corchete con un número en el interior, el mismo que hará referencia al documento de citación que constar en la bibliografía [1], y se irá colocando de forma ascendente. Cuando se trata de citas textuales se escribirá entre comillas con el texto en cursiva y a continuación se colocará el corchete con el número que corresponda siguiendo el formato de la IEEE.
25. Las ‘Referencias bibliográficas’ se colocan al final del texto, luego de la sección de conclusiones.
26. Las ‘Referencias bibliográficas’ se colocan ordenadas en orden de citación, de acuerdo el estilo de la IEEE.
27. Se debe verificar con cuidado que todas las citas colocadas en el texto, aparezcan en la lista de ‘Referencias bibliográficas’. En la lista solo deben aparecer las referencias que fueron utilizadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras, esto implica que no deben aparecer otras referencias aunque el autor las haya consultado durante la preparación del artículo.

28. La sección de ‘Referencias bibliográficas’ deberá incluirse en un archivo aparte sobre  $\text{\LaTeX}$ , proporcionando un archivo de información bibliográfica (.bib); o si el artículo está escrito sobre Microsoft Word<sup>®</sup> u otro procesador de texto, añadir una tabla en Microsoft Excel<sup>®</sup> (.xls o .xlsx). De esta manera, el formato de la revista para las referencias se coloca automáticamente, tal y como se muestra en algunos ejemplos a continuación.

## Referencias

- [1] R. Balasubramani and V. Kannan, “Efficient use of MPEG-7 color layout and edge histogram descriptor in CBIR systems,” *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 157–163, 2009.
- [2] S. Berretti, A. Del Bimbo, and P. Pala, “Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 225–239, 2000.
- [3] L. Graham, *Introduction to Mechanical Measurements*, Houston, 2006. [Online]. Disponible en: <http://cnx.org/content/col10385/1.1/>
- [4] T. Kijak, T. Furon, and L. Amsaleg, “Deluding image recognition in SIFT-based CBIR systems,” in *Multimedia in Forensics, Security and Intelligence (MiFor)*, Florence, Italy, October 29 2010.
- [5] M. Kozłowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, M. Muzyczek, and J. Barriga, “Future of natural fibers, their coexistence and competition with man-made fibers in 21st century,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 556, no. 1, 2012.
- [6] D. Tahmoush, “CBIR for mammograms using medical image similarity,” *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 7628, p. 8, 2010.
- [7] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, G. Jing, D. Yu, and S. Wang, “Effects on surface properties of natural bamboo fibers treated with atmospheric pressure argon plasma,” *Surface and interface analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1211–1217, 2006.

Para más detalles consultar:

<<http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>>

## Preparación de las figuras

29. Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi.
30. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.
31. Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación.
32. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.
33. Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.
34. Dibujos lineales y mapas deben ser preparados con tinta negra.
35. El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.
36. Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.
37. Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf)

## Procedimiento editorial

Para la publicación de artículos en la revista *INGENIUS*, su presentación y revisión se realiza con dos procedimientos:

38. Cuando el artículo ha sido recibido por el editor responsable, una primera revisión se realiza dentro de un consejo editorial interno que determinará la pertinencia y solvencia científica del

documento presentado, si este es aceptado en esta revisión se pasa al siguiente proceso.

39. El segundo proceso de revisión es la evaluación por expertos nacionales o extranjeros considerando el método *blind review* considerando los siguientes pasos:

- Al artículo se le asigna un número.
- El editor asigna el artículo a un miembro del consejo editorial interno, quien supervisará el proceso de revisión.
- El miembro del consejo editorial interno asignado solicitará dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, el revisor remitirá el informe hacia el miembro del consejo editorial interno en forma digital.
- El miembro del consejo editorial interno hace recomendaciones en base a todas las revisiones.
- Posteriormente el miembro del consejo editorial interno, presenta los formatos de revisión completos al editor responsable con las recomendaciones.
- El editor confirma o discute las recomendaciones.

- Una vez confirmado, el editor informa las recomendaciones al autor y hace llegar los comentarios de la revisión.
- El editor hace llegar una copia de las recomendaciones y comentarios de la revisión al miembro del consejo editorial interno y a todos los revisores.

40. Las revisiones para la revista INGENIUS son realizadas anónimamente; el autor recibe únicamente los comentarios de los revisores.

41. Si el revisor rechaza un artículo, se da una apropiada retroalimentación a el(los) autor(es).

42. El(los) autor(es) tiene una única oportunidad para mejorar un artículo haciendo las revisiones y correcciones necesarias; por lo tanto reciben de los revisores claros, concisos y completos comentarios para mejoras.

### Comentario final

43. La revista INGENIUS publica dos números por año en los meses de enero y julio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos para su revisión.

## GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE INGENIUS JOURNAL

The papers submitted to the INGENIUS journal must be adjusted to the following criteria:

### General criteria

1. Papers written by national or foreign researchers could be published if they accomplish the required scientific quality.
2. INGENIUS journal publishes articles related to complete research, literature reviews, reports of technological development, scientific papers, proposals for models and innovations and thesis results as long as they are a contribution to the field of Science and Technology.
3. The journal publishes original papers in English or Spanish, that is, they should not have been published before through any printed or electronic means.
4. All papers will undergo a rigorous process of arbitration and the evaluation, made according to the following criteria: originality, relevance, timeliness, contributions, scientific rigor and compliance with established publishers.
5. Being an arbitrated publication, the Editorial Board approves its publication based on the concept of specialized pairs. The receipt of a paper does not imply commitment to be published.
6. It is necessary to present a letter to the Editorial Board, authorizing the journal's publication of the research, attesting to the originality and to being the author of it. In addition, recorded evidence or credentials must be given to confirm the affiliation to the university or research center, as it is stated in the paper.
7. In recognition of his or her contribution, each author will receive two copies of the edition in which the paper is published.
8. The proposed paper should submitted to: <revistaingenius@ups.edu.ec> or

<jcalle@ups.edu.ec>.

9. The site to access previous published journals is: <http://ingenius.ups.edu.ec/>

### Technical requirements

10. Articles must be written using Microsoft Word® (.doc or .docx) or L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X (.tex). The templates to be used can be downloaded from the journal website.
11. The illustrations and tables should be numbered sequentially and include a narrative description for each. The equations in the article should also be numbered.
12. When submitting the article, do not try to design the manuscript. Use a font size of 12 points in the entire manuscript. Justify the right margin.
13. Use space after periods, commas and question marks.
14. Use double "enter" at the end of each paragraph and heading title. Do not use "enter" anywhere else, let the word processing program automatically break the lines.
15. Do not center headings or subheadings and let them be left aligned.
16. Tables should be created in the same program used for the body of the document, but must be stored in a separate file. Use tabs, not spaces, to create columns. Remember that the final size of printed pages is approx. 21 x 28 cm, and that your tables should be designed to fit the space of the final print.

### Instructions for preparing manuscripts

17. The manuscript should be no more than 5000 words in length and include some or all of the following elements:

## Header

- Title
- Authors and their institutional affiliation
- Abstract in English and Spanish
- Keywords in English and Spanish

## Body of work

- Introduction
  - Substantiation
  - Definitions
  - Review of the literature
  - Formulation of objectives and development of hypotheses
- Materials, sources and methods
  - Data collection
  - Treatment of the variables
  - Statistical analysis
- Results
- Discussion
- Conclusions

## Bibliography references

- References

## Additional material

- Graphic elements
  - Tables
  - Acknowledgment
18. The article must include the header title, and then the information from each of the authors: below the header the full name, and at the bottom of the page: the title, undergraduate degree and the highest obtained graduate degree, position and institution where the author works, telephone numbers (conventional and cellular), address and email. If more than one author exists, indicate who the principal author is to whom correspondence should be sent.
  19. The ‘Abstract’ should be in Spanish and English, respectively; all manuscripts must be a single paragraph, short and concise (maximum 250 words) and summarize the results of the article. The abstract should be informative not indicative.
  20. There will be three to six keywords to represent the main topics of the article and these should

be placed at the end of the abstract.

21. The sections of ‘Introduction’, ‘Materials and methods’, ‘Results’, ‘Discussion’ and ‘Conclusions’ may be structured differently. If the article describes a study in a particular area, it must be described in a subheading under ‘Materials and methods’.
22. ‘Results’, ‘Discussion’ and ‘Conclusions’ can be combined in some cases.
23. ‘Acknowledgment’ should be short, not to exceed one paragraph and placed at the end of the paper.
24. When using citations in the article, you must use a bracket with a number inside which would be included in the literature eg. [1], and it would be placed in ascending order. Textual citations must be used with quotation marks in italics and then use a bracket with the corresponding number in the IEEE format.
25. ‘References’ are placed at the end of the text, after the concluding section.
26. Las ‘References’ are placed and sorted in order of appearance.
27. It should be checked carefully that all citations are placed in the text and appear in the list of ‘References’. In the list should appear only references that were used in the main body of the paper, in tables or figures; this means that no other references should appear, even those ones that the author has consulted for the preparation of the article.
28. The section ‘References’ should be included in a separate file, for L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, provide the bibliographic information file (.bib); or if the article is written on Microsoft Word<sup>®</sup> or another word processor add a table on Microsoft Excel<sup>®</sup> (.xls or .xlsx). Thus the references format of the journal are automatically positioned, as shown in examples below.

## References

- [1] R. Balasubramani and V. Kannan, “Efficient use of MPEG-7 color layout and edge histogram descriptor in CBIR systems,” *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 157–163, 2009.

- [2] S. Berretti, A. Del Bimbo, and P. Pala, "Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 225–239, 2000.
- [3] L. Graham, *Introduction to Mechanical Measurements*, Houston, 2006. [Online]. Disponible en: <http://cnx.org/content/col10385/1.1/>
- [4] T. Kijak, T. Furon, and L. Amsaleg, "Deluding image recognition in SIFT-based CBIR systems," in *Multimedia in Forensics, Security and Intelligence (MiFor)*, Florence, Italy, October 29 2010.
- [5] M. Kozłowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, M. Muzyczek, and J. Barriga, "Future of natural fibers, their coexistence and competition with man-made fibers in 21st century," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 556, no. 1, 2012.
- [6] D. Tahmoush, "CBIR for mammograms using medical image similarity," *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 7628, p. 8, 2010.
- [7] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, G. Jing, D. Yu, and S. Wang, "Effects on surface properties of natural bamboo fibers treated with atmospheric pressure argon plasma," *Surface and interface analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1211–1217, 2006.
32. Different elements in the same figure should be spelled a, b, c, etc.
33. The photographs must be recorded with high contrast and high resolution. Remember that pictures often lose contrast in the printing process.
34. Line drawings and maps should be prepared with black ink.
35. The text figures and maps should be written in letters easily legible.
36. If the figures have been previously used, it is the responsibility of the author to obtain a permit to avoid further problems related to copyright.
37. Each figure must be submitted in a separate file, either as a bitmap (.jpg, .bmp, .gif, or .png) or vector graphic (.ps, .eps, .pdf)

For more details see:

<<http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>>

## Preparation of figures

29. Figures may be line drawings, maps and half tone photographs in black and white or color resolution of 300 dpi.
30. Do not combine photographs and line drawings in the same figure.
31. Design figures to eventually fit to the final size of the journal 21 x 28 cm. Make sure the registration or details as well as lines are set with appropriate sizes and thicknesses so that they are not unreadable when reduced to its final size. (numbers, letters and symbols should be reduced at least 2.5 high after the pictures have been reduced to fit the printed page). Ideally, line art should be prepared to approximately one quarter of its final size of publication.

## Editorial procedure

For publication of articles in the *INGENIUS*, submission and review is carried out with two procedures:

38. When the item has been received by the editor, a first review takes place with in a national editorial board to determine the relevance and scientific soundness of the submission, if this is accepted in this review it passes to the next process.
39. The second review process is the evaluation by national or foreign experts using the blind-review method following the next steps:
- The article is assigned a number.
  - The editor assigns the article to an internal editorial board member, who will oversee the review process.
  - The internal editorial board member assigns the article to two or more reviewers.
  - After reviewing the article, the reviewer forwards the report to the internal editorial board member in a digital format.
  - The internal editorial board member makes recommendations based on the reviews.
  - Subsequently, the internal editorial board member presents the complete review formats to the editor with the recommendations
  - The editor confirms or discusses the recommendations.

- Once confirmed, the publisher informs the author of there commendations and gets feedback from the review.
  - The editor makes a copy of the recommendations and commentaries which were made by the internal editorial board member and all the reviewers.
40. The reviews for the INGENIUS journal are made anonymously. The author receives only the reviewers' comments.
  41. If the reviewer rejects a paper, there is a proper feedback to the author.
  42. The author has a unique opportunity to improve an article by making revisions and corrections, so the reviewers use clear, concise and complete comments for improvements.

### **Final comment**

43. The INGENIUS journal publishes two issues per year in the months of January and July, so it is important to consider the dates for submission of articles for review.

## **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR**

Javier Herrán Gómez, sdb

Rector

©Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja

Casilla postal 2074

Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00

Fax: (+593 7) 408 89 58

Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

### **CANJE**

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:

Secretaría Técnica de Comunicación

Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja

Casilla postal 2074

Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182

Fax: (+593 7) 408 89 58

Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec

[www.ups.edu.ec](http://www.ups.edu.ec)

Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología, publicación semestral, N.º 17,

Enero/Junio 2017

Editor responsable: John Calle Sigüencia.

### **Diagramación y maquetación**

Marlon X. Quinde / Universidad Politécnica Salesiana

### **Fotografía de portada**

Laboratorio de Polímeros – Máquina de Extrusión / Universidad Politécnica Salesiana

### **Diseño de portada e impresión**

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.

Teléfono: (+593 7) 283 17 45

Cuenca – Ecuador

Correo electrónico: [centrograficosalesiano@lms.com.ec](mailto:centrograficosalesiano@lms.com.ec)

## OTRAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS DE LA UNIVERSIDAD

UNIVERSITAS, Revista de Ciencias Sociales y Humanas.

LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida.

ALTERIDAD, Revista de Educación.

RETOS, Revista de Ciencias de la Administración y Economía.

UTOPIA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.

