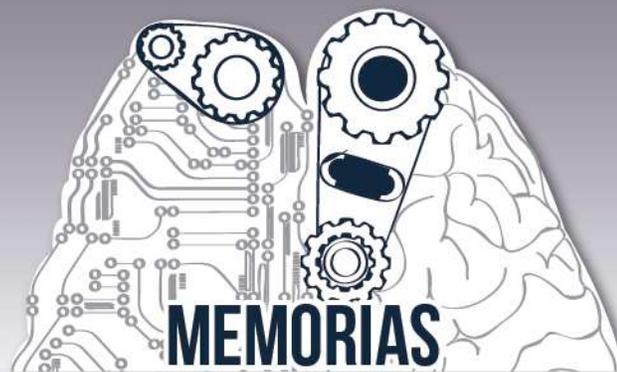




# INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO



TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN  
CULTURA Y VIDA.



## MEMORIAS

### EXPOTECNOLÓGICA 2016

• OCTUBRE 20, 21 Y 22 •

**IV** ENCUENTRO INTERNACIONAL DE  
**TECNOLOGÍA E  
INGENIERÍA**

**XII** SIMPOSIO  
INTERNACIONAL  
DE ENERGÍAS  
ENERGÍA RENOVABLE

**IV** EXPOSICIÓN  
DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN

**XXVI**  
MUESTRA TECNOLÓGICA

**XI** MUESTRA DE  
ROBÓTICA



## Contenido

Plataforma Electrónica para la Implementación y el Mejoramiento Permanente del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo – SG-SST en las Empresas .....	4
Aplicación para Administrar y Controlar un Sistema Inalámbrico como Nueva Herramienta de Aprendizaje y para Olimpiadas del Conocimiento .....	6
Creación de Comunidad de Práctica en Sistemas de Potencia a Través de Elementos de Gestión de Conocimiento .....	14
Textiles Electrónicos y Vestibles: Tecnología de Moda .....	20
Integración de Tecnologías Energéticamente Eficientes en Sistemas de Climatización Operados con Energía Térmica ..	28
Modelado de la Distribución del Tamaño de Partículas en un Molino de Bolas de Laboratorio .....	35
Análisis Computacional de una Turbina Hidrocinética de Eje Horizontal con y sin Difusor .....	37
Análisis Numérico Vía ANSYS De Intercambiadores De Calor Con Mejora Pasiva: Casos De Estudio Densidad Del Mallado Y Modelo De Turbulencia .....	41
Modelado Computacional de la Distribución de Campo para Procesos de Magneto-Estimulación en Germinación de Semillas .....	47
Caracterización del Material Ferroeléctrico Dieléctrico KNbO <sub>3</sub> : Propiedades de Interés para Aplicaciones Tecnológicas .	51
Evaluación Preliminar de los Factores que Afectan la Estabilidad de Nanofluidos para Aplicaciones de Transferencia de Calor .....	55
Secado Mecánico de Café con Deshumidificación por Bomba de Calor .....	61
Evaluación de los Tiempos de Carga y Descarga de las Baterías del Vehículo Eléctrico Rizoma con un Sistema de Adquisición de Datos .....	70
Sistemas Expertos para Atender las Fallas Mecánicas en un Sistema de Transporte por Cable Aéreo.....	76
Evaluación Energético-Ambiental de la Utilización de Iluminación LED en el Sector Residencial Colombiano .....	82
Generación de Energía Eléctrica Mediante Vórtices Gravitacionales .....	90
Una Aproximación a la Fabricación de Capacitores Eléctricos Mediante el Compuesto LiNbO <sub>3</sub> .....	107
Ubicación y Operación Eficiente de Almacenadores de Energía en Micro-Redes en Presencia de Generación Distribuida .....	110
Propiedades Estructurales y Eléctricas del Material Na <sub>0.9</sub> Li <sub>0.1</sub> NbO <sub>3</sub> : una opción para aplicaciones termoeléctricas ....	119
Madera, Bicicletas y Movilidad Sostenible: Una Aproximación al Diseño Concurrente Como Herramienta para la Innovación.....	124
Diseño de un Brazo Robótico de Posicionamiento para Apoyo en Tareas Industriales.....	132
Implementación de Sistema de Reconocimiento de Voz Empleando Software y Hardware Libre, Enfocado al Internet de las Cosas y la Automatización .....	134
Diseño y simulación de un “Amplificador Instrumental Operacional” como apoyo en la lectura y transmisión de señales mioeléctricas por un solo canal con bajo ruido .....	139
Caracterización de Sistema de Tratamiento de Señales Electromiográficas de Bajo Costo Empleado en la Activación de Prótesis de Miembros Superiores .....	146



Identificación de un Sistema Electromecánico e Implementación del Control PID para Gobernar Inalámbricamente el Movimiento de un Objeto Móvil, según una Trayectoria Arbitrariamente Seleccionada.....	152
Caracterización de Fases Minerales en Sulfuros Polimetálicos Mediante Tratamiento Digital de Imágenes .....	163
La Nube como Mecanismo de Monitoreo Remoto de Variables Ambientales Aplicada a un Deshidratador Solar.....	170
Medellín, Un Territorio STEM + H .....	177
La Magia de los Materiales Bidimensionales y su Gran Potencial en Aplicaciones para Ingeniería.....	181
Texturas Metálicas Inspiradas en Piel de Serpientes para Mejorar Desempeño Energético .....	182
Principales Modificaciones al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) .....	182
Arduino: Del Aula al Laboratorio Global .....	196
El Discurso de la Innovación Tecnológica y su Impacto .....	197



**IV ENCUENTRO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA  
& XII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ENERGÍAS – ENERGÍA RENOVABLE  
OCTUBRE 20 Y 21 DE 2016  
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO - IUPB**

**Plataforma Electrónica para la Implementación y el Mejoramiento Permanente del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo – SG-SST en las Empresas**

*Gonzalo Narváez Benjumea\*, Carlos Alberto Vásquez Londoño\*\* y  
William Orozco Murillo\*\*\**

*\*Docente Investigador Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM),*

*\*\*Asisge. Asesores en Sistemas de Gestión Integral y Jurídicos y*

*\*\*\* Docente Investigador Institución Universitaria Pascual Bravo (IUPB).  
Medellín – Colombia.*

*Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador. Campus Universitario de la Sede Principal del ITM*

*Contacto: (+57) 3016006648; e-mail: gonzalonarvaez@itm.edu.co*

## **Resumen**

El presente artículo es el resultado de uno de los objetivos planteados en el proyecto de investigación producción limpia y consumo sostenible en salud, el cual se viene implementando a través del ITM en tres hospitales en la primera fase y en tres clínicas en la segunda fase de aplicación, de los niveles III y IV de complejidad médica adscritas al clúster salud de Medellín.

Uno de los objetivos del proyecto mencionado es la evaluación y el mejoramiento del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), en las distintas Instituciones de salud beneficiadas del proyecto de investigación.

**Palabras claves:** sistema, gestión, seguridad, salud en el trabajo, producción limpia y consumo sostenible, mejoramiento.

## **1. Introducción**

Las instituciones prestadoras de los servicios de salud, además de las intervenciones para transformar las enfermedades en bienestar a las personas, son generadoras de una serie de impactos negativos ocasionados desde los diferentes procesos e insumos que se utilizan para llevar a cabo los procedimientos de atención médica y las demás actividades que soportan el objeto y la naturaleza social.

La implementación de mejores prácticas de responsabilidad social y ambiental en Clínicas y Hospitales del Clúster Salud de Medellín, orientadas desde la Producción Limpia y el Consumo Sostenible (PL&CS), es ratificado en Colombia desde el año 2010 a través de la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible, con el objeto de mejorar las prácticas de responsabilidad corporativa en empresas del sector público y privado, generar valor agregado desde la producción y el consumo sostenible de bienes y servicios, hacer un uso racional de los recursos naturales, prevenir riesgos y peligros que afecten la salud humana y el medio ambiente, e incrementar la productividad y la competitividad en las empresas de los distintos sectores económicos del país a nivel nacional y en los mercados internacionales [1].

Las condiciones inseguras en el trabajo y la ausencia de planes de mejoramiento para prevenir y controlar los factores de riesgos potencialmente peligrosos pueden ocasionar accidentes e incidentes de trabajo, enfermedades laborales, lesiones temporales o permanentes e incluso causar la muerte al personal expuesto, daños a los bienes de la empresa, reducción en la producción de bienes y servicios y una pérdida de la productividad y competitividad en las organizaciones productivas del país.

La normatividad actual en Colombia, Decreto 1072 de 2015, Capítulo 6 y el Decreto Ley 1443 de 2014, obligan a todas las empresas privadas y estamentos públicos, independientemente de su sector económico o tamaño, a gestionar, implementar, y mejorar continuamente un Sistema de Gestión en Seguridad y Salud en el Trabajo “SG-SST” [2]

En consecuencia, las compañías deberán adaptarse a esta nueva realidad y cumplir con las normas nacionales para no perder competitividad y no quedar relegadas ante los nuevos competidores nacionales e internacionales, para los cuales el cumplimiento legal es un estándar.

ASISGE, organización legalmente constituida y con amplia experiencia en el diseño, desarrollo y el mejoramiento de los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), a través de plataformas electrónicas integrando los sistemas de información

a la cultura propia de cada empresa, permitiendo que las actividades del día a día, estén enmarcadas y orientadas al mejoramiento continuo en tiempo real, acorde con lo establecido por la legislación colombiana. [3]

## 2. Metodología

La metodología utilizada por la firma ASISGE, para la implementación y el mejoramiento del SG-SST, en las empresas, se lleva a cabo a través del análisis de las siguientes fases:

- **Fase uno:** diagnóstico inicial de las condiciones de seguridad y salud en el trabajo frente a la realidad de la empresa versus lo requerido legalmente.
- **Fase dos:** elaboración de la matriz legal y de riesgos propios de la empresa.
- **Fase tres:** diseño, construcción y socialización de los procedimientos en SST.
- **Fase cuatro:** monitoreo y soporte tecnológico
- **Fase cinco:** generación, transferencia y divulgación de conocimientos en distintos eventos a nivel local, regional, nacional e internacional.

## 3. Resultados

La plataforma electrónica denominada SISOFT, le ha permitido lograr resultados de impacto en las empresas en donde se viene utilizando para la implementación y el mejoramiento de los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), en todo lo relacionado con la planeación, el registro, la inspección y el control de la información en tiempo real y la toma de decisiones en forma oportuna, garantizando la trazabilidad y la actualización automática de los datos y el análisis de la información necesaria para llevar a cabo los reportes e indicadores de gestión, generando precisión de la información y una mejor toma en las decisiones.

Para registrar los datos y el análisis de la información del SG-SST, se han documentado procedimientos estandarizados en el software diseñado para tal fin, con listas desplegadas y formatos, los cuales siempre estarán actualizados en la última versión y almacenados de forma segura.

Las funciones definidas del software están enfocadas al cumplimiento del Decreto 1072, Capítulo 6, teniendo presente los siguientes pasos:

- **Diagnóstico:** tomando como punto de partida el definido por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.
- **Matriz de riesgos y peligros:** se parte del referente establecido por la Guía Técnica Colombiana (GTC Nro. 45)
- **Matriz legal:** la empresa tiene la posibilidad de relacionar los aspectos normativos que debe cumplir en materia de seguridad y salud en el trabajo en cada uno de los procesos claves de gestión.
- **Grupos de apoyo:** los grupos de apoyo y de interés podrán llevar los registros de la información, los temas de las reuniones y los participantes en estas.
- **Indicadores de gestión:** Los indicadores son registrados una sola vez, SISOFT los calcula automáticamente en forma permanente, facilitando la información actualizada y la toma de decisiones oportunas por cada área o procesos clave de trabajo en las empresas objeto de la plataforma electrónica.
- **Definición de roles y responsabilidades:** control de los perfiles donde se detalla el objetivo del cargo, la formación, exámenes médicos, restricciones para el cargo y las responsabilidades básicas de seguridad y salud en el trabajo.

En la siguiente gráfica, se describe el contenido básico de la plataforma electrónica diseñada por la firma ASISGE, para la implementación y el mejoramiento del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), de acuerdo con los lineamientos legales en Colombia.



Figura: contenido básico de la plataforma electrónica ASISGE, según los requerimientos del Decreto Nro.1072 de 2015, Capítulo 6.

#### 4. Conclusiones

El tiempo y el manejo de la información en tiempo real, de tal forma que permita la toma de decisiones en forma oportuna y el mejoramiento del SG-SST, son de gran relevancia en las empresas contemporáneas, razón por la cual la plataforma electrónica SISOFIT, permite automatizar y dar respuesta inmediata al mejoramiento de las condiciones de trabajo y salud en el trabajo, en todos los aspectos relacionados con:

- La prevención de las enfermedades laborales, accidentes e incidentes en el trabajo.
- El mejoramiento del bienestar laboral en todos los trabajadores vinculados a las empresas
- El mejoramiento de la competitividad y la oportunidad de incursionar en diferentes propuestas económicas tanto nacional como internacionalmente.

Finalmente, garantizando el cumplimiento de la normatividad exigida en Colombia en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo.

#### 5. Agradecimientos

A los organizadores del simposio Internacional de la Institución Universitaria Pascual Bravo, al ITM y al Investigador principal del proyecto de investigación objeto del presente artículo, por extendernos la invitación a participar en el evento académico.

#### 6. Referencias Bibliográficas

- [1] Narváez B. Gonzalo, «ITM, fundamentación del proyecto de investigación producción limpia y consumo sostenible en el cúster salud de Medellín, mayo 22 de 2015.
- [2]. Ministerio del Trabajo y Seguridad Social de Colombia, Decreto Nro.1072, capítulo 6 [online]. 2015 [Citado el 02 de septiembre 2016]; Capítulo 6. Recuperado de: <http://mintrabajo.gov.co/normatividad/decreto-unico-reglamentario-trabajo.html>
- [3]. Asesores en Sistemas de Gestión Integral y Jurídicas. ASISGE

## Aplicación para Administrar y Controlar un Sistema Inalámbrico como Nueva Herramienta de Aprendizaje y para Olimpiadas del Conocimiento

### Application for Control and Administration of a Wireless Electronic System as a new tool for Learning and “Knowledge Olympics”

*Oscar Ignacio Botero Henao*

*Grupo de Investigación GICEI, docente Ocasional de la Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, [oscar.botero@pascualbravo.edu.co](mailto:oscar.botero@pascualbravo.edu.co)*

*Vesna Srdanovic*

*Grupo de Investigación GICEI, docente Ocasional de la Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, [vesna.srdanovic@pascualbravo.edu.co](mailto:vesna.srdanovic@pascualbravo.edu.co)*

*Julián Galeano Echeverri*

*Grupo de Investigación GICEI, docente Ocasional de la Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, [julian.galeano@pascualbravo.edu.co](mailto:julian.galeano@pascualbravo.edu.co)*

*Sergio Hernando Ruiz Obando*

*Grupo de Investigación GICEI, contratista de apoyo a los laboratorios de Electrónica de la Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, [sergio.obando@pascualbravo.edu.co](mailto:sergio.obando@pascualbravo.edu.co)*

## Resumen

Este trabajo tiene por objetivo dar a conocer los resultados parciales sobre el desarrollo de una aplicación que Administre y Controle un Sistema Electrónico Inalámbrico, que ofrezca apoyo logístico en actividades como: facilitar el quehacer pedagógico de los docentes de nuestra Institución Universitaria como una nueva estrategia para el aprendizaje de los discentes en el aula de clase, utilizarlo en eventos lúdicos y de concurso conocidos como olimpiadas del conocimiento ya que fomentan la sana competición, el trabajo en equipo a la vez que demuestran los conocimientos adquiridos (aplica para todo tipo de áreas del conocimiento); asimismo, ofrecer el servicio a otras instituciones o empresas e incluso poder ser comercializado. La finalidad del sistema electrónico inalámbrico será brindar agilidad, confiabilidad y transparencia para los participantes, los asistentes y el jurado del evento.

En dicho proyecto se exhiben dos frentes de trabajo que claramente apuntan al Modelamiento Computacional a niveles de Hardware y Software. A nivel de hardware se utilizaron de forma independiente los microcontroladores que utilizan las placas de Arduino UNO y se optimizó su código fuente de programación, se diseñaron los circuitos impresos con un software CAD (Diseño Asistido por Computador) y se realizó el diseño personalizado mejorando el futuro prototipo industrial de los paneles visualizadores y las consolas para los concursantes. Con respecto al software se está diseñando una aplicación que ofrezca prestaciones como: inscripción de concursantes, base de datos para las preguntas, las cuatro opciones y la respuesta correcta, las cuales pueden ser editadas en tiempo de ejecución, donde pueden ser incluidos gráficos, videos y ecuaciones, todas ellas categorizadas por áreas del conocimiento, comunicación inalámbrica full dúplex, procesamiento de información para generar el orden en que respondieron los concursantes y sus respectivos puntajes, puntaje acumulado, pantalla extendida y personalización del escritorio.

**Palabras claves:** comunicación inalámbrica, XBee, puerto serial, Arduino, interface, SQLite, escritorio extendido, bases de datos, shield.

## Abstract

This paper aims to present the partial results on the development of an application to manage and control a wireless electronic system, which provides logistical support for activities such as facilitating the pedagogical practice of teachers of our University as a new strategy for learning in the classroom, use in recreational and known competition events such as "knowledge Olympics" and promoting healthy competition, teamwork at the same time demonstrating the acquired knowledge (applies to all kinds of areas knowledge); also offer the service to other institutions or companies and even to be marketed. The purpose of the wireless electronic system will provide agility, reliability and transparency for participants, attendees and the jury of the event.

In this project, there are two work fronts which clearly point to Computational Modelling levels of hardware and software are displayed. In the hardware level we used independently microcontrollers using Arduino UNO boards and programming source code which was optimized, printed circuit boards with a CAD (Computer Aided Design) software were designed and custom design was improving future industrial prototype of the display panels and consoles for the contestants. The software has been designing to offers features such as: registration of contestants, database for questions, the four options and the correct answer, which can be edited at runtime, and can be included graphics, videos and equations, all categorized by areas of knowledge, wireless full-duplex communication, information processing to generate the order in which the contestants responded and their respective scores, cumulative score, extended screen and desktop customization.

**Keywords:** Wireless communication, XBee, Serial Port, Arduino, interface, SQLite, extended desktop, DataBase, Shield.

## 1. Introducción

El semillero responsable del proyecto de investigación es SICEI (Semillero de Investigación en Ciencias Electrónicas e Informáticas), adscrito al grupo GICEI (Grupo de Investigación en Ciencias Electrónicas e Informáticas) de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El tipo de proyecto está contemplado como un Desarrollo Tecnológico o Experimental.

Para contextualizar el proyecto; se observa claramente que las jornadas académicas y culturales en las instituciones educativas son espacios propicios para la realización de olimpiadas o concursos del conocimiento, donde los estudiantes participan de forma activa, fomentando su aptitud hacia el aprendizaje y la competición, es por ello que en la institución se creó un evento llamado Olimpiadas en Matemáticas que se lleva a cabo en el marco de las jornadas Pascualinas. En los años 2014 y 2015 se llevaron a cabo la primera y segunda Olimpiada en Matemáticas; donde surgió la necesidad de diseñar e implementar un sistema electrónico, como parte de la logística del evento. En la Fig.1 se expone claramente el propósito de la implementación del proyecto.

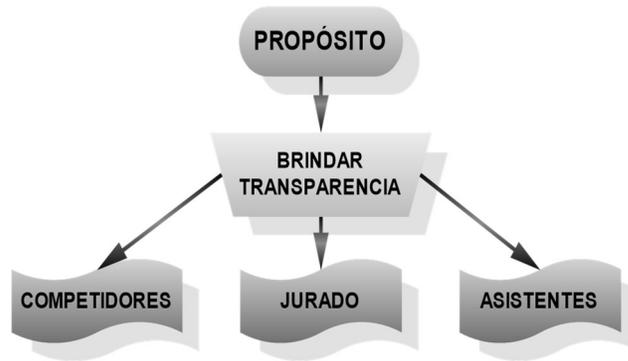


FIGURA 1. PROPÓSITO DEL SISTEMA INALÁMBRICO EN LAS OLIMPIADAS  
[Fuente: diseño propio]

El primer sistema electrónico diseñado fue en su mayoría alámbrico, solo se tuvo comunicación inalámbrica entre la consola de los jurados y el sistema central de procesamiento; para la segunda versión se realizó la optimización del diseño utilizando tecnología inalámbrica entre las consolas de los concursantes y la de los jurados, la cual contenía el sistema central de procesamiento. Dicho sistema funcionó de forma exitosa y se observó la necesidad de mejorar la estética y de optimizar el funcionamiento, integrando una aplicación (software) para administrar y controlar el sistema.

El sistema electrónico optimizado continúa utilizando cinco consolas con botones pulsadores, por medio de los cuales los concursantes ingresan la respuesta elegida de tipo selección única; la consola para el jurado y el módulo central de procesamiento de datos se reemplazará por la aplicación instalado en un portátil que controlará el sistema en su conjunto (inscripción de concursantes, base de datos con el banco de preguntas, opciones y respuesta correcta, control de tiempo, puntaje de los concursantes, corrección de preguntas en tiempo real, etc.). Para la visualización de datos se utilizará una herramienta llamada pantalla extendida o dual, desde la cual el jurado controlará la pantalla de visualización para el público; igualmente, al frente de cada concursante se tendrá un panel de visualización de la respuesta que eligió y del puesto obtenido en cada ronda del concurso.

A nivel de hardware se optimizará el código fuente perteneciente a los microcontroladores, que serán ubicados en cada uno de los paneles visualizadores que poseen los concursantes, minimizando costos para el proyecto ya que se sustituirá la placa Arduino UNO y el shield Arduino – XBee por el Microcontrolador ATmega328 de forma independiente, que conectará todo el sistema de potencia y el microcontrolador con el módulo de transmisión inalámbrica de radio frecuencia (RF).

El sistema electrónico inalámbrico tendrá características tales como: facilidad en el montaje, mantenimiento y transporte. Complementado con la aplicación que administrará y controlará el sistema y su interacción.

## 2. Materiales y métodos

El proyecto consta de dos grandes bloques como se observa en la Fig. 2, donde se concatenan el hardware que lo abarca el área de la Electrónica y el software en el área de Desarrollo de Software, que diseñará la aplicación que se encargará de administrar y controlar el sistema electrónico inalámbrico. Estas dos áreas son las líneas de investigación que hacen parte del semillero.

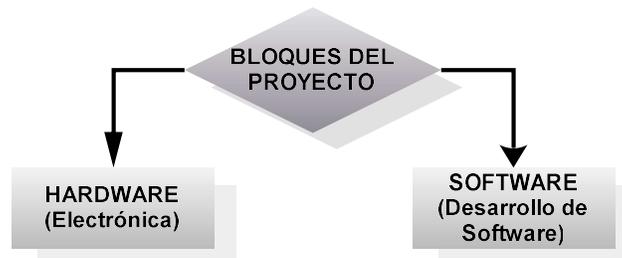


FIGURA 2. BLOQUES DEL PROYECTO  
[Fuente: diseño propio]

En el bloque de hardware, se realizarán mejoras en la estética mediante la personalización de las consolas y de los paneles visualizadores con respecto a la versión anterior, se perfeccionarán los algoritmos que conducirán a depurar y optimizar el código fuente de los microcontroladores ATmega 328, se crearán las librerías con las componentes electrónicas requeridas que no incluya el software de Diseño Asistido por Computador (CAD, Computer Aided Design), e igualmente se diseñarán los circuitos impresos (PCB, Printed Circuit Board).

Para el bloque de software, la aplicación que se está diseñando ofrecerá las siguientes funcionalidades: inscripción para los concursantes, elementos gráficos personalizados, manejo de la línea de diseño, integrada al sistema electrónico inalámbrico, lógica de control integrado en el software, almacenamiento de preguntas en una base de datos por temáticas o áreas del conocimiento, control del tiempo personalizable, pantalla dual o extendida (una exclusiva para visualización de los jurados y la otra para los concursantes y espectadores al evento), editor de preguntas en formatos: texto, imágenes, video o ecuaciones) y corrector de preguntas y respuestas en tiempo real.

En los desarrollos del hardware y del software se utilizó inicialmente un programa de Lenguaje Unificado de Modelado (UML, Unified Modeling Language), donde fueron descritos y detallados los métodos a utilizar mediante casos de uso, diagramas de estados y diagrama de secuencias [1], [2], [3], [4].

## 2.1 Hardware

Para la transmisión inalámbrica de datos, dentro del sistema electrónico propuesto en este proyecto, se considera adecuado el uso de la tecnología ZigBee. ZigBee es un protocolo estándar de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar IEEE 802.15.4 [5], [6], [7] define el hardware y software de la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (Media Access Control - MAC) [8], [10], donde cada capa se hace responsable de una serie de funciones que son necesarias para la comunicación. Se puede decir que IEEE 802.15.4 es el protocolo de bajo nivel y por otro lado el ZigBee es el protocolo de alto nivel que se acopla al protocolo IEEE 802.15.5.

El estándar IEEE 802.15.4 permite establecer transmisión inalámbrica de datos entre dos o más dispositivos a baja velocidad, bajos costos y bajo consumo de energía, transmisión bidireccional, topología de red punto multipunto [9], etc.; es desarrollado por ZigBee Alliance que a su vez está conformada por cientos de empresas. En la actualidad son muy frecuentes los diseños de redes inalámbricas basadas en este protocolo [5], [6], es por ello que no estamos ajenos al uso de esta tecnología por sus características y la aplicabilidad en el requerimiento del proyecto.

Cabe enfatizar que el término ZigBee hace referencia al protocolo de comunicación y XBee es el módulo físico de comunicación inalámbrica que utiliza dicho protocolo. La presentación física del dispositivo XBee serie 2, fabricado por la empresa Digi International como se puede observar en la Fig. 3.



FIGURA 3. XBEE SERIE 2 PARA LA TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS  
[Fuente: <http://image.drobot.com/image/cache/data/TEL0052/IMG9271-900x600.jpg>]

Para la configuración de los módulos se utiliza el software libre llamado XCTU [7], [11], [12], con el que se puede cambiar la configuración del firmware de los módulos XBee, según las necesidades de operación requeridas.

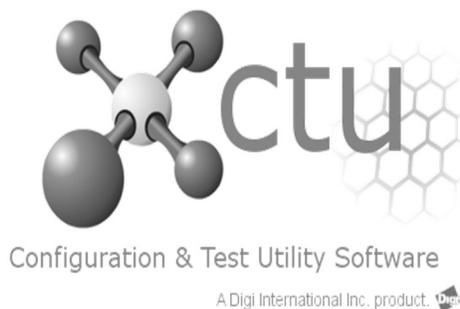


FIGURA 3. SOFTWARE XCTU PARA CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS XBEE  
[Fuente: <http://www.digi.com/blog/wp-content/uploads/2014/02/xctu-splash-cropped.png>]

Las principales características de las redes y dispositivos ZigBee son [7]:

- Velocidad de transmisión de datos entre 25-250 Kbps.
- Se pueden formar redes desde dos dispositivos hasta cientos de ellos.
- Los dispositivos pueden funcionar en modo de bajo consumo, lo que lleva a un ahorro en las baterías.
- La red se organiza y se repara de forma automática y se rutean los paquetes de manera dinámica.
- Es un protocolo seguro ya que se puede implementar encriptación y autenticación.

Para el proyecto se van utilizar los dispositivos XBee Serie 2, debido a la cobertura de la comunicación, donde las principales características son [9]:

- Es compatible sólo con la misma serie 2.
- La distancia de comunicación es mayor en esta serie: 120 metros en línea de vista para el módulo de 1,25mW y 3,2Km en línea de vista para el módulo de 60mW.
- Consume menos energía que la Serie 1 y tiene la posibilidad de operar en modo “sleep”.
- Soporta topologías de red: punto – punto, punto – multipunto, malla y estrella.
- Rango de voltaje de alimentación: 2,8v a 3,4v.
- Corriente de Tx y Rx 40mA.

Ahora, para procesamiento de los datos ingresados por los concursantes y enviados por la aplicación, se utilizó la tecnología de Arduino [13], [14], [15], [16], con entradas/salidas digitales y el puerto de comunicación serial, apoyado en librerías incorporadas al software de libre uso.

Arduino es una tecnología abierta para el desarrollo de los proyectos que ofrece diferentes tarjetas de desarrollo (hardware) y el software libre para la programación. La tecnología Arduino fue creada para facilitar desarrollo de las aplicaciones con microcontroladores. El software para la programación del microcontrolador es de fácil y amigable uso, también permite compilación y grabación del programa en el microcontrolador.

Para minimizar costos en el proyecto, se está optando por utilizar el Microcontrolador ATmega328 que utiliza la placa Arduino UNO, pero de forma independiente (sin la placa), y este se conectará a una unidad regulada para la comunicación con el módulo XBee serie 2, como se observa en la Fig. 4.

Físicamente el microcontrolador se visualiza en la Fig. 5, y se ve claramente que ocupará menos espacio en el circuito impreso y ofrecerá las mismas prestaciones. Las características principales del Microcontrolador ATmega328 son [17]:

- Microcontrolador de 8 bits
- 32KB de memoria flash para programación
- Tamaño de datos RAM: 2KB
- Interfaz: 2-wire, SPI, USART
- Velocidad: 20MHz
- Puertos de entrada/salida programable: 23
- Temporizadores: 3
- Canales de ADC: 6 canales de 10 bits
- Encapsulado: DIP-28

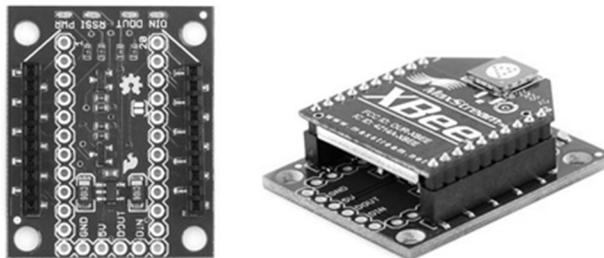


FIGURA 4. UNIDAD REGULADA PARA MÓDULOS XBEE

[Fuente:[http://www.didacticaselectronicas.com/components/com\\_virtuemart/shop\\_image/product/resized/Unidad\\_regulada\\_\\_4d838e978cd39\\_90x90.jpg](http://www.didacticaselectronicas.com/components/com_virtuemart/shop_image/product/resized/Unidad_regulada__4d838e978cd39_90x90.jpg)]

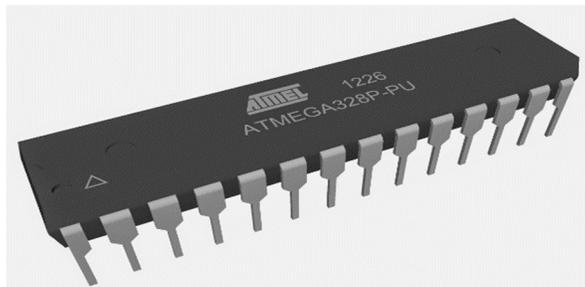


FIGURA 5. MICROCONTROLADOR ATMEGA328

[Fuente: <http://www.sigmaelectronica.net/images/ATmega328P-PU%20PDIP28%20Atmel.jpg>]

En síntesis, para las etapas de la implementación del hardware se inició con la modelación de casos de uso, diagramas de estados y diagrama de secuencias, para poder comprender el funcionamiento con todos los actores que intervienen, las variables y las salidas del sistema, posteriormente se realizaron varios algoritmos hasta depurarlo de forma que fuese óptimo para el sistema inalámbrico, luego se programó un microcontrolador y se implementó toda la circuitería de entrada y salida (periféricos) con el propósito de verificar de forma real el cumplimiento del algoritmo optimizado y el funcionamiento del código programado en el circuito integrado.

## 2.2 Software

Al igual que en el hardware, en el software se modelaron casos de uso, diagramas de estado y de secuencias con el fin de poder analizar los procesos que se llevan a cabo en cada etapa, posteriormente se generaron y depuraron algoritmos que van conformando las diferentes funciones de la aplicación.

Se está desarrollando una aplicación que administrará la conexión con cada consola para los concursantes y con los paneles frontales, conexión con la base de datos y otras características que se plantean a continuación:

Características integradas a la nueva versión del sistema electrónico inalámbrico:

Manejo de la línea de diseño integrada al sistema

- Presentación de las preguntas, las opciones y la respuesta correcta.
- Presentación de la tabla general de puntajes (Ranking).
- Opción de exportar el histórico de los concursos.

Elementos gráficos personalizables en las pantallas pertenecientes a las preguntas y la de los puntajes de los concursantes, de acuerdo al tipo de concurso (skins). Esto contribuye a una imagen más limpia y a un control e integración del sistema para las olimpiadas o cualquier concurso bajo el mismo formato de preguntas.

Control personalizable del tiempo límite para que respondan los concursantes, al igual que un indicador visual de forma descendente del tiempo transcurrido para cada pregunta.

Pantalla Dual, una pantalla independiente para el jurado desde la que pueda controlar la pantalla de visualización para el público y los concursantes.

Inscripción de concursantes y asignación de los equipos.

Editor de preguntas, permitirá a los docentes generar el banco de preguntas que incluyan texto, imágenes y vídeo, además del editor de ecuaciones y corrector de ortografía.

Corrección de preguntas en tiempo real, la pantalla de visualización para los jurados, permitirá modificar en tiempo real, las preguntas que presenten inconsistencias, actualizando la pantalla para el público y los concursantes.

Lógica de control integrado, consta de una única aplicación utilizada por el jurado que controla la comunicación serial, los objetos gráficos, la base de datos y determina el orden en que respondieron de forma correcta los concursantes, comenzando por el que menos tiempo haya invertido con sus respectivos puntajes acumulados.

Almacenamiento de preguntas por áreas del conocimiento, concursantes y puntajes en la base de datos.

Para el diseño y desarrollo de la aplicación se está utilizando Microsoft Visual Studio que es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para sistemas operativos Windows, soporta varios lenguajes de programación como Visual C++, Visual C#, Visual J# y Visual Basic .NET, además de entornos de desarrollo web como ASP.NET.

Aunque en la actualidad se han desarrollado las extensiones necesarias para otros, permitiendo a los desarrolladores crear aplicaciones, sitios, aplicaciones web; lo que con lleva a comunicarse entre estaciones de trabajo, páginas web y dispositivos móviles. Microsoft Visual Studio es una colección completa de herramientas y servicios [18].



FIGURA 6. LOGO DEL ENTORNO DE DESARROLLO INTEGRADO VISUAL STUDIO  
Fuente: <https://robertomspnicaragua.files.wordpress.com/2014/06/visual-studio-2013-logo.png>

Visual Studio permite desarrollar aplicaciones web sobre la base de la última versión de ASP.NET, pero también para el cloud, para Windows Phone, Windows 8.1, y aplicaciones tradicionales empresariales como DOT.NET. Lo punto de importancia es el refuerzo del acuerdo con Xamarin, que se dedica a hacer un plugin para Visual Studio que permita usar C# para programar apps nativas también en Android y iOS. De este modo, con sólo elegir una herramienta se pueden atender múltiples plataformas [19].

Las actualizaciones periódicas nos permiten mejorar y ampliar Visual Studio con el fin de que sea compatible con las innovaciones más recientes en desarrollo de software para crear y administrar aplicaciones punteras [20].

Sistemas operativos compatibles:

Windows 7 Service Pack 1, Windows 8, Windows 8.1, Windows Server 2008 R2 SP1, Windows Server 2012, Windows Server 2012 R2

Requisitos de hardware

- Procesador de 1,6 GHz o más rápido
- 1 GB de RAM (1,5 GB si se ejecuta en una máquina virtual)
- 8,5 GB de espacio disponible en el disco duro
- Unidad de disco duro de 5400 rpm
- Tarjeta de vídeo compatible con DirectX 9 con una resolución de pantalla de 1024 x 768 o superior

## 2.3 Metodología Propuesta

El desarrollo del proyecto se dividirá en las siguientes etapas:

1. Pruebas de transmisión y recepción de información por medio de comunicación serial entre el PC y el módulo XBee serie 2, utilizando la interface desarrollado con el software Visual Studio.
2. Elaboración del editor de preguntas con las funcionalidades de corrector ortográfico, editor de ecuaciones e inserción de multimedia.
3. Elaboración del control de base de datos para almacenamiento de preguntas, registros de los concursantes, puntuación por etapas del concurso y resultados finales.
4. Pruebas del módulo de "lógica de control" del concurso, el cual se convierte en el punto crítico por ser el corazón del sistema planteado.
5. Levantamiento de los requerimientos y los diseños de las consolas para los concursantes y los paneles de visualización frontales, cuya fabricación se hará en acrílico, mejorando la estética y la funcionalidad, exhibiendo un excelente acabado.
6. Optimización de código fuente y pruebas de funcionamiento de forma independiente del microcontrolador ATMEGA 328P-PU.
7. Levantamiento de los planos esquemáticos de la consola para el concursante y del panel de visualización frontal.
8. Diseño de circuitos impresos para las consolas y para los paneles de visualización frontales del sistema electrónico inalámbrico.
9. Ensamble de las consolas para los concursantes y de los paneles de visualización frontales.
10. Pruebas de la interface entre el Software y el Hardware del sistema.
11. Divulgación de resultados y elaboración del informe final.

En la Fig. 7 se observa un diagrama del sistema de información del proyecto.

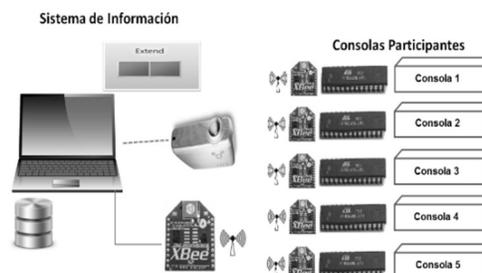


FIGURA 7. SISTEMA DE INFORMACIÓN  
[Fuente: diseño propio]

## 1. Análisis de resultados

Se tienen son resultados parciales sobre el desarrollo de la aplicación que Administrará y Controlará un Sistema Electrónico Inalámbrico, que ofrezca apoyo logístico en actividades como: facilitar el quehacer pedagógico de los docentes de nuestra Institución Universitaria como una nueva estrategia para el aprendizaje de los discentes en el aula de clase, utilizarlo en eventos lúdicos y de concurso conocidos como olimpiadas del conocimiento ya que fomentan la sana competición, el trabajo en equipo a la vez que demuestran los conocimientos adquiridos (aplica para todo tipo de áreas del conocimiento).

Como parte de los resultados parciales a nivel de hardware se modelaron casos de uso, diagramas de estado y de secuencias para comprenderla dinámica del sistema, se han realizado muchas pruebas las cuales han arrojado buenos resultados, llevando a la depuración de los algoritmos del microcontrolador, se tiene un primer diseño del circuito impreso (PCB, Printed Circuit Board) que va dentro de los paneles visualizadores de los concursantes.

A nivel de software, se modelaron las etapas que poseerá la aplicación para realizar el análisis de su funcionamiento de forma individual y posteriormente en conjunto. Se han comenzado los diseños de algunas funciones de la aplicación y se ha establecido la comunicación serial y de radio frecuencia entre Hardware y Software.

## 2. Conclusiones

Para el desarrollo del sistema Electrónico Inalámbrico y la Aplicación que Administrará y lo Controlará fue fundamental la modelación de las diferentes partes que lo componen y de esta forma comprender claramente el funcionamiento, lo cual llevaron a crear los algoritmos necesarios y su posterior depuración, las pruebas que se han realizado han arrojado los resultados esperados.

Este sistema electrónico podrá ser utilizado en otros tipos de competiciones de conocimiento en la institución o puede ser ofertado el servicio para otras instituciones educativas y brindar ingresos económicos. Como resultado de este proyecto se entregará un sistema electrónico inalámbrico que consta de seis consolas electrónicas, seis paneles para visualización de datos (una de respaldo de cada una) y una aplicación que administrará el sistema en general.

## 3. Agradecimientos

A las personas que están participando en el proyecto de investigación del semillero SICEI, en calidad de investigador principal y docente ocasional Oscar Ignacio Botero Henao, los coinvestigadores y docentes ocasionales Vesna Srdanovic y Julián Galeano Echeverri, los coinvestigadores y contratistas de apoyo a los laboratorios de Electrónica de la Facultad de Ingeniería Sergio Hernando Ruiz Obando, Roger Alexander Martínez Ciro, Cristian Cortes Chica, María Rosario Valderrama Orjuela y María Mónica Vergara Causil, los auxiliares y estudiantes de Tecnología en Desarrollo de Software Gustavo Giraldo Ospina, Jordanilo Maya Carmona y Yeisson Arley Sánchez Sánchez.

Agradecimientos a la Dirección Operativa de Investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo por la colaboración con los dispositivos, componentes electrónicos y licencia que se requieren Para la loa elaboración del proyecyondo en la ejecución de proyecto.

## 4. Referencias

- [1] Grupo Oficial del Lenguaje Modelado, «UML,» [En línea]. Available: <http://www.uml.org/>. [Último acceso: 13 03 2016].
- [2] Object Management Group, «OMG,» 17 02 2015. [En línea]. Available: <http://web.archive.org/web/20150226083703/http://www.omg.org/spec>. [Último acceso: 13 03 2016].
- [3] Universidad Veracruzana, «Universidad Veracruzana,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.uv.mx/personal/maymendez/files/2011/05/umiTotal.pdf>. [Último acceso: 13 3 2016].
- [4] StarUML, «StarUML,» 2015. [En línea]. Available: <http://staruml.io/>. [Último acceso: 13 03 2016].
- [5] Q. Zhang, X. Yang, Y. Zhou, L. Wang, y X. Guo, A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology. Journal of Zhejiang University, 2007, pp. 1584-1587.
- [6] A. Chehri, G. Jeon, B. Choi, Link-Quality Measurement and Reporting in Wireless Sensor Networks. Sensors, 2013, pp. 3066-3076.
- [7] M. Hebel, G. Bricker, D. Harris, Getting Started with XBee RF Modules. 2012, pp. 5-17, 25-40, 153-161.
- [8] IEEE 802.15 WPAN, «IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4),» 2010. [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>. [Último acceso: 5 04 2016]. [9] I. Almalkawi, M. Guerrero, J. Al-Karak, J. Morillo, Wireless Multimedia Sensor Networks: Current Trends and Future Directions. Sensors, 2010, pp. 6662 - 6717.
- [9] I. Almalkawi, M. Guerrero, J. Al-Karak, J. Morillo, Wireless Multimedia Sensor Networks: Current Trends and Future Directions. Sensors, 2010, pp. 6662 - 6717.
- [10] Confluence, «IEEE802.15.4e,» 19 11 2012. [En línea]. Available:



<https://openwsn.atlassian.net/wiki/display/OW/IEEE802.15.4e>. [Último acceso: 5 4 2016].

[11] J. Titus. The Hands-on XBEE Lab Manual. Estados Unidos: Newnes, 2012.

[12] Digi International Inc [online]. 2015. Disponible en: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu>

[13] J. Titus. The Hands-on XBEE Lab Manual. Estados Unidos: Newnes, 2012.

[14] M. Banzi, *Introducción a Arduino*. Creaciones Copyright, S.L., 2012. 978-84-415-3177-2.

[15] M. Etxebarria Isuskiza, *Arduino: La tecnología al alcance de todos*. España: Creaciones Copyright, S.L. 978-84-15270-26-3.

[16] J. Ribas Lequerica, *Arduino práctico*. s.l.: Creaciones Copyright, S.L., 2013. 978-84-415-3419-3.

[17] Atmel Corporation [online]. 2015. Disponible en: <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>

[18] B. Guerin. ASP.NET en C# con Visual Studio 2013: diseño y desarrollo de aplicaciones web, 2015. ISBN 978-2-7460-9082-8.

[19] Microsoft Visual Studio 2013 Update 4 [online]. 2015. Disponible en: <http://www.microsoft.com/es-co/download/details.aspx?id=44921>

[20] J. Reyes. Visual Studio, Lenguaje de Programación [online]. 2015. Disponible en: <https://reyesjoseling.wordpress.com/historia-de-visual-studio/>

## Creación de Comunidad de Práctica en Sistemas de Potencia a Través de Elementos de Gestión de Conocimiento

### Creating Community of Practice in Power Systems through Knowledge Management elements

*Karen Lemmel Vélez, Carlos Alberto Ocampo Quintero, Saúl Emilio Rivero Mejía*

*Institución Universitaria pascual Bravo*

[karen.lemmel@pascualbravo.edu.co](mailto:karen.lemmel@pascualbravo.edu.co), [c.ocampoqu@pascualbravo.edu.co](mailto:c.ocampoqu@pascualbravo.edu.co), [saul.rivero@pascualbravo.edu.co](mailto:saul.rivero@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

Se crea una comunidad de práctica (CoP) en Sistemas de Potencia (SEP), partiendo de un grupo de interés en la Institución Universitaria Pascual Bravo; entendiendo la CoP como una metodología de gestión de conocimiento aplicada a un grupo social con el fin de incentivar el aprendizaje colectivo y la innovación, además, con el objetivo de analizar una temática en común. La creación de la CoP permitió a los integrantes participar de forma espontánea y aprender con los demás miembros en un ambiente que promueve el aprendizaje mediante el intercambio de información, sincrónica o no.

Como estrategia comunicativa se usó una plataforma de Sistemas de gestión de aprendizaje (Learning Management System LMS) con la finalidad de que la CoP centralizara sus canales de comunicación y así construir conocimiento de manera colaborativa, logrando la incorporación y la integración de las personas con base en una temática común en este caso los SEP, por otro lado se representó el conocimiento obtenido mediante mapas conceptuales lo que implica no sólo la identificación y análisis de los conocimientos necesarios, sino también la planeación y control de las acciones para desarrollar habilidades con miras a los objetivos entre ellos la visualización y la construcción de un cuerpo de conocimiento en SEP.

**Palabras claves:** Sistemas de Potencia, Comunidad de Práctica, Cuerpo de Conocimiento, Mapa Conceptual, Representación de Conocimiento, Gestión de Conocimiento.

### Abstract

A Community of Practice (CoP) is created in Power Systems, based on an interest group in Institución Universitaria Pascual Bravo; understanding the CoP as a Knowledge Management methodology applied to a social group in order to encourage collective learning and innovation also in order to analyze a common theme. Creation of the CoP allowed to participate spontaneously and learn with others in an environment that promotes learning through sharing both synchronous or asynchronous information.

As communication strategy, a platform for Learning Management Systems (LMS) used in order that the CoP centralizes its communication channels and to build knowledge collaboratively, achieving the inclusion and integration of people based a common theme, in this case Power Systems. Additionally, the knowledge gained was represented by conceptual maps which involves not only the identification and analysis of the necessary knowledge, but also the planning and control of actions to develop skills furtherance of the objectives including visualization and building a body of knowledge in Power Systems.

**Keywords:** Power Systems, Community of Practice, Body of Knowledge, Concept Mapping, Knowledge Representation, Knowledge Management.

## 1. Introducción

Los programas académicos de Ingeniería en Colombia, están reglamentados por el Ministerio de Educación Nacional (MEN), y siguen las recomendaciones de la Asociación Colombiana de Ingeniería (ACOFI). Para efectos de la estructuración de un programa de ingeniería, continúa en vigencia la Resolución 2773 de 2003 del MEN [1], define “las características específicas de calidad para los programas de formación profesional de pregrado en Ingeniería”, en su artículo 2 – Aspectos Curriculares, establece las áreas de conocimiento y prácticas de la ingeniería, como: 1) área de las ciencias básicas, área de ciencias básicas de ingeniería, área de ingeniería aplicada. Por otra parte, ACOFI desarrolló en la década pasada un acuerdo de Contenidos Programáticos Mínimos para la Formación en Ingeniería, el cual plasmó en un libro del mismo nombre y, como lo muestra la Tabla 1, definió los contenidos programáticos básicos del programa de Ingeniería Eléctrica en el país [2].

TABLA 1. Contenidos referenciales resumidos. Fuente: ACOFI.

ABREVIATURA	ÁREA	SUBÁREA
CB	CIENCIAS BÁSICAS	Matemáticas Física Química Biología
BI	CIENCIAS BÁSICAS DE INGENIERÍA	Circuitos eléctricos Campos electromagnéticos Conversión de energía electromecánica Electrónica Ciencias especiales
IA	INGENIERÍA APLICADA	<b>Sistemas de potencia</b> Líneas y redes Control Centrales y subestaciones
C	FORMACIÓN COMPLEMENTARIA	Ciencias económico - administrativas Ciencias Sociales y humanidades

Puede observarse en el área de Ingeniería Aplicada que se estableció como subárea la de SEP. Como se muestra en la tabla 2, al observar los planes de estudio de ingeniería eléctrica con reconocimiento de alta calidad a través del Consejo Nacional de Acreditación (CNA), se desarrolla en pregrado entre uno y tres cursos semestrales, dando muestras de la importancia del curso para un programa de ingeniería eléctrica.

TABLA 2. Cursos de SEP en las universidades acreditadas. Fuente: elaboración propia a partir de información de sitios web de las universidades

Universidad	Asignatura	Créditos	Obligatoria
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín	Análisis de Sistemas de Potencia	3	Si
	Calidad de la Potencia Eléctrica	3	No
Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales	Análisis de Sistemas de Potencia	3	Si
	Calidad de la Potencia Eléctrica	3	No
Universidad Tecnológica de Pereira – Pereira	Análisis de Sistemas de Potencia	3	Si
	Protección de Sistemas de Potencia	3	Si
Universidad de Antioquia – Medellín	Sistemas de Potencia	4	Si
Universidad del Valle – Cali	Sistemas de Potencia I	3	Si
	Sistemas de Potencia II	3	Si
Universidad Industrial del Santander – Bucaramanga	Sistemas de Potencia I	4	Si
Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín	Sistemas de Potencia I	3	Si
	Sistemas de Potencia II	3	Si
Universidad del Norte – Barranquilla	Elementos de Sistemas de Potencia	3	Si
	Análisis de Sistemas de Potencia	3	Si
Universidad de la Salle – Bogotá D.C.	Análisis de Sistemas de Potencia	3	Si
Universidad de los Andes – Bogotá D.C.	Análisis de Sistemas de Potencia	3	Si
	Economía de Sistemas de Potencia	3	Si
	Taller de Potencia	3	Si
Universidad Autónoma de Occidente - Cali	Sistemas de Potencia I	3	Si
	Sistemas de Potencia II	3	Si
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito – Bogotá D.C.	Sistemas de Potencia I	3	Si
	Sistemas de Potencia II	3	Si

La literatura existente respecto al análisis de SEP[3]–[10], está dirigida a estudiantes de ingeniería eléctrica de nivel de posgrado o de los últimos niveles universitarios, debido a que los modelos son altamente integradores, puesto que permiten modelar prácticamente cualquier dispositivo, elemento, máquina, plataforma o red eléctrica, con lo cual puede comprenderse el comportamiento sistémico una vez están interconectados e interactuando entre sí. Esto hace requerimientos de análisis matemático, estadístico, circuital y electromagnético que sólo son posibles al final de un programa de ingeniería. Uno de los casos más representativo es el análisis de flujos de carga, el cual es importante para la toma de decisiones en el sector eléctrico, pues permite hacer el planeamiento de la expansión futura de los SEP, así como determinar la mejor operación de los sistemas existentes. Para [8], los modelos de flujo de carga, “son sistemas no lineales que describen el flujo de energía por una línea de transmisión”, lo cual muestra un campo de estudio que se complejiza por el número de componentes que se abordan en el análisis y por la no linealidad del mismo, por lo que involucra análisis numérico y programación lineal aplicados a SEP y permite los siguientes tipos de análisis: análisis de falla de cortocircuito, estudios de estabilidad transitorio y de estado estable y el estudio de despacho económico.

## 2. Implementación de una Comunidad de Práctica en Sistemas de Potencia

En la Institución Universitaria Pascual Bravo, se encontró un grupo de estudiantes y docentes interesados en profundizar en el estudio del Análisis de SEP, por lo que se pudo evidenciar la necesidad de establecer un dominio de conocimiento que permita en un futuro conformar un semillero y un grupo de investigación que fundamente este campo de la ingeniería eléctrica de la Institución y que proyecte resultados de alto impacto al sector eléctrico.

En este sentido, se observaron algunas dificultades que deben superarse. La primera es que el grupo posee un nivel de conocimiento variable y poco adecuado para abordar el campo de estudio. La complejidad de los modelos, requiere conocimiento matemático y físico que usualmente no se abordan en pregrado. Igualmente, las competencias investigativas del grupo tienen un nivel de madurez en etapas tempranas que dificultan el desarrollo de proyectos de investigación de gran impacto. Finalmente, el costo de los equipos, herramientas y software para la captura y el análisis de información es alto y su recuperación económica es difícil con el nivel de conocimiento y aplicación que tiene actualmente la institución.

Por ello, se planteó como oportunidad, comenzar a construir un semillero de investigación a partir de herramientas de gestión de conocimiento. Se identificó la Comunidad de Práctica (*Community of Practice*, CoP), como metodología de gestión de conocimiento que permite incentivar el aprendizaje colectivo y la innovación en un grupo social, alrededor de una temática común, acorde con [11] y se configuró un espacio virtual en una de las plataformas tecnológicas de Sistemas de Gestión de Aprendizaje (*Learning Management System*, LMS) de la Institución Universitaria Pascual Bravo, Google™ Classroom® como se muestra en la Figura 1. Esta plataforma, permite conexiones con otras herramientas de Google™, que facilitan la interacción entre las personas, como son Gmail®, Drive® y Calendar® entre otros.

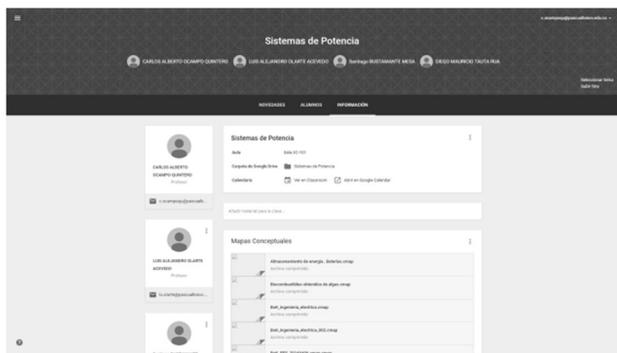


FIGURA 1. Entorno de CoP en SEP sobre Google™ Classroom®.

La CoP se construyó siguiendo las instrucciones de [12]. Estos autores, recomiendan identificar tres elementos clave de una CoP en ambientes electrónicos: 1) Dominio, 2) Comunidad y 3) Práctica. El *Dominio* hace referencia al objeto de interés de la CoP, en este caso los SEP. La *Comunidad*, se refiere a cómo será la interacción y la definición de roles de los miembros de la CoP. Finalmente, la *Práctica*, son las acciones requeridas para construir, compartir y almacenar conocimiento por parte de la COP.

En el *Dominio* se detectó que existía entonces, el reto de establecer un marco de referencia común de conceptos, para lo cual, se inició con la construcción de un Cuerpo de Conocimiento (Body of Knowledge – BoK), que es lo más recomendable de acuerdo con [13]. Para [14], el BoK es “un conjunto completo de conceptos, términos y actividades que configuran un dominio profesional y es definido por una sociedad de conocedores o una asociación profesional”. Para su construcción, se utilizó una herramienta de representación altamente conocida por los participantes, los mapas conceptuales. El mapa conceptual de acuerdo con [15], “son herramientas gráficas para organizar y representar conocimiento”. Ellos incluyen conceptos, generalmente encerrados en círculos o cajas de algún tipo, y

relaciones entre los conceptos indicadas por una línea conectora que enlaza dos conceptos. Para su elaboración, se trabajó con el software CmapTools® de la IHMC™. En la figura 5, se muestra el BoK de SEP, construido por el grupo de interés. Como podrá observarse, algunos de estos conceptos tienen asociado un pequeño ícono que indica que tiene archivos vinculados.

Es de particular interés observar que existe un subdominio para los conceptos previos, puesto que uno de los objetivos de la comunidad era establecer un marco común para abordar diversos problemas de SEP. En la figura 2, puede verse el mapa de conceptos previos.

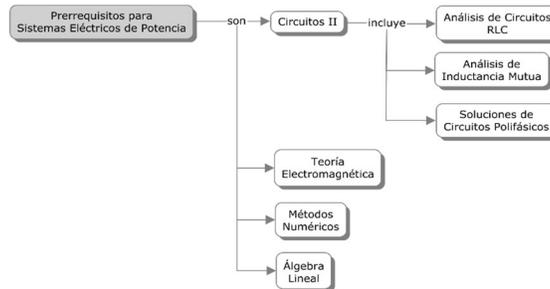


FIGURA 2. Conceptos previos para SEP. Fuente: elaboración de Comunidad de Práctica

Igualmente, se inició con la construcción de los mapas referentes a la generación de energía. Para este mapa en particular, se tomó la información suministrada por la Corporación Ruta N, de la Alcaldía de Medellín, en su sitio web para proyectos de innovación, denominada Brainbook N (<http://brainbookn.com/index.php?lang=es>). En la Figura 3, puede verse el mapa inicial construido y en la Figura 4, el mapa actual. De esta forma, puede verse la evolución en la construcción de los mapas conceptuales a partir de la socialización de la información entre los participantes.

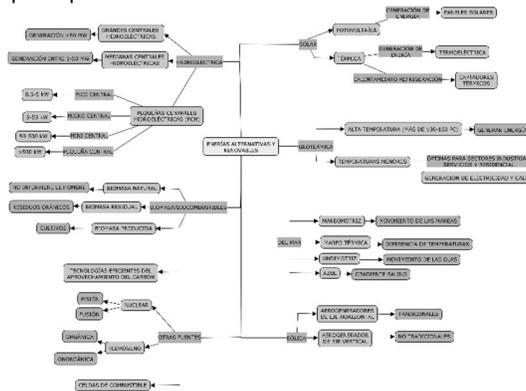


FIGURA 3. Mapa conceptual inicial de fuentes de energía alternativas y renovables.

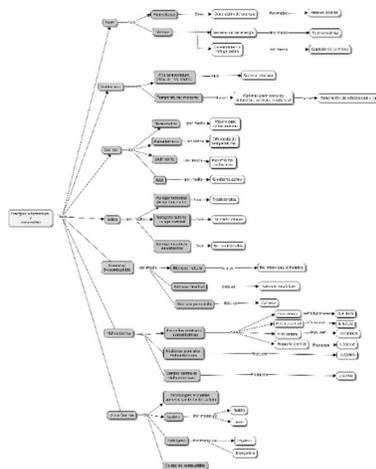


FIGURA 4. Mapa conceptual en construcción, de fuentes alternativas y renovables.

En el elemento *Comunidad*, se estableció la necesidad de identificar diferentes roles de acuerdo con niveles potenciales de participación, de este modo, sería más fácil modelar y parametrizar cada rol en la plataforma virtual. Los niveles fueron:

- El Grupo Central (*Core Group, CG*), conformado por las personas que participan de manera intensiva en la CoP. El CG usualmente, es el grupo que debe tomar el papel de guía para el grupo y quien lidera los proyectos y discusiones.
- El Grupo Activo (*Active Group, AG*), conformado por las personas que participan con alguna regularidad, pero no lideran los proyectos y discusiones.
- El Grupo Periférico (*Peripheral Group, PG*), conformado por aquellas personas que tienen un nivel más pasivo y se mantienen para lograr algún nivel de aprendizaje. Según [11], debe representar la mayoría de la CoP.

En este sentido, se revisaron los roles posibles configurados en el LMS, y se estableció que el CG, estaría conformado por las personas con mayor actividad inicialmente y se les asignaría el rol de docente. La Figura 1, muestra que, en el banner superior de la plataforma virtual, está representado el CG, cada uno con permisos para:

- Crear y administrar sesiones en las cuales se puede añadir o retirar un AG, una página de recursos, invitar a otros profesores, establecer un calendario de sesiones para un AG.
- Crear o modificar tareas y foros.
- Comunicarse con un AG, a través de publicaciones de anuncios, envío de correos electrónicos, publicaciones de documentos de interés.

Para el AG, los permisos son los siguientes:

- Inscribirse o retirarse en un AG.
- Revisar y actualizar tareas y foros.
- Comunicarse con los compañeros del AG.
- Ver y seguir el calendario establecido.

El PG, tienen el nivel de invitados y pueden o no, participar en el AG que se le asigne.

Finalmente, en el elemento de *Práctica*, se identificaron las posibles herramientas tecnológicas que se podrían utilizar para el trabajo de CoP. En la tabla 3, se muestra la identificación de necesidades y su posible solución tecnológica. En el momento, se está en la implementación de estas herramientas.

TABLA 3. Herramientas tecnológicas posibles de apoyo para la construcción de una CoP. Fuente: Bond, M. & Lockee, B.

Necesidades	Posible herramienta
Interacción/ Discusión en línea	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LMS soportado por la Institución (Google™ Classroom®)</li> <li>• Correo Electrónico con plugin de correo masivo (Google™ Gmail® – Google™ Groups®)</li> <li>• Foros (Google™ Classroom®)</li> <li>• Blogs (Blogger™)</li> <li>• Conferencias web (Google™ Hangout®)</li> <li>• Redes sociales (Google™ +, Facebook™)</li> </ul>
Creación / Distribución de conocimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wikis (Google™ Classroom®, Google™ Sites®)</li> <li>• Blogs (Blogger™)</li> <li>• Conferencias web (Google™ Hangout®)</li> <li>• Herramientas de colaboración documental (Google™ Drive®, Google™ Docs®, Google™ Spreadsheets®, Google™ Presentations®, IHMC™ CmapTools®)</li> </ul>
Repositorios documentales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LMS soportado por la Institución (Google™ Classroom®)</li> <li>• Wikis (Google™ Classroom®, Google™ Sites®)</li> <li>• Herramientas de colaboración documental (Google™ Drive®, Google™ Docs®, Google™ Spreadsheets®, Google™ Presentations®)</li> </ul>

### 3. Conclusiones y Recomendaciones

La CoP en SEP, se creó partiendo de un grupo de interés en la Institución Universitaria Pascual Bravo, por su capacidad de implementarse como una metodología de gestión de conocimiento aplicada a un grupo social con el fin de incentivar el aprendizaje colectivo y la innovación en SEP.

La creación de la CoP ha permitido a los integrantes participar de forma espontánea y aprender con los demás miembros en un ambiente que promueve el aprendizaje mediante el intercambio de información, sincrónica o no.

Como estrategia comunicativa se usó una plataforma de Sistemas de gestión de aprendizaje (Learning Management System LMS), para centralizar los canales de comunicación de la CoP de modo que la construcción de conocimiento fuera colaborativa, logrando la incorporación y la integración de las personas con base en una temática común, en este caso los SEP.

En la construcción de la CoP, surgió la necesidad de representar el Dominio de SEP en un BoK mediante mapas conceptuales, lo que implica no sólo la identificación y análisis de los conocimientos necesarios, sino también la planeación y control de las acciones

para desarrollar habilidades con miras a los objetivos entre ellos la visualización y la construcción de un cuerpo de conocimiento en SEP.

Para establecer la Comunidad, se requiere identificar los roles de las personas que participarán en la CoP, acordes con los niveles potenciales de participación, para que sea más fácil modelar y parametrizar cada rol en la plataforma virtual seleccionada.

Es importante para la implementación de una CoP, contar con herramientas tecnológicas que le permitan establecer el elemento de Práctica, como los numerados en Tabla 3.

#### 4. Trabajos futuros

Con miras a madurar la CoP, se deben revisar algunas labores importantes, como lo muestra la Tabla 4, acorde con cada uno de los elementos establecidos.

TABLA 4. Tareas relacionadas con los elementos de la CoP en SEP.

Elemento de CoP	Tareas
Dominio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear y consolidar objetivos estratégicos y diferenciarlos en subtópicos para mejorar la claridad.</li> <li>• Diseñar reglas claras para distribuir el conocimiento.</li> <li>• Diseñar un plan basado en los objetivos establecidos y las fases de desarrollo de una CoP.</li> </ul>
Comunidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar y reclutar miembros de CG.</li> <li>• Aumentar el AG, acorde con los proyectos y actividades del CG.</li> <li>• Identificar y evaluar necesidades de potenciales miembros en el PG.</li> </ul>
Práctica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conformar un entorno tecnológico, que permita cubrir las necesidades de interacción / discusión en línea, creación / distribución de conocimiento y repositorios documentales.</li> <li>• Implementar una gobernanza tecnológica adecuada para impulsar el entorno tecnológico a niveles superiores de madurez y capacidad.</li> </ul>

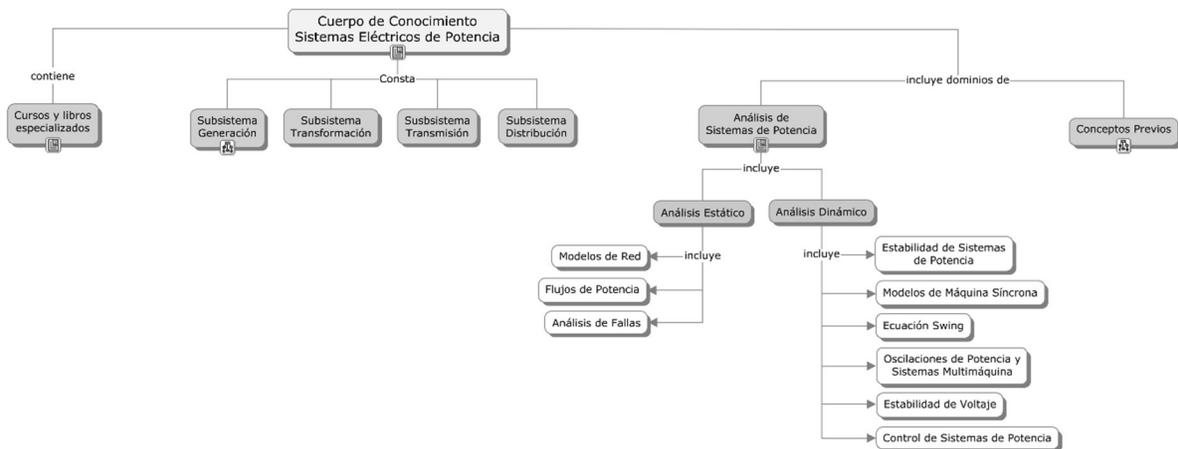


FIGURA 5. Cuerpo de Conocimiento en SEP. Fuente: elaboración de Comunidad de Práctica.

#### 5. Referencias

- [1] Ministerio de Educación Nacional, *Resolución Número 2773 de 2003*. Mineducación, 2003, p. 4.
- [2] ACOFI, "Contenidos Programáticos Básicos de Ingeniería," Bogotá, 2004.
- [3] G. Andersson, *Power System Analysis: Power Flow Analysis, Fault Analysis, Power System Dynamics and Stability*, no. September. Zürich: ETH, 2012.
- [4] G. Argüello, *Análisis y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Quito: INECCEL, 1988.
- [5] E. E. T. Committee, "Electrical Engineering Definition of Tuning," Arlington, USA, 2006.
- [6] A. Gómez, J. Martínez, J. Rosendo, E. Romero, and J. Riquelme, *Sistemas Eléctricos de Potencia. Problemas y Ejercicios Resueltos*. Madrid: Pearson Educación, 2003.

- [7] J. Grainger and W. J. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia," *Cenace, Uanl*. p. 743, 1996.
- [8] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, 1st ed. Naucalpan de Juárez: McGraw-Hill / Interamericana de México, 1996.
- [9] W. U. del estado C. del N. Stevenson, "Análisis de sistemas Eléctricos de Potencia." Naucalpan de Juárez, p. 504, 1985.
- [10] B. M. Weedy, B. . Cory, N. Jenkins, J. . Ekanayake, and G. Strbac, *Electric power systems*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2012.
- [11] E. Wenger, "Communities of Practice: Development Stages." Community of Practice on Partnerships in the European Social Fund (ESF), Viena, pp. 1–5, 2003.
- [12] M. A. Bond and B. B. Lockee, *Building Virtual Communities of Practice for Distance Educators*. 2014.
- [13] K. North and G. Kumta, *Knowledge Management*. 2014.
- [14] G. Oliver, *Foundations of the assumed business operations and strategy body of knowledge (BOSBOK) : an outline of shareable knowledge*. Sidney, Australia: Darlington Press, 2012.
- [15] J. D. Novak and A. J. Cañas, "La Teoría Subyacente a los Mapas Conceptuales y Cómo Construirlos," Miami, 2006.

## Textiles Electrónicos y Vestibles: Tecnología de Moda

### Electronics textiles and wearables: Fashion technology

*Jauder Alexander Ocampo Toro*  
*Docente, IU Pascual Bravo*

[jauder.ocampo@pascualbravo.edu.co](mailto:jauder.ocampo@pascualbravo.edu.co)

*Julio Ulises Palomeque Martinez*  
*Docente, IU Pascual Bravo*

[j.palomequema@pascualbravo.edu.co](mailto:j.palomequema@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

En este artículo se hace una revisión de nuevos conceptos tecnológicos denominados "textiles inteligentes" y vestibles (wearables) que combinan diferentes áreas de la ciencia, el arte y la moda, en prendas que capturan información relativa al usuario y su entorno, mediante sensores electrónicos incorporados en textiles. Se realiza un análisis teórico para aportar información a los sectores académico y empresarial, sobre el cambio tecnológico que supone el surgimiento de los textiles "inteligentes" como oportunidad de reconversión del sector textil, apoyados en otros sectores de base tecnológica, en aras de desarrollar una capacidad de aprendizaje y de innovación que puedan generar ventajas competitivas para las empresas.

Se busca generar intereses y expectativas sobre las múltiples oportunidades que ofrecen los textiles electrónicos y los vestibles, como opciones potenciales de desarrollo e investigación para académicos de la IU Pascual Bravo, y otros profesionales en general, mediante el diseño de prendas no intrusivas que interactúan con su usuario o con terceros, a través de controles o sensores, y en áreas y aplicaciones tales como: Salud y deporte (sensado de temperatura corporal, ritmo cardíaco, movimiento, fuerza), Medioambiente (temperatura ambiente, humedad), Ciencia (captura y almacenamiento de energía fotovoltaica, ubicación), Arte y moda (iluminación y sonido integrados), Comunicación visual (mensajes, gustos, humor y sentimientos) entre otros.

**Palabras claves:** Vestibles, Textiles electrónicos, Textiles inteligentes, Textiles interactivos, Textónica.

### Abstract

This paper provides a review of new technological concepts called "smart textiles" and wearables that combine different areas of science, art and fashion, garments that capture user information and their environment through electronic sensors incorporated into textiles. A theoretical analysis is performed to provide information to the academic and business sectors, about technological change which is the emergence of "smart" textiles as an opportunity for restructuring the textile sector, supported by other technology-based sectors, in order to develop a learning innovation ability that can generate competitive advantages for businesses.

It seeks to generate interest and expectations about the many opportunities offered by electronic textiles and wearable, as potential development options and research for academic IU Pascual Bravo, and other professionals in general, by designing nonintrusive



garments interacting with your user or third parties, through controls or sensors, and in areas and applications such as: Health and sports (sensing body temperature, heart rate, motion, force), environment (ambient temperature, humidity), Science (capture and storage of photovoltaic energy, location), Art and fashion (integrated lighting and sound), visual communication (messages, tastes, moods and feelings) among others.

**Keywords:** Wearables, Electronic textiles, Smart textiles, Interactive textiles, Textronics.

## 1. Introducción

La industria textil pertenece a uno de los sectores más tradicionales de la economía, por estar vinculado a una necesidad básica del ser humano: vestir [1].

En la historia del traje hay una evolución importante desde que el hombre encontró protección en pieles y algunos follajes de la flora, para cubrir su cuerpo de la intemperie, hasta que después descubrió que adicionalmente le daba comodidad, elegancia y status [2].

El surgimiento de una nueva era de textiles llamados "inteligentes", ya que integran tecnologías que les permiten interactuar con el entorno, da pie a un sinnúmero de aplicaciones y posibilidades que las empresas tradicionales de textiles y confección pueden explorar para incursionar en nuevos mercados [1].

Actualmente no existen saberes puros; es decir, toda área del conocimiento se mezcla con otras, de tal manera que la ciencia aporta la teoría y lo artístico la intuición, y ambas se nutren [3]. Es así como la electrónica ha revolucionado objetos cotidianos enriqueciéndolos con sensores, actuadores, baterías, celdas fotovoltaicas, y otros elementos que pueden imprimirse e integrarse en medios flexibles, resistentes al lavado y elásticos, como los textiles tradicionales. Estos nuevos textiles son cada vez más livianos, durables y, sobre todo, útiles [1].

El mercado mundial de textiles técnicos e inteligentes está creciendo rápidamente con impactos en la economía y los niveles de empleo [1]. Aquellas empresas de sectores relacionados, que sean capaces de entender cómo incorporar las tecnologías inteligentes y convertirlas en nuevos productos textiles, serán creadoras de ventajas competitivas frente a otras del mercado y tendrán mayores garantías de sostenibilidad en el tiempo [1].

La moda no es sólo prendas de vestir en auge, sino todo lo que esté en oferta y demanda, y que genere como consecuencia una tendencia, un estilo de vida o comportamiento [2].

El sector textil/confección en Colombia, es una de las fortalezas económicas, ya que contribuye con un 8% del valor agregado de la industria colombiana, 20% del empleo y 5% de las exportaciones, sin embargo, su estructura empresarial se ha visto afectada como consecuencia de la crisis mundial, la inestable relación con los socios comerciales tradicionales (Venezuela, Ecuador) y la fluctuación de la tasa de cambio frente a las exportaciones fundamentalmente a Estados Unidos [2].

En su estudio de la industria textil en Colombia, se concluye que la capacidad de innovación tecnológica es relevante para incrementar la competitividad del sector, en la medida que brinde mayor valor agregado a sus productos [1]. También destaca poco conocimiento en Colombia en áreas como los nanotextiles por ejemplo, proponiendo alianzas con instituciones e industrias de otros países a la vanguardia, con el fin de capacitar al recurso humano del país acerca de los nuevos avances [1].

## 2. Textiles inteligentes

Las prendas protegen el cuerpo del ambiente externo, manteniéndolo cómodo y seguro durante las diferentes actividades del día, pero esta es sólo una de sus posibles funciones [2]. En el campo del diseño todo debe tener una funcionalidad, que radica en la esencia misma del objeto, es decir, que cumpla con suplir la necesidad que le dio origen, en este caso proteger y cubrir, pero propone también una reinención de conceptos, que le permitan innovar en cada pieza desarrollada; Actualmente, traje es todo objeto que este cubriendo alguna parte del cuerpo inclusive los accesorios son considerados complemento de este y cada pieza debe estar pensada y desarrollada para que encaje en el sistema y por qué no, para que permita formar otro [2].

En la actualidad los textiles pueden ser diseñados para aplicaciones específicas, y quizá fueron los textiles de uso técnico (TUT) los que terminaron con la creencia que los tejidos sólo servían para vestir a las personas. Hoy día, la penetración de los TUT en los mercados es cada vez mayor, creciendo mucho más deprisa que los tradicionales [4]. Así, a casi nadie sorprende que los TUT tengan aplicaciones en arquitectura, construcción, transporte, en prendas para protección y seguridad de bomberos, militares, deportistas, etc. [4].

En este mercado aparecen los "textiles inteligentes", llamados así por su capacidad de alterar su naturaleza en respuesta a la acción de diferentes estímulos externos, físicos o químicos, modificando alguna de sus propiedades, principalmente con el objetivo de conferir beneficios adicionales a sus usuarios [4]. Son tejidos que se han desarrollado con nuevas tecnologías que aportan valor añadido para quien los utiliza, no solo en su vestido sino también en su entorno. En general, los textiles inteligentes son todos aquellos productos manufacturados a través de un proceso textil, que responden a exigencias específicas a través de funciones técnicas. Se trata de productos de alta tecnología, complejos en su producción y para los que ha sido identificada una gran capacidad de crecimiento y de desarrollo tanto comercial como tecnológico [1].

Pailles-Friedman, del Instituto Pratt afirma que "lo que hace revolucionario telas inteligentes es que tienen la capacidad de hacer muchas cosas que los tejidos tradicionales no pueden, incluyendo comunicarse, transformar y conducir energía e incluso expandirse".

Entre los ejemplos están los textiles capaces de regular la temperatura o cambiar de color según haga calor o frío, que protegen de los rayos ultravioleta, que combaten bacterias, o que regulan la distribución de aromas o de medicamentos, etc.

Los textiles inteligentes pueden obtenerse empleando directamente en la fabricación del tejido las llamadas fibras inteligentes, que son aquellas que pueden reaccionar ante la variación de estímulos tales como la luz, el calor, el sudor, etc., pero que se comportan como fibras normales cuando el estímulo no actúa. Por ejemplo, una fibra inteligente sería aquella que, al percibir una variación de temperatura cambiara de color [4]. También pueden obtenerse mediante la aplicación posterior de determinados acabados a un tejido, que produzcan los mismos o diferentes efectos que los logrados con las fibras inteligentes [4].

La tecnología de estos textiles puede solaparse con otras importantes tecnologías, como la microelectrónica, la informática, las nanotecnologías y los biomateriales [4].

### 3. Clasificación y aplicaciones de los textiles inteligentes

En un primer intento de clasificación, los objetos con textiles inteligentes se pueden agrupar en "soft" o "hard"; los primeros incluyen telas o prendas como chaquetas, pantalones, e incluso ropa interior, mientras que los segundos están hechos sobre una mezcla de soportes poliméricos y textiles, como brazaletes, zapatos, etc. [1].

A continuación, se presenta diferentes tipos de textiles inteligentes.

#### 3.1 Textiles con microcápsulas

El microencapsulado es una técnica mediante la cual mínimas porciones de un principio activo (gas, líquido o sólido), son recubiertas por una membrana muy fina (del orden de  $1\mu\text{m}$ ) para protegerlo del entorno que lo rodea [4]. Las microcápsulas se pueden incorporar directamente a la fibra sintética en el proceso de hilatura, pero también pueden añadirse durante el acabado [4].

Un ejemplo son las prendas que incorporan microcápsulas PCM (*Phase Change Material*), las cuales son capaces de absorber, almacenar y liberar el calor corporal en función de las condiciones ambientales [4], para mantener una temperatura confortable al cuerpo.

Otro ejemplo son los textiles cosméticos, que utilizan microcápsulas aplicadas en el acabado, que pueden romperse progresivamente por presión, por fricción o por biodegradación, para liberar materias activas de naturaleza muy diversa (aromas, bioquímicos, vitaminas, etc.), ayudando a la piel a prevenir infecciones de agentes externos, o simplemente para aumentar la sensación de bienestar de la persona que los utiliza. Entre sus aplicaciones más conocidas están las medias hidratantes o refrescantes con aloe vera, las prendas de vestir interiores o exteriores perfumadas, etc. [4]. También podrían citarse determinados textiles con aplicaciones en medicina, como los que incorporan microcápsulas que dosifican medicamentos, o las ropas que pueden incluso regular la medicación de un usuario diabético, a partir del análisis del sudor, etc. [4].

#### 3.2. Textiles crómicos

Se les denomina también textiles camaleónicos, porque pueden cambiar su color en consonancia con las condiciones externas. La clasificación se realiza en función del estímulo al que responden en: foto-crómico, termo-crómico, electro-crómico, etc. [4].

Así, por ejemplo, los textiles fotocrómicos cambian de color al actuar determinadas radiaciones sobre ellos. Una de las formas de obtenerlos es aplicando microcápsulas con colorantes sensibles a la acción de la luz; Otra forma es mediante la aplicación directa, por alguno de los procedimientos de estampación, de ciertas tintas sensibles a la luz [4]. Los textiles termocrómicos cambian su coloración al modificarse la temperatura exterior. Se obtienen mediante determinados pigmentos que son indicadores reversibles de temperatura [4].

#### 3.3. Materiales con memoria de forma

Estos materiales son capaces de deformarse y recuperar una forma previamente fijada, generalmente por acción del calor, aunque también puede ser por cambios magnéticos y de otros tipos. Esto ha permitido diversas aplicaciones prácticas pues, además, es un proceso que puede ser repetido varias veces [4].

Por ejemplo, los textiles de permeabilidad variable incrementan el tamaño de los intersticios al aumentar el calor desprendido por el cuerpo, y por tanto, la capacidad de evaporación del sudor a su través. Por el contrario, cuando el cuerpo se enfría, el material textil recupera su forma inicial aumentando su capacidad de abrigo [4].

#### 3.4. Textiles conductores de la electricidad y del calor

En las primeras aplicaciones de textiles conductores se utilizaron fibras metálicas, con el inconveniente que los movimientos de doblado, extensión y torsión que manejan habitualmente los tejidos podían producir roturas que conllevan fallas en la continuidad de la electricidad en la fibra. Sin embargo, hoy existen fibras comerciales que incluyen fibras metálicas mezcladas con fibras textiles para formar fibras conductoras que pueden ser tejidas o cosidas. Los tejidos conductores se obtienen por utilización de:

- Fibras intrínsecamente conductoras: metálicas, de carbono.
- Fibras con partículas conductoras aplicadas en su superficie.
- Hilos híbridos e hilos metalizados.

Un ejemplo de hilo conductor es el Protex Ag, en cuyo proceso de fabricación se deposita plata pura con una concentración adecuada sobre fibras, hilos o tejidos. Esto hace que adquiera conductividad eléctrica y térmica, además de un incremento del poder antimicrobiano, en definitiva, todos los beneficios de la plata [4].

La tendencia actual es la utilización de textiles conductores, o electrot textiles, basados en polímeros conductores que emplean polipirrol, polianilina, politiofeno o bien nanotubos de carbono, y últimamente, el grafeno [5].

Hilos y tejidos con propiedades electrotérmicas son utilizados para generar calor conectándolos o estimulándolos con baterías de tamaño pequeño preferiblemente [4].

Normalmente, los conductores se utilizan como material de protección: en salas limpias, trajes de bomberos, etc, pero en el futuro puede generalizarse su uso, incluso a la vestimenta normal, debido a la incidencia que tiene sobre el confort la disipación de cargas eléctricas generadas, por ejemplo, por el roce entre fibras sintéticas [4]. Algunos hablan incluso de que los hilos conductores hacen que las prendas fabricadas con ellos tengan propiedades antiestrés [4].

### 3.5. Textiles electrónicos

Los textiles electrónicos, también conocidos como e-textiles (*electronic textil*), textrónica o textiles interactivos, son tejidos que permiten la integración de componentes electrónicos en ellas, incluyendo fibras conductoras, microcontroladores, sensores, actuadores, y fuentes de poder, para incrementar la funcionalidad de los textiles. La electrónica permite dar a los tejidos una rudimentaria forma de inteligencia, permitiéndoles sentir el entorno y responder a él [1] [6] [7] [8].

El surgimiento de los e-textiles provoca cambios en la visión tradicional que se tenía de los textiles, y crea nuevos usos y aplicaciones a partir de tecnologías integradas en ellos. Algunos ejemplos de la integración de electrónica y textil incluyen: electrodos textiles, circuitos impresos sobre textiles, iluminación integrada en prendas, entre otros [1]. Los e-textiles se tratarán más ampliamente más adelante.

### 3.6. Textiles con nanotecnología

La nanotecnología es el estudio, diseño, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia [2]. En la industria textil esto puede emplearse para la fabricación de nanofibras de polímeros (entre 50 y 500 nm), para aplicar nanoacabados a materiales textiles, para obtener capas de tejidos con nanopartículas, etc. [4].

Las nanotecnologías están siendo orientadas, en el caso de los textiles, a la fabricación de tejidos con propiedades antimanchas, antibacterias y antiviruses, antiolor, retardantes de llama, absorbentes de rayos UV, con propiedades antiestáticas, etc. [4].

Entre las aplicaciones textiles que se han conseguido con procedimientos nanotecnológicos vale mencionar: la nanoencapsulación de acabados frescos a fin de obtener más duración al lavado; la reproducción del efecto autolimpiador en la superficie de tejidos que tienen ciertas plantas (como la de loto) y las alas de algunos insectos, que les permite mantenerse limpias de polvo y agua [4]; y los tratamientos con plasma que permiten cambiar las características superficiales (transformando su nanoestructura) de fibras y tejidos, modificando principalmente las propiedades vinculadas a la higroscopicidad de los materiales [4]. También han conseguido tejer una camisa que utiliza nanotubos de carbono de forma conjunta con las fibras tradicionales, la cual es ultraligera, resistente, transpirable, antimanchas, prácticamente no requiere de plancha, pero es todavía demasiado costosa para comercializarse [4]. Adicionalmente, en la Universidad de Stanford se ha demostrado que los tejidos con nanotubos de carbono pueden generar electricidad cuantificable y almacenable, al formar sencillos ultracapacitores.

### 3.7. Áreas de aplicación

Las áreas más estudiadas en relación a los textiles inteligentes, y por tanto donde se espera el desarrollo de nuevo conocimiento, tienen que ver con su conductividad eléctrica, los sensores integrados para uso médico, las prendas con control de temperatura, así como los nanotextiles [1]. La investigación en desarrollo de prendas inteligente y aplicaciones para servicios personalizados, especialmente para propósitos de monitoreo, ha crecido significativamente a nivel mundial en los últimos años. [2]. La madurez actual de muchas de estas tecnologías permite generar un sinnúmero de aplicaciones, de forma que las empresas están sólo limitadas por su creatividad y por las estrategias de adopción de tales tecnologías [1].

Además de algunas aplicaciones de textiles inteligentes que ya se han mencionado, otras que se encuentran disponibles en el mercado tienen que ver con aspectos estéticos y de alto rendimiento. Hay textiles que:

- Que pueden cambiar de color, o se iluminan mediante la utilización de LED y fibras ópticas.
- Son fotosensibles para brillar en la oscuridad.

- Captan energía del ambiente mediante el aprovechamiento de las vibraciones, el sonido o el calor, reaccionando a esta entrada.
- Mejoran el rendimiento (regulan la temperatura corporal, reducen la resistencia al viento, etc) teniendo un gran impacto en lo atlético, industrias militares, deportes extremos.
- Protegen contra riesgos ambientales extremas como la radiación y los efectos de los viajes espaciales.
- Liberan de forma controlada medicamentos, cremas hidratantes, perfumes etc.
- Ayudan a reducir hemorragias de tejidos lesionados, o a hidratar (con Aloe vera, Vitamina E) para restauración de tejidos en pacientes quemados
- Integran circuitos electrónicos y sensores que monitorean diferentes variables del individuo y las transmiten a otros dispositivos que la procesan.
- Integran fibras fotovoltaicas dispuestas en nanocapas, basadas en componentes poliméricos orgánicos que permiten generar electricidad.
- Permiten crear moda innovadora (tecnología usable) en general.

#### 4. Tecnologías vestibles (wearables) y textiles electrónicos

Las tecnologías vestibles o *wearables* alude a dispositivos electrónicos que se pueden vestir, poner, portar o transportar [9] (desde una zapatilla hasta un anillo), para monitorear y sentir lo que se hace y se siente, o simplemente actuar como una extensión del cuerpo. La información que se recolecta se comparte, con el objetivo de recibir respuestas antes esas sensaciones o deseos o gustos que fueron monitoreados [9].

Esto lleva la tecnología tan cerca como es posible al cuerpo sin ser intrusiva. Es un área emergente donde los diseñadores tienen mucho que decir. Hay un espacio para la exploración en el diseño, para enloquecer, y para crear aplicaciones en el mercado de las tecnologías existentes. La principal habilidad de un diseñador es ilustrar conceptos mediante cualquier cosa a su alcance. Hay un montón de productos para ser imaginados, prototipados y fabricados [6].

En los campos que más se utilizan los e-textiles, hasta el momento, son la salud, el medioambiente y el deporte (movimiento, fuerza) ya que detectan sensaciones corporales (temperatura corporal, ritmos, entre otras cosas) y sensaciones externas (temperatura ambiente, entre otras) [9].

La utilización de ciertas tecnologías y de nuevos conceptos tales como la “internet de las cosas” (o de los objetos) o la realidad aumentada, implican la inclusión de dispositivos *wearables*, porque algunas de sus características incluyen conceptos como la portabilidad y la ubicuidad, donde no se precisa estar frente a una computadora para recibir la información que un objeto quiere enviar [9]. Ejemplos de estas tecnologías son los *SmartGlass* o los *SmartWatch*.

Muchos de los wearables, ropa inteligente, y proyectos de computación portátiles implican el uso de textiles electrónicos [7]. Sin embargo, los textiles electrónicos son distintos de los *wearables*, porque se hace hincapié en la integración de telas con elementos electrónicos. Además, los e-textiles no necesitan ser portátiles o vestibles, por ejemplo, también se encuentran en el diseño de interiores. [7]. En este sentido, se puede decir que algunos objetos que integran la internet de los objetos (o de las cosas) no se llevan puestos. Sin embargo, cumplen con una de las características de los *wearables*: la capacidad de dar un *feedback* a través de la información que recogen sus sensores [9].

Los textiles electrónicos son una novedosa e impactante propuesta en la industria de la moda que algunos diseñadores han ido adoptando en sus creaciones de prendas, bolsos y accesorios [7]. El textil es la plataforma común donde materiales inteligentes (fibras, electrónica, etc.) son integrados y las propiedades de estos, son aumentadas mediante la combinación de química y procesos de superficie [2]. Se caracterizan por su valor artístico, tecnológico y funcional [7].

El diseño de circuitos electrónicos fue durante mucho tiempo reservado solamente a ingenieros. Actualmente existen herramientas que simplifican el acceso a la tecnología para el prototipado de electrónicos. Se trata de tarjetas microcontroladas, basadas en Arduino, diseñadas para textiles electrónicos y vestibles, que pueden ser cosidas con hilo conductor a telas, junto a la fuente de alimentación, los sensores y los actuadores [7]. El objetivo de utilizar Arduino es que diseñadores de textiles y de modas sean capaces de realizar sus ideas por sí mismos. Además, como Arduino son plataformas software y hardware abiertos, cualquiera puede hacer modificaciones para mejorar sus creaciones. LilyPad y Arduino Mini son dos de las más populares tarjetas microcontroladas para *wearables* [6] [7].

El campo relacionado de los e-textiles explora como la electrónica y la funcionalidad computacional se puede integrar en las fibras textiles. Estos sistemas sólo pueden ser concebidos a través de avances en áreas de investigación como fibras y polímeros, procesamiento avanzado de material microelectrónico, nanotecnológico o de comunicaciones, estos son mínimamente invasivos, cómodos, usables y sensibles al esfuerzo [2].

El campo de la e-textiles se puede dividir en dos categorías principales:

- E-textiles con dispositivos electrónicos clásicos tales como conductores, circuitos integrados, LED y baterías convencionales incorporados en prendas.
- E-textiles con electrónica integrada directamente en los sustratos textiles. Esto puede incluir, ya sea electrónica pasiva tales como conductores y resistencias o componentes activos, como transistores, diodos, y células solares.

La mayoría de investigaciones y proyectos de e-textiles comerciales son híbridos donde los componentes electrónicos incorporados en el textil están conectados a dispositivos o componentes electrónicos clásicos. Algunos ejemplos son botones táctiles que se construyen completamente en formas textiles mediante el uso de tejidos conductores, que a su vez están conectados a dispositivos tales como reproductores de música o LED que están montados en redes tejidas de fibras conductoras para formar pantallas.

Una nueva clase de materiales electrónicos, que son más adecuados para los e-textiles, son los de la electrónica orgánica, diseñados como tintas y plásticos, y que pueden ser tanto conductores eléctricos como semiconductores. Algunos de los trabajos más avanzados que se han demostrado en el laboratorio incluyen:

- Transistores de fibra orgánica: los primeros que son completamente compatibles con la fabricación de textiles y que no contiene metales en absoluto.
- Las células solares orgánicas sobre fibras.

Entre las principales características de las aplicaciones de los e-textiles se cuentan: utilización de elementos flexibles, poco peso, bajo impacto ambiental, bajos costos de fabricación, etc. Una de las preocupaciones de los e-textiles es el hecho de poder ser lavables, por lo tanto, los componentes electrónicos tienen recubrimientos aislantes para evitar daños durante el lavado.

## 5. Aplicaciones presentes y futuras de los wearables y textiles electrónicos

Originalmente las prendas con e-textiles fueron desarrolladas para proteger a astronautas de variaciones térmicas, pero a día de hoy las aplicaciones de e-textiles se han extendido por todo el mundo debido al costo decreciente de la tecnología y a la utilización extendida de dispositivos móviles por diferentes segmentos de la población [1].

Tejidos y prendas de vestir que cambian sus propiedades, como el color y la forma, y que incorporan funciones más allá de la estética, como la detección de riesgos para la salud, y en general, la integración de varios procesos, que unidos al tejido permitirán cumplir con una serie de funciones como valor agregado al de proteger el cuerpo y darle comodidad y en algunos casos, estatus, es el futuro que plantean los expertos para los e-textiles [2] [3].

En la incorporación de elementos electrónicos a la vestimenta han sido claves la sustitución de estructuras rígidas por otras flexibles y la miniaturización; Estos elementos no deben afectar al estilo de la prenda ni a su tacto, y ser suficientemente robustos para resistir el lavado o la limpieza en seco, o incluso los desgarros [4].

Los textiles electrónicos son considerados promotores relevantes de mejor calidad de vida y progreso para el biomonitoreo, rehabilitación, ergonomía, telemedicina, teleasistencia, y medicina deportiva [2].

Entre los avances más notables de los textiles inteligentes e interactivos, están las prendas de monitoreo personalizado, además de gran confort y suavidad, registran, procesan y transmiten señales que se utilizan a su vez para analizar e investigar todo tipo de procesos. Sensores impresos, tanto para la monitorización fisiológica como ambiental, han sido integradas en textiles como el algodón, Gore-Tex, y neopreno. Así por ejemplo, se pueden crear prendas que:

- Monitorean la salud y los signos vitales del portador, como la frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria, temperatura, actividad y la postura.
- Mejoren el desempeño físico de los deportistas y hagan adquisición de datos de sus entrenamientos.
- Vigilen la fatiga de pilotos y conductores, o de personal que maneje materiales peligrosos.
- Indiquen cuando un bebe tiene fiebre.
- Permitan recuperar la percepción sensorial que previamente se había perdido por accidente o nacimiento.
- Permitan leer y almacenar la postura y movimientos de quien los viste (textiles tipo "avatar"). Para seguir la posición y el estado de soldados en la acción, por ejemplo.
- Capturen imágenes sin necesidad de lentes.

Dos ejemplos de camisas inteligentes son: La "Life-Shirt", que monitoriza 30 funciones vitales en continuo y soporta más de 100 lavados sin alteración, y la "smart T-shirt", con aplicaciones en medicina militar, que consta de una red de fibras ópticas y conductoras que envían datos de un soldado herido, acerca de la localización y la naturaleza de la herida, para que un médico pueda evaluar la herida y aconsejar el tratamiento. Esto podría tener también aplicaciones para bomberos, policías, etc. [4].

El software con el que se puede equipar a este tipo de camisetas analiza toda la información recogida para detectar el estado de ánimo del portador; los momentos de estrés, de relax, de placer o de intensidad laboral, etc. El usuario recibe toda la información en tiempo real en su dispositivo móvil, de manera que la camiseta le puede dar consejos del tipo "te estás estresando, trata de relajarte", pudiendo llegar incluso a prever el futuro de la salud del portador, como por ejemplo, advirtiéndolo de un posible infarto [3].

Algunas aplicaciones pueden ser aprovechadas para personas discapacitadas. Por ejemplo, la empresa Lechal Shoes desarrolló unas plantillas para zapatos que, conectadas al celular o un GPS, reciben información para dirigir al usuario por una ruta prefijada, convirtiendo las instrucciones de dirección (derecha, izquierda, etc.) en pequeñas vibraciones en los pies. En su origen, estas plantillas fueron diseñadas para las personas invidentes [7].

En opciones de comunicación, las prendas por si solas son una herramienta poderosa. La forma en que una persona viste habla de sus gustos, humor y sentimientos; el color, el material que se escoge, es un tipo de lenguaje que presenta la persona al mundo exterior

[2]. Además de esto, se han desarrollado proyectos para recibir información y mostrar gráficos o elementos animados sobre una prenda de vestir, mediante pantallas flexibles de LED o de fibras ópticas tejidas [4].

La conectividad y la comunicación ubicua es otra de las ventajas importantes a explotar en los *wearables*. Así por ejemplo, el internet de las cosas y las redes sociales se unen en el proyecto *Social Textiles*, el cual es desarrollado por estudiantes y graduados del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) y que fue busca hacer de las redes sociales algo más tangible, mediante la visibilidad que genera la vestimenta en la interacción social [10]. Uno de sus prototipos es una camiseta con una serie de sensores y un patrón de letras estampadas con tinta termocromática, que se comunica mediante *Bluetooth* con una aplicación especialmente diseñada para equipos celulares [10]. De esta manera, cuando el portador se acerca a otra persona que comparte sus intereses, la camisa le avisa mediante una vibración y las letras son estimuladas, a través de pequeños pulsos eléctricos, para aparecer y desaparecer mostrando actividades en común o los gustos que comparten.

Mientras otros dispositivos como *Google Glass* o un reloj inteligente, ofrecen conectividad e información de forma individualizada al que los viste, el proyecto del MIT le da un giro importante a la situación ya que la información en la camisa está destinada a que la vean otros [10].

La idea de enviar información desde el cuerpo de las personas, gana importancia con proyectos donde los usuarios tienen acceso a diferentes funcionalidades: abrir puertas, compartir información de contacto o utilizar equipos inteligentes [10]. Así, se podría estar de "internet de las personas", en donde son los cuerpos de los individuos los que están conectados, y son los encargados de producir, enviar y recibir información [10].

Se podría pensar en utilizar un *wearable* que sirva como nexo entre nodos de una "red social" como punto neurálgico de intereses, opiniones, etc., personalizando respuestas a necesidades individuales, y permitiendo bi o múltiple direccionalidad entre usuarios. Por ejemplo, en una escuela, se podría crear una "red docente-estudiantes", de modo que el docente obtenga información sobre como los estudiantes perciben el aprendizaje, cuáles son sus necesidades y demandas [7].

Otra opción de interés tiene que ver con la energía necesaria para que las prendas electrónicas funcionen. Hoy en día esta energía procede de pequeñas baterías cosidas al tejido, lo cual puede ocasionar algún problema de salud. Pero a futuro se espera que la energía proceda de energía solar o del movimiento del portador [4].

Como se menciona anteriormente, los e-textiles no solo están dirigidos a la producción de *wearables*. El Centro Tecnológico del Mueble (Citma), con colaboración del Centro Tecnológico del Textil de Andalucía (CITTA), ha desarrollado el Proyecto Sericum: Textórica aplicada al mobiliario tapizado. La finalidad del proyecto es facilitar al sector del mueble un material textil innovador que permita diversificar la oferta existente en el mercado y poder ofrecer productos diferenciadores de la competencia [8].

Entre las aplicaciones para el mobiliario tapizado están: mandos de control con tecnología táctil, consistente en dotar al textil de un *display* que permita controlar accesorios con los que cuente el mobiliario, equipos multimedia, e incluso dispositivos en el campo de la domótica [8]. Aitex y Unifam han desarrollado una alfombra inteligente de detección de personas, que puede ser utilizada como alarma de intrusión, o como contador de entrada a hoteles, centros comerciales, etc. [4].

También está la incorporación de elementos de tecnología LED con el fin de aportar luz ambiente, y textiles hilados con fibra óptica que permite dotar al tejido de iluminación propia [8]. The ReForm Studio (Suecia) ha diseñado una cortina que responde al ciclo diario de la luz solar. Una cara de esta cortina almacena la luz del sol durante el día (contiene colectores solares), y la otra cara la emite durante la noche (contiene materiales emisores de luz), contribuyendo a ahorrar energía [4].

Los desarrollos en nanotecnología abren la posibilidad de fabricar nuevos materiales con propiedades extraordinarias, por ejemplo, materiales más fuertes, pero con menos peso, nuevas aplicaciones informáticas con componentes increíblemente más rápidos o sensores moleculares, entre otras muchas aplicaciones [2].

Científicos del MIT, han aplicado nanotecnologías a fibras para hacerlas capaces de detectar y producir sonido. Esto abre la posibilidad de producir tejidos que funcionen, por ejemplo, como micrófonos, que podrían capturar el habla del que las porta o incluso transmitir señales sobre funciones corporales, como el flujo sanguíneo o la presión arterial [2].

## 6. Universidad, Empresa y Panorama

En América Latina los *wearables* y los e-textiles son algo incipiente, pero en otros lugares del mundo son una tendencia de gran importancia [11]. La implementación tecnológica en textiles está creciendo a grandes pasos, producto de importantes inversiones en I+D de empresas públicas y privadas en esta área, que se considera como un tópico emergente con alta potencialidad de desarrollo, llegando incluso a ser citada como un modelo que permitiría integrar soluciones creativas en campos poco usuales, siendo ésta una clave para lograr sostenibilidad y crecimiento de este sector [11].

Esta vertiente industrial que permitiría, en un mediano plazo, la popularización de los textiles electrónicos, depende de la combinación de dos sectores empresariales muy consolidados y con un alto grado de independencia entre ellos, como el sector textil y de la moda y el sector de la electrónica [3]. Adicionalmente, para obtener resultados en este proceso, es necesario que las Instituciones Universitarias aporten a este cambio con proyectos de investigación novedosos en el área del diseño y la moda textil, con capacitación idónea de técnicos, tecnólogos y profesionales, garantizando la actualización permanente en su saber específico [2]. La pauta la han puesto instituciones como el MIT, que fue uno de los primeros espacios donde se comenzó a tantear e investigar las posibilidades de los e-

textiles [11]. En Colombia, la Fundación Gilberto Alzate Avendaño fue una de las instituciones en dar los primeros pasos, llevando a cabo un laboratorio de textiles inteligentes en el 2013, convocando equipos multidisciplinarios: diseñadores (industriales, de textiles, de moda), biólogos, arquitectos, programadores, ingenieros, sociólogos y artistas, para presentar investigaciones y proyectos verdaderamente vanguardistas en el Círculo de la Moda de Bogotá [11].

Es necesario fomentar, a través del sistema educativo, una dinámica creadora de riqueza a largo plazo, la cual surge de la innovación y no de la optimización. Esto les permitirá a los diseñadores cerrar cada vez más la brecha que hay entre la producción del conocimiento y la apropiación del mismo por parte de los sectores productivos [2].

Es necesario propiciar alianzas estratégicas entre sector académico y el industrial (textil), para invertir en tecnología y en nuevos desarrollos, articulando los recursos creativos y productivos, con la formación de los profesionales, no solo del mismo sector sino de otras áreas, para guiar la innovación en sus productos y servicios. Los departamentos de diseño deben contar con equipos interdisciplinarios de profesionales que tengan una mirada distinta y cuyas propuestas pretendan resolver situaciones o necesidades del consumidor, evaluando la viabilidad de cada una [2]. Es necesario también, que las inversiones de las empresas en tecnología le den experiencia y seguridad a la hora de proponer nuevos procesos, evitando recurrir a la copia total o parcial de productos y proyectos [2].

La moda del futuro será la conjunción del trabajo del científico y el artista. Las fronteras entre arte y ciencia se han venido diluyendo, ya que los científicos, cada vez más, ejercen un acto creativo y por su parte los artistas han venido adoptando el método científico. Por eso, cuando ambos suman esfuerzos surgen piezas que irrumpen con toda su fuerza en el futuro, perfilando nuevos horizontes [11].

Tanto la industria electrónica como la textil son capaces de producir a velocidades altas [1]. El reto está en renovar las estrategias de fabricación y combinar la producción textil con la electrónica, de modo que se traslade la funcionalidad dentro de las fibras y fabricarlas con un proceso de manufactura rápido [3]. La capacidad de innovación de las empresas puede definirse como el conjunto de aptitudes necesarias para adaptarse a clientes cambiantes y a las nuevas oportunidades tecnológicas, configurando el entorno en el que operan para desarrollar nuevos productos y procesos [1]. Así, las compañías textiles y electrónicas en todo el mundo que se están uniendo para crear e-textiles, podrían ser perfectamente los gigantes del mañana.

## 7. Conclusiones

La moda del futuro es la convergencia de la industria textil con otras áreas como la medicina, la electrónica, lo computacional o la nanotecnología.

En general, se busca que los textiles ofrezcan cada vez mayores funcionalidades: monitorización, calefacción, electroluminiscencia, comunicación y conectividad, etc., sin perder las propiedades y características de los textiles convencionales como su flexibilidad, tacto, apariencia, y la posibilidad de doblarlos, torcerlos e incluso lavarlos.

El futuro de los wearables y los e-textiles puede alcanzar a casi todos los sectores de la población, dado que tendrán incidencia en el terreno laboral, de seguridad, salud, ocio, decoración, etc. Las posibilidades son infinitas y por eso se requiere constate investigación.

La conectividad de los *wearables*, como parte del internet de las cosas, permite al usuario un tipo de comunicación en la que se interactúa con otras personas y elementos del entorno, haciendo que las experiencias sean más agradables sin estar limitado solo a un dispositivo móvil o celular. Las tecnologías ubicuas nos dan una nueva visión de la sociedad con una mejor calidad de vida, a través de facilitar el manejo de la información.

La industria nacional del Textil/Confección, necesita desarrollar una mentalidad, que le permita guiar la innovación en sus productos y servicios, propiciando alianzas estratégicas con el sector académico y e invirtiendo en tecnología y en nuevos desarrollos, articulando los recursos creativos y productivos, con la formación de los profesionales que nutren las empresas. Aquellas empresas que sean capaces de entender cómo incorporar las tecnologías inteligentes y convertirlas en nuevos productos textiles, serán creadoras de ventajas competitivas frente a otras del mercado.

## 8. Referencias

[1] M.L. Torres B., J.N. Martínez, L.C. Meza A. y L.P. Muñoz M., "El cambio tecnológico en el caso de los textiles inteligentes: Una aproximación desde las capacidades dinámicas", *Espacios*, Vol. 37 (Nº 08) 2016, pp. 12. Disponible: [http://www.revistaespacios.com/a16v](http://www.revistaespacios.com/a16v37n08/16370813.html)

[37n08/16370813.html](http://www.revistaespacios.com/a16v37n08/16370813.html)

[2] S.M. Peláez B., "Fibras inteligentes y textiles interactivos", 30 de [octubre de 2010](#). Disponible: <https://disenomodas.wordpress.com/2010/10/30/58/>

[3] C. Villagómez O., M. Romero G. y J.C. Saldaña H. Red de estudios críticos en el arte y el diseño – III. Intersecciones entre el arte, el diseño y la tecnología. Universidad de Guanajuato. México 2015. ISBN: 9786074413939.

[4] J.R. Sánchez Martín, "Los tejidos inteligentes y el desarrollo tecnológico de la industria textil", *Técnica Industrial* (No. 268), Abr. 2007.

[5] R. Eisenbaumer y J. Reynolds, *Manual de polímeros conductores*. Ed. Terje Skotheim, Canesis Ltd, Little Ilkley Lane, Reino Unido.

[6] T. Olsson, D. Gaetano, J. Odhner y S. Wiklund. 2011. *Open softwear TM. Prototipado electrónico textil y computación "wearable" usando Arduino*, 2ª Edición, JMS Mediasystem, Vellinge, Suecia, 2011. ISBN: 978-91-979554-0-9. Disponible: [www.softwear.cc](http://www.softwear.cc)

- [7] Textiles interactivos: otra forma de hacer circuitos electrónicos (2014, Ene 9). Disponible: <http://hacedores.com/textiles-interactivos-otra-forma-de-hacer-circuitos-electronicos/>
- [8] Texttrónica aplicada al mobiliario tapizado. Disponible: <http://www.ctcon-rm.com/CC/jsp/Portal/detaIleNoticia.jsp?ce=CETEM&tipo=1&cr=2486&cs=1604>
- [9] B. Lippenholtz. *Hablamos de... wearable* (2015, Nov 24). Disponible: <https://www.educ.ar/sitios/educar/noticias/ver?id=128897>
- [10] N. Paglione. ¿Una red social en la remera? (2015, Mar 26). Disponible: <https://www.educ.ar/sitios/educar/noticias/ver?id=125718>
- [11] Textiles inteligentes en el CMB 2013. Disponible: <http://www.fgaa.gov.co/textiles-inteligentes-en-el-cmb2013#.V52D9tLhC00>
- [12] K.B. Belda, "La ropa del futuro será electrónica", *Revista Método*, Universidad de Valencia, Nov 2013, ISSN 2174-9205. Disponible: <http://metode.cat/es/Noticias/la-roba-del-futur-sera-electronica>

## **Integración de Tecnologías Energéticamente Eficientes en Sistemas de Climatización Operados con Energía Térmica**

### **Integration of Energy Efficient Technologies in HVAC systems Operated with Thermal Energy**

*Jorge H. Gallego Orrego<sup>1</sup>, César A. Isaza Roldán<sup>2</sup>, Jorge A. Cardona-Gil<sup>3</sup>, Renato Torres Salazar<sup>1</sup> y Daniel A. López Chejne<sup>1</sup>*

*1: Centro de Investigación, Desarrollo y Calidad en Refrigeración y Climatización, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, P.O. 56006.*

*e-mail: [jorgehumberto.gallego@upb.edu.co](mailto:jorgehumberto.gallego@upb.edu.co), web: <http://www.upb.edu.co>*

*2: Grupo de Energía y Termodinámica (GET), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, P.O. 56006.*

*e-mail: [cesar.isaza@upb.edu.co](mailto:cesar.isaza@upb.edu.co) web: <http://www.upb.edu.co>*

*3: Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Ensayos a la Industria, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana, P.O. 56006.*

*e-mail: [jorgeandres.cardona@upb.edu.co](mailto:jorgeandres.cardona@upb.edu.co) web: <http://www.upb.edu.co>*

### **Resumen**

La tecnología actual para acondicionamiento de aire es altamente intensiva en su consumo de energía eléctrica, esto hace que sea necesario establecer principios y estrategias conducentes al ahorro energético y al uso eficiente de la energía con un fuerte carácter de sustentabilidad. Además, es sabido que ciertos refrigerantes, como los freones, producen un impacto ambiental al liberarse al ambiente, éstos afectan la capa estratosférica de ozono y contribuyen al efecto invernadero.

En Iberoamérica la principal iniciativa que ha surgido en el año 2001, con el ánimo de promover y difundir las tecnologías de producción de frío con energía solar, fue la Red RIRAAS (Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar, [www.riraas.net](http://www.riraas.net)) y actualmente en Latinoamérica básicamente se cuenta con una instalación en funcionamiento de aire acondicionado solar que opera en México, y una gran cantidad de prototipos de universidades y centros de investigación usados para la investigación y desarrollo de las diferentes tecnologías del enfriamiento. Con el artículo se pretende mostrar el desarrollo de un proyecto demostrativo y educativo de un sistema de climatización operado con energía solar, en el cual se usan tecnologías complementarias energéticamente eficientes que potencien su desempeño dentro del bloque de registro de la UPB, así mismo potenciar la investigación, desarrollo e inversión para conseguir una alta penetración de tecnologías de climatización eficiente y limpia. El desarrollo se ha dividido en 4 grandes fases, que inician con la simulación del sistema de refrigeración, en el cual se ha utilizado el software TRNSYS®; dimensionamiento y diseño básico del sistema de refrigeración; búsqueda y selección de equipos p.e. bombas; máquina de absorción, colectores solares,

entre otros; diseño de detalle de un sistema de climatización con energía solar térmica, en el cual se hace uso de un equipo de enfriamiento de agua por absorción, paneles radiantes y enfriador evaporativo indirecto. Entre los resultados obtenidos se encuentra el dimensionamiento y diseño detallado del sistema y la obtención del equipo de absorción y enfriamiento evaporativo soportados en un diseño simulado al emplear los softwares TRNSYS® y MATLAB®. Lo anterior permitió determinar los niveles de carga adecuados para cada uno de los equipos involucrados en el sistema, además de asegurar los parámetros de calidad de potencia para atender los requerimientos de energía eléctrica y aire acondicionado.

**Palabras claves:** Eficiencia Energética, Refrigeración por absorción, Refrigeración Solar Térmica.

## Abstract

Current air conditioner technology is highly intensive on its electric energy consumption, this makes it necessary to establish principles and strategies that lead to energy efficiency with a strong character of sustainability. It is also known that some refrigerants, such as the freons, produce an environmental impact when they are released to the environment, that affects the stratospheric ozone layer and help with the greenhouse effect. In Iberoamerica the main initiative that emerged in 2001, with the aim to promote and spread the technologies that produce cold with solar energy, was the RIRAAS (Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar, [www.riraas.net](http://www.riraas.net)), and nowadays Latin America counts basically with one functioning facility of solar air conditioner located in Mexico, and a great amount of prototypes from universities and research centers that are used to research and develop different cooling technologies.

The intention with this paper is to show the development of a demonstrative and educational project of an air conditioning system operated with solar power, that uses complementary energy efficient technologies to boost its performance on the UPB's building number 24, and to promote research, development and investment to achieve a high penetration of clean and efficient air conditioning technologies. The development has been divided in 4 major phases, that start with the simulation of the refrigeration system, in which the TRNSYS® software was used; dimensioning and design of a basic refrigeration system; search and selection of equipment, e.g, pumps, absorption machine, solar collectors, among others; detailed design of an air conditioning system with thermic solar power, in which a water cooling by absorption equipment, radiant panels and an indirect evaporative cooler are used. Among other results is the sizing and detailed design of the system and the obtaining of the absorption and evaporative cooling equipment, supported by a simulated design the TRNSYS® and MATLAB® software. This allowed to determine the correct load levels for each equipment involved in the system, and also to ensure the quality of the power parameters to address the requirements of electrical energy and air conditioning.

**Keywords:** Traducción de las palabras claves

## 1. Introducción

Los sistemas de refrigeración por absorción de simple efecto (con un sólo generador), accionados con energía solar requieren de la unión de varios componentes para que se obtenga un adecuado funcionamiento. Entre los componentes principales se encuentran: los Colectores Solares, la Máquina de Absorción, la Torre de Enfriamiento, un Tanque de Agua Caliente, un Calentador Auxiliar, un Tanque de Agua Helada y el sistema de control.

El propósito de un sistema de control en una planta de refrigeración es proporcionar un funcionamiento automático para evitar el costo de mano de obra de los operadores o donde el control es demasiado complejo para el funcionamiento manual.

Lo anterior genera máxima eficiencia y economía durante el proceso [1]. En varias partes del mundo se han desarrollado este tipo de sistemas de aire acondicionado operados con energía solar mediante un ciclo de refrigeración por absorción, es el caso de Puerto Rico, en donde Meza et al. [2] Describen una instalación experimental compuesta de un *Chiller* de Absorción 35 kW (10 TR), movido por un arreglo de 113 m<sup>2</sup> de colector de placa plana de superficie selectiva, un estanque de almacenamiento de 5.7 m<sup>3</sup>, una torre de refrigeración de 84 kW de capacidad y con la aplicación de un control *ON-OFF* para la estabilidad y manipulación del sistema.

Los sistemas de refrigeración por absorción en su mayoría son controlados por controladores de encendido/apagado o estrategias de control proporcional [3]. Los controladores de encendido y apagado control *ON-OFF* conducen a una pérdida significativa durante el período de desconexión debido a que se debe reiniciar el proceso y existe una migración de refrigerante durante este ciclo [4].

Labus [5] en su tesis doctoral desarrollada en la Universitat Rovira I Virgili de España, llevó a cabo un control de supervisión para enfriadoras de absorción de pequeña potencia, en las cuales utilizó dos estrategias de control óptimas: la primera se encuentra basada en la modelación avanzada con Redes Neuronales Artificiales (RNA), mientras que la segunda utiliza métodos de optimización con Algoritmos Genéticos (AG). Labus [5] demuestra que estas dos estrategias pueden ser implementadas para el control online de sistemas de aire acondicionado con enfriadoras de absorción.

El esquema de control conocido como de temperatura de generación constante, se emplea, en configuraciones de climatización solar con caldera como sistema auxiliar, que sirve para apoyar energéticamente el lazo de agua caliente, normalmente contra el depósito de alta temperatura. Esta configuración ha sido analizada en profundidad por Kohlenbach [6] con un equipo de absorción de simple efecto de Agua y Bromuro de Litio de 10 kW, de la firma Phönix SonnenWärme AG [7].

El sistema analizado por Kohlenbach [6] permite el acoplamiento directo entre el campo de captadores y el equipo de absorción, al hacer un *baipás* al depósito. Esta es una estrategia que permite los arranques tempranos por la mañana. Las diferentes estrategias de control (PID y *ON-OFF*) han sido ampliamente discutidas en la literatura por Kohlenbach [6]; el cual concluye, tras un análisis por simulación, que la mejora en el consumo eléctrico de diferentes estrategias de control de bombas en los circuitos de agua caliente (*ON-OFF* y PID) redundan en un 6 %, al mismo tiempo, que indica como infructuosa la búsqueda de la misma conclusión mediante la experimentación, al no encontrar en ese caso diferencias significativas en su campaña de ensayos. Con respecto al agua helada, Kohlenbach [6] aplica técnicas clásicas de control *ON-OFF*, P, PI y PID, con los cuales ajusta la abertura de una válvula de tres vías que se encuentra a la entrada del generador de la Máquina de Absorción y que varía el flujo de agua caliente para variar la temperatura del agua helada. Kohlenbach [6] además de los controles realizados al flujo de los circuitos de agua helada y agua caliente, controla la velocidad del ventilador de la torre de enfriamiento con un control PID.

Las reglas de lógica difusa para un controlador PID en un sistema de control para un refrigerador de absorción fueron introducidos por Ogawa et al. [8]. El sistema controlado fue adaptado para someter a la temperatura de salida del medio de enfriamiento por medio de un control por lógica difusa, en el cual se ajusta la cantidad de calor suministrado al generador.

En Chile desarrollaron la Optimización de un Sistema de Refrigeración por Absorción asistido por Energía Solar al utilizar TRNSYS®. Para este sistema utilizaron TRNSYS® 16. El caso de estudio considerado de esta simulación, correspondió a un sistema de refrigeración solar por absorción que atiende una demanda de aire acondicionado sujeta al clima de la ciudad de Santiago. A partir de la simulación realizada en el entorno TrnBuild de TRNSYS® para determinar la demanda de aire acondicionado de la vivienda en estudio, se obtuvieron resultados que indican que esta demanda se inicia a partir de agosto y hasta el mes de abril, con períodos críticos para los meses de diciembre y enero en los cuales se produce la carga máxima de 23 kW (6.55 TR). Un controlador *ON-OFF* que actúa sobre la bomba del sistema para controlar el encendido y apagado del circuito de agua caliente. Posee un corte por alta temperatura, el cual es activado si la temperatura de entrada al colector es mayor a 98 °C. Se han considerado 2 °C y 0.15 °C como valores de *upper dead-band* y *lower dead-band*, respectivamente [9].

Lygouras et al. [10] realizaron la implementación de un controlador por lógica difusa de estructura variable para un sistema de aire acondicionado con energía solar. Dos motores de corriente continua se utilizan para manejar la bomba del generador (agua caliente) y la bomba de alimentación (agua helada) del sistema de aire acondicionado con energía solar. Dos estrategias de control diferentes fueron aplicadas para controlar la regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua: el primero es un controlador difuso puro, su salida es la señal de control para el controlador del motor de corriente continua. Una matriz *fuzzy* 7 x 7 asigna la salida del regulador con respecto al valor del error y la derivada del error. El segundo es un controlador de dos niveles. El nivel inferior es un controlador PID convencional, y el nivel más alto es un controlador difuso que actúa sobre los parámetros del controlador de nivel bajo. La contribución de este diseño es que en el sistema de control la lógica difusa se implementa mediante software y un microcontrolador de 16-bits de bajo costo.

En Estados Unidos se proponen dos estrategias de control para un sistema de aire acondicionado con energía solar, con estas estrategias es posible generar un funcionamiento óptimo y una disminución en los costos operativos. El problema se resuelve al utilizar procedimientos de algoritmos genéticos implementados en MATLAB® para identificar las características de *pay-off* entre el costo diario de la energía, la carga térmica de la zona y la calidad del aire interior [11]. Utilizar algoritmos genéticos es más eficiente cuando el problema de optimización no es suave y uniforme o cuando la función de coste es ruidosa. La interacción entre las simulaciones del modelo y la herramienta de optimización (procedimiento de algoritmos genéticos en MATLAB®) se continúa hasta encontrar el resultado óptimo. Se debe tener en cuenta que cada modelo de componentes del sistema HVAC ha seguido un modelo conocido y validado en la literatura [12].

## 2. Disposición física del sistema

Aunque en Colombia los sistemas de absorción no son nuevos, la mayoría emplean quemadores a gas para los sistemas de calentamiento de agua lo que ha generado un vacío en el uso de energías renovables como colectores solares o quemadores de biomasa. Este proyecto busca analizar un sistema de refrigeración por absorción de efecto simple de LiBr-H<sub>2</sub>O empleando colectores solares como fuente de calor, con el fin de analizar costos, reducciones en la emisión de gases de efecto invernadero, entre otros. La Fig. 1 presenta la disposición física del equipo a implementarse dentro del bloque 24 de la Universidad Pontificia Bolivariana.

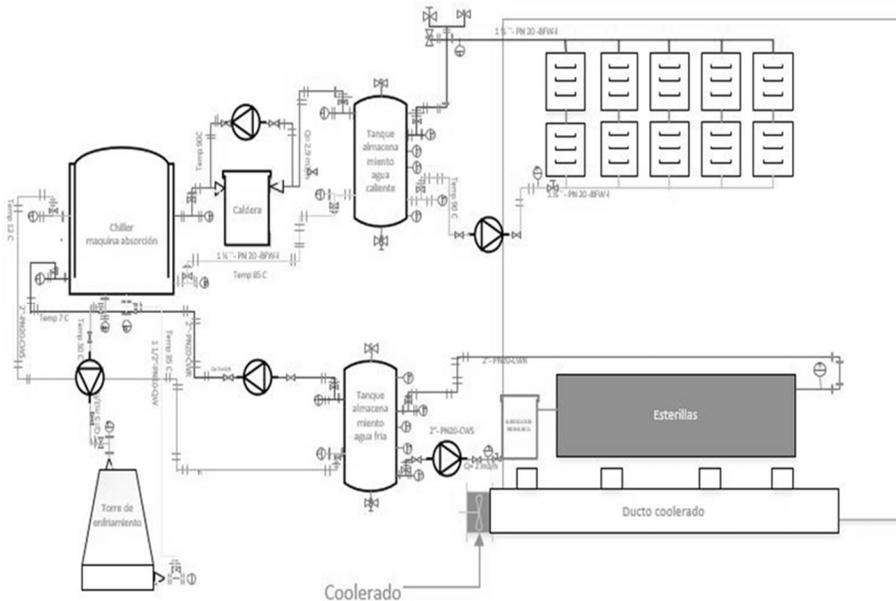


FIGURA 1. DISPOSICIÓN FÍSICA EQUIPOS AIRE ACONDICIONADO SOLAR

La máquina de absorción marca *Lucy Solar* a instalar dentro del sistema de refrigeración posee una potencia térmica de 11.5KW, adicionalmente el sistema está dividido en tres zonas principales: zona de agua caliente, zona de agua helada y zona de agua fría. La zona de agua caliente cuenta con 12 colectores solares de marca *Lucy Solar* tipo *Heat pipe* ubicados en un arreglo serie-paralelo en grupo de 2 Colectores, con el fin de garantizar un correcto equilibrio hidráulico y así prevenir una pérdida de caudal significativa ya que la bomba que impulsa el agua por la tubería necesitaría una mayor cabeza para pasar el agua por cada uno de los tubos si se conectaran en serie todos los colectores; mientras que en la conexión serie paralelo el agua debe pasar por 2 colectores simultáneamente para calentarse permitiendo seleccionar una bomba de menor potencia que a su vez cumpla con los valores establecidos de caudal donde se recomiendan valores entre 0.1 y 0.25 l/min/m.

Dichos colectores serán los encargados de calentar el agua a la temperatura de activación de la máquina de absorción (85°C) almacenándola en un tanque aislado de 1000L a través de la recirculación por medio de una bomba de funcionamiento *ON-OFF*; por esta razón el arreglo debe contar con válvula ruptoras de vacío, válvula de venteo, válvula de seguridad y sensores de temperatura a la entrada y la salida de los colectores con el fin de garantizar la integridad de los mismos ante las altas temperaturas del agua y la generación de vapor que aumente drásticamente la presión interna de la tubería.

Adicionalmente, para garantizar que la temperatura de entrada del chiller se encuentre en el rango adecuado se empleará un calderín de paso alimentado por gas natural que cumplirá la función de apoyo especialmente en horas de la mañana en los momentos que se requiera un arranque rápido del sistema.

Para la zona de agua fría se empleará una torre de enfriamiento de 15 Toneladas nominales de marca *Glaciar*, con su respectiva bomba debido a que los sistemas de absorción por LiBR-H<sub>2</sub>O pueden sufrir cristalización ante determinadas condiciones de temperatura obligando a detener el equipo hasta que logre de nuevo su fusión, por lo cual se hace necesario emplear sistemas de rechazo de calor que permitan mantener las temperaturas en zonas no críticas.

Por último, la zona de agua helada se encuentra conformada por un tanque aislado de 1000L para almacenar el agua de salida del chiller de absorción, una bomba de salida y un sistema de enfriamiento en recinto. Para este fin y con el propósito de incrementar la temperatura de evaporación en el ciclo de refrigeración por absorción se ha optado por la integración de tecnologías energéticamente eficientes de pared radiante, usando esterillas de agua helada. Los sistemas de refrigeración de los acondicionadores por aire, operan con temperaturas bajas. Una relación típica de temperaturas entre el local y la temperatura del evaporador para un sistema sólo-aire es de 7°C para el aire y 5°C para el evaporador. En un sistema de pared radiante esta relación es de 15°C para el agua helada y 13°C para el evaporador.

Dado que los sistemas de pared radiante absorben básicamente las cargas térmicas de calor sensible, es necesario instalar un sistema de ventilación que permita evacuar la carga latente o de humedad del recinto, además de los elementos contaminantes que deban ser eliminados. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente este requiere un caudal mucho menor de aire.

Por lo tanto, se ha seleccionado una tecnología energéticamente eficiente para el sistema de ventilación. Este está compuesto por un enfriador evaporativo indirecto M50 de marca *COOLERADO*, que reduce la temperatura del aire exterior a través del fenómeno de

enfriamiento evaporativo, pero sin el consecuente aumento de la humedad de la corriente de aire que ingresa al recinto. Esto se logra gracias a una tecnología que usa un intercambiador de calor entre la corriente de aire que se humedece y enfría, y otra corriente de aire que es enfriada por esta, pero no recibe humedad.

La climatización por enfriamiento evaporativo o adiabático es un proceso que enfría el aire cuando se evapora el agua; el calor latente de evaporación se absorbe del cuerpo del agua y del aire de los alrededores; como resultado, tanto al agua como al aire se enfrían durante este proceso.

Para el cálculo de los diámetros de las tuberías de cada uno de los tramos del sistema:

1. Colectores- tanque recolección agua caliente
2. Tanque almacenamiento agua caliente-chiller absorción (Incluido calentador)
3. Chiller absorción-tanque almacenamiento agua fría
4. Tanque almacenamiento agua fría-sistema esterillas
5. Chiller absorción-torre refrigeración

Se empleó la ecuación de Reynolds,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (1)$$

Que asociada a la ecuación de Swanne Jain para el cálculo de pérdidas y evaluando en el *software* EES dan como resultado:

$$D_{in_{tramo\_1}} = 0.02267 \text{ m}$$

$$D_{in_{tramo\_2}} = 0.01839 \text{ m}$$

$$D_{in_{tramo\_3}} = 0.01973 \text{ m}$$

$$D_{in_{tramo\_5}} = 0.02166 \text{ m}$$

Para el tramo 4 aún se requiere conocer los diámetros de las esterillas para pared radiante a instalar ya que este es un valor relevante en el cálculo de los diámetros y los tamaños de la tubería

### 3. Resultados y Análisis

Luego de analizar las cargas internas del recinto en diferentes horas laborales y desarrollar un modelo en SketchUp Pro y empleando OpenStudio y EnergyPlus, se logró determinar el comportamiento de la carga térmica con respecto a datos meteorológicos reales de la ciudad de Medellín en cada uno de los espacios del bloque a evaluar. La Fig. 2 ilustra la carga térmica del recinto a partir de las cargas internas del recinto (Fig. 3) y las cargas debidas a radiación solar, como se puede observar para la primera zona los equipos electrónicos correspondientes a equipos de cómputo y televisores ocupan la mayor parte de las cargas internas en el recinto.

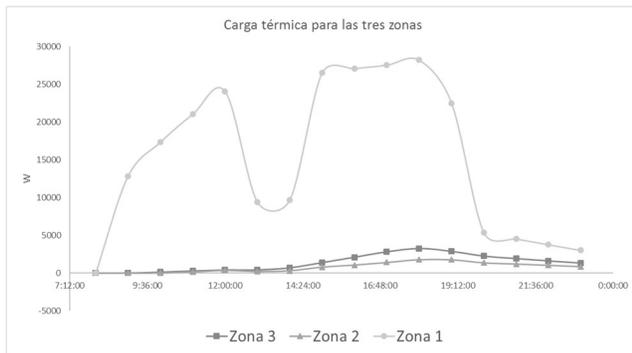


FIGURA 2. CARGA TÉRMICA PARA LAS TRES ZONAS DEL BLOQUE 24

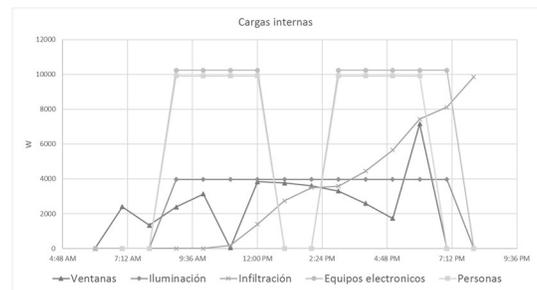


FIGURA 3. CARGAS INTERNAS DEL RECINTO

Como se puede observar que la zona que presenta mayor carga térmica es la zona 1, dicha zona contiene la mayor cantidad de cargas internas y la cual se quiere climatizar. Se puede observar además que durante las horas de descanso (12.00 p.m – 2:00 p.m) dicha carga térmica disminuye en cierta proporción, pero es debido a que durante esa hora cierto personal sale del bloque y por tanto disminuye la carga interna producida por las personas. Durante las horas de la tarde la carga interna aumenta y la transmisión de calor debe aumentar debido a que en horas de la tarde mientras el sol se oculta, la carga por radiación aumenta. Para algunos días del año la carga por infiltración permanecerá hasta ciertas horas de la noche, esta carga varía y es incierta ya que se ve influenciada por las condiciones climáticas del lugar como la velocidad y dirección del viento, además del diferencial de temperaturas y presión que pueda existir entre el interior del bloque y el exterior. Adicionalmente

Para realizar la simulación del sistema de control se integraron los resultados de la evaluación de la carga térmica con el ciclo de absorción de simple efecto con LiBr/Agua y los subsistemas de Colectores Solares, Torre de Enfriamiento, distribución de agua helada, acumulación de agua helada y caliente y en la Enfriadora Auxiliar; al utilizar el programa computacional TRNSYS®. La modelización se llevó a cabo mediante la parametrización de los componentes que ofrece el programa en la librería TESS.

Para la parte de los datos meteorológicos se procesaron datos reales de la ciudad de Medellín (en donde existen varias estaciones meteorológicas) a través del *software* Meteororm®, obtenidos por medio del Laboratorio CALAIRE de la Universidad Nacional de Colombia, cerca de la UPB, para que el *software* TRNSYS® los procesara en los formatos requeridos.

La simulación del sistema de control que se expone en este artículo de la instalación demostrativa, llevada a cabo en el *software* TRNSYS®, muestra la aplicación de un control PI para la variación de la velocidad del ventilador de la Torre de Enfriamiento, muestra dos controladores PI Difusos, uno realizado en la parte solar, para la variación del flujo de agua helada por medio de una válvula de tres vías que está conectada a la unidad manejadora (*Fan-coil*) de agua helada y otro para la variación de flujo de agua helada, pero en este caso, a través de una Motobomba; y muestra dos controladores ON-OFF, uno para la Motobomba de agua caliente de los Colectores Solares, que es desconectada en la noche para que no sean subutilizados y otro para el Calentador Auxiliar que siempre está encendido para alcanzar una temperatura de 90 °C en el generador del *Chiller* de Absorción, a menos que los Colectores Solares logren llegar a esta temperatura en el día, en este caso, el Calentador Auxiliar se apaga inmediatamente. La Fig. 4 muestra la disposición y los elementos de control dependientes de cada uno de los equipos a instalar dentro del sistema de aire acondicionado solar diseñados dentro del *software* TRNSYS®.

La Fig. 5 permite observar el comportamiento de la temperatura al interior del recinto a partir de un control PI implementado en la válvula instalada a la salida del tanque de agua fría, como se puede observar, aunque la temperatura presenta un comportamiento estable la idea es generar un algoritmo de control a partir de un PI Difuso que permita mejorar la estabilidad durante el tiempo.

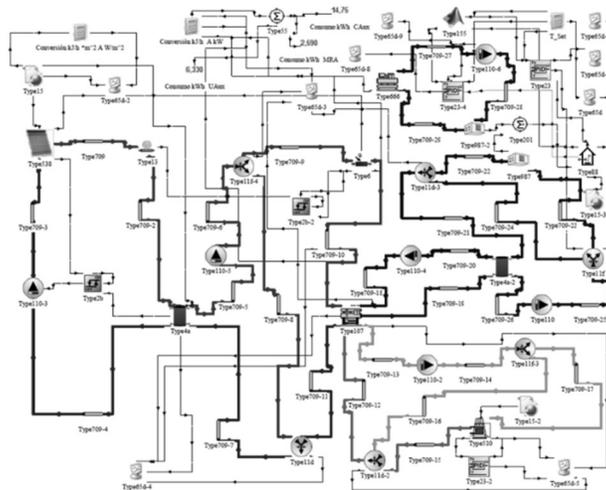


FIGURA 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR Y CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

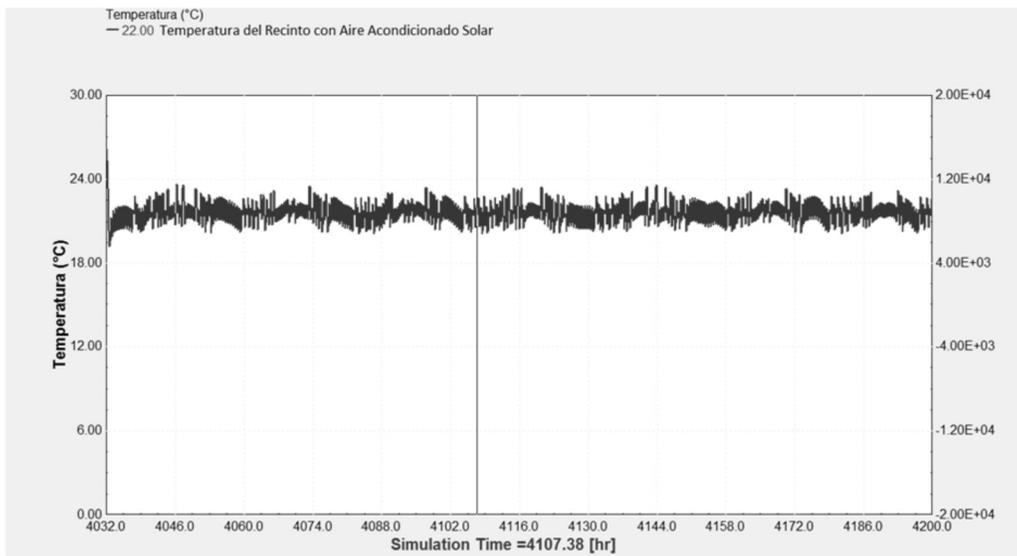


FIGURA 5. TEMPERATURA INTERNA DEL SISTEMA ANTE CONTROL PI

#### 4. Conclusiones

En la actualidad el sistema de refrigeración solar apoyado por energía solar térmica se encuentra en implementación dentro del bloque 24 de la Universidad Pontificia Bolivariana, lo que permitirá generar un banco de pruebas para diferentes algoritmos de control, mezclas de gases refrigerantes y que a su vez permita analizar las ventajas de este tipo de sistemas en comparación con los sistemas de aire acondicionado tradicional

A partir de los resultados obtenidos durante la fase de experimentación y simulación se puede determinar el alto impacto que este tipo de sistemas puede tener en lugares donde no solo se requiere acondicionamiento de aire sino que a su vez se requieran sistemas de cogeneración o trigeneración, ya que el sistema puede ser fácilmente escalable y el calor rechazado puede ser reutilizado en procesos donde se requiera calentamiento de agua u otros procesos.

El sistema de aire acondicionado solar simulado presenta un comportamiento no lineal en la parte de acondicionamiento de aire, ya que las condiciones ambientales y las cargas térmicas influyen, perturban y cambian constantemente en el tiempo, es por esto que una técnica de control inteligente (PI Difuso) es bastante determinante, ya que genera un menor consumo de energía eléctrica por la acción de control suave aplicada sobre los actuadores y, además, logra estabilizar en menos tiempo la variable temperatura, la cual es la variable controlada.

Las simulaciones empleando *software* como TRYSYS, EnergyPlus y OpenStudio pueden permitir aproximaciones bastante cercanas a la realidad en sistemas de refrigeración por absorción lo que las convierte en herramientas poderosas en etapas de diseño

#### 5. Referencias

- [1] A. R. Trott y T. Welch, Refrigeration and air-conditioning, 3rd ed. Oxford ; Boston, Mass.: Butterworth Heinemann, 2000, previous ed.:1989.
- [2] J. Meza, J. González, y A. Khan, Experimental assessment of a solar assisted air conditioning system for applications in puerto rico," ASME Proceedings of the Solar Energy Division 8, vol. 1, pp. 149{154, 1998.
- [3] J. Fernández-Seara y M. Vázquez, Study and control of the optimal generation temperature in nh3-h2o absorption refrigeration systems," Applied Thermal Engineering, vol. 21, no. 3, pp. 343 {357, 2001.
- [4] J. Wang y Y. Wu, Start-up and shut-down operation in a reciprocating compressor refrigeration system with capillary tubes," International Journal of Refrigeration, vol. 13, no. 3, pp. 187- 190, 1990.
- [5] J. Labus, Modelling of small capacity absorption chillers driven by solar thermal energy or waste heat," Ph.D. dissertation, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, Septiembre 2011.
- [6] P. Kohlenbach, Solar cooling with absorption chillers: Control strategies and transient chiller performance,"Ph.D. dissertation, Technischen Universität Berlin, Enero 2006.
- [7] PhönixSonnenWärmeAG, \Phönix sonnenwärme ag," 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.sonnenwaermeag.de/>.
- [8] A. Ogawa, K. Hitomi, M. Maekawa, K. Yoshii, H. Arima, y E. Enomoto, Control system for absorption refrigerator," Japan Patent US5 138 846 A, Aug 18, 1992, uS Patent 5,138,846.
- [9] H. Vidal y D. P. Mansilla, Optimización de un sistema de refrigeración por absorción asistido por energía solar utilizando trnsys,"Revista Frío y Calor", vol. 1, no. 99, pp. 5-11, Noviembre 2009.

- [10] J. Lygouras, P. Botsaris, J. Vourvoulakis, y V. Kodogiannis, "Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system," *Applied Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 1305-1318, 2007.
- [11] J. A. Wright, H. A. Loosemore, y R. Farmani, "Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm," *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 9, pp. 959-972, 2002, a View of Energy and Building Performance Simulation at the start of the third millennium.
- [12] J. House y T. U. o. I. Smith, "A system approach to optimal control for hvac and building systems," in *Conference: Annual meeting of the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)*, San Diego, CA (United States), 24-28 Jun 1995; Other Information: PBD: 1995; Related Information: Is Part Of ASHRAE transactions 1995: Technical and symposium papers. Volume 101, Part 2; PB: 1497 p., vol. 101. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), Diciembre 1995, p. 1497.

## Modelado de la Distribución del Tamaño de Partículas en un Molino de Bolas de Laboratorio

### Modeling the distribution of particle size in a laboratory ball mill

J. L. Palacio, I. E. Rivera, M. R. Fulla

Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Calle 73 No.73<sup>a</sup>-226, Medellín, Colombia  
[jlpalaci@pascualbravo.edu.co](mailto:jlpalaci@pascualbravo.edu.co), [ismael.rivera@pascualbravo.edu.co](mailto:ismael.rivera@pascualbravo.edu.co), [mrfulla@pascualbravo.edu.co](mailto:mrfulla@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

La distribución de tamaño de partículas en el proceso de molienda es muy importante para el beneficio de minerales debido a que su conocimiento tiene varios aportes a la industria entre ellos la disminución del consumo energía en una planta de cemento, es por esto que es motivo de investigaciones desde hace varios años.

En este artículo se caracterizó la distribución de tamaño de partículas de cemento en un molino de laboratorio con el fin de observar si los parámetros impuestos al molino en el inicio de la operación son los óptimos para obtener la granulometría específica del mineral. Los resultados fueron muy buenos y como conclusión se obtuvo que la velocidad de giro del molino interviene significativamente tanto para obtener el tamaño de partículas específico como para disminuir el consumo energético del molino.

**Palabras claves:** Molino de bolas, velocidad de giro, disminución energética.

### Abstract

The particle size distribution in the milling process is very important for the mineral beneficiation because their knowledge has several contributions to the industry including the reduction of energy consumption in a cement plant, that is why this is a matter of research for several years.

In this article the particle size distribution of cement in a laboratory mill was characterized in a laboratory mill in order to observe whether the imposed parameters the mill at the beginning of the operation are optimal in order to obtain the specific mineral granulometry. The results were very good and as a conclusion was obtained that the rotational speed of the mill intervenes significantly both to obtain specific particle size to reduce energy consumption of the mill.

**Keywords:** Ball mill, rotation speed, energy reduction.

### 1. Introducción

La molienda de materias primas es uno de los procesos más utilizados en la industria y laboratorios, este proceso es llevado a cabo en gran parte por medio de un molino de bolas. [1-3], un molino de bolas está gobernado por muchos parámetros tales como el tamaño de la bola, forma de bola, carga de bola, la carga de polvo o mineral y la velocidad de rotación o de giro del molino, entre otras.

En la industria minera y en el procesamiento de minerales se tiene un costo muy alto en cuanto al consumo de energía, atribuido principalmente a la reducción de grandes minerales por otros más pequeños a través de los procesos de trituración y molienda.

En el sector de la industria del cemento en particular se consume aproximadamente 12 -15% del consumo total de energía de un país como puede verse en una revisión sobre el uso de energía en la industria del cemento realizada por N.A. Madlool et al [4].



La molienda es la etapa más ineficiente en el procesamiento de minerales, dando razón de la utilización de solo un 1% de la energía suministrada al molino como energía efectivamente utilizada en fracturar el mineral D.W. Fuerstenau , A.-Z.M Abouzeid [5], Tromans , Meech [6] ,y en el caso del cemento mucho más debido a que una baja tasa inicial de rotura implica un mayor consumo energético, D. Touil et al [7].

Muchas investigaciones se han realizado sobre las influencias de parámetros asociados con bolas en el proceso de molienda, tales como la distribución de tamaño de bola [8,9] y la forma de la bola [10] en la conminución de partículas. Salili et al. [11] informó de la importancia del tamaño de bola pequeña y su relación con una pequeña masa de polvo para obtener la eficiencia en un molino de bolas, pero sólo para dos conjuntos de datos experimentales. Los informes sobre las combinaciones eficientes de tamaño-bola y velocidad de rotación han sido escasos en la literatura. Aquí nosotros informamos que existe un tamaño óptimo de bolas para una molienda eficiente con una velocidad de rotación dada, en base a una molienda húmeda en un molino de bolas a escala de laboratorio.

## 2. Metodología

40 gramos de polvo de caliza con un diámetro promedio de 6.5 micras fueron descargadas en un recipiente con 350 gramos de bolas de acero, todo esto junto con 60 mililitros de agua. Las bolas fueron introducidas al azar dentro del recipiente independientemente del tamaño, de manera que se pudiera reducir el nivel de empaquetamiento de las bolas, el volumen que las bolas ocupaban dentro del recipiente era de alrededor del 50% y las bolas junto con el mineral un volumen del 60%. Tres tipos de bolas con diámetros de 2, 4, 6 milímetros se introdujeron al molino durante 12 horas con dos velocidades de rotación diferentes 60 y 100 revoluciones por minuto.

## 3. Resultados

Se observó el efecto del tamaño de bolas asociado a la reducción de tamaño de partículas variando la velocidad de rotación del molino. Existe un tamaño óptimo de bola el cual es el que más reduce el tamaño de partícula, superando los demás tamaños de bolas investigados. El tamaño de bola de 6 milímetros es el tamaño de bola óptimo para una velocidad de rotación de 60 revoluciones por minuto y el de 4 milímetros para el de 100 revoluciones por minuto, de este resultado podemos decir que el tamaño óptimo de bola en la eficiencia del molino decrece con la velocidad de rotación.

## 4. Conclusión

La reducción del tamaño de partícula que resulta de la complicada interacción dinámica existente entre bolas y mineral dentro del molino en el proceso de molienda dificulta obtener resultados cuantitativos, sin embargo, se observó a nivel general que el tamaño de bola óptimo decrece a medida que la velocidad de rotación aumenta y de que existe un tamaño de bola óptimo para una velocidad de rotación dada.

## 5. Referencias

- [1] R.R. KLIMPEL, L.G. AUSTIN, P.T. LUCKIE, The process engineering of size reduction: ball milling, society forming metallurgy & exploration, Englewood (1984).
- [2] T. TOKMAKCI, A. OZTURK, J. PARK, Boron and zirconium co-doped TiO<sub>2</sub> powders prepared through mechanical ball milling, Ceramics International 39(5)(2013)5893-5899 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.01.009>.
- [3] C.S. TIWARY, A. VERMA, K. BISWAS, A.K. MONDAL, K. Chattopadhyay, Preparation of ultra-fine CsCl crystallites by combined cryogenic and room temperature ball milling, Ceramics International 37(2011) 3677–3686.
- [4] N.A. MADLOOL, R. SAIDUR, M.S. HOSSAIN, N.A. RAHIM. A critical review on energy use and savings in the cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15 (2011) 2042-2060.
- [5] D.W. FUERSTENAU & A.-Z.M. ABOUZEID. The energy efficiency of ball milling in comminution. International Journal of Mineral Processing. 67 (2002). p162.
- [6] TROMANS, D., MEECH, J.A., 2002. Fracture toughness and surface energies of minerals. Journal of Minerals Engineering 15 (12), 1027–1041.
- [7] D. TOUIL, S. BELAADI, C. FRANCES. Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill. Cement and Concrete Research 36 (2006) 416–421.
- [8] T.M. COOK, T.H. COURTNEY, The effects of ball size distribution on attritor efficiency, Metallurgical and Materials Transactions A26 (1995) 2389–2397.
- [9] F.M. KATUBILWA, in: Effect of Ball Size Distribution on Milling Parameters, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2008(M.S. thesis).
- [10] N.N.S. LAMECK, in: Effects of Grinding Media Shapes on Ball Mill Performance, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2005(M.S. thesis).
- [11] S.M. SALILI, A. ATAIE, Z. SADIGHI, Effect of ball size and ball to powder ratio variation on crystallite size and formation of nanocrystalline materials in planetary ball mill, AIP Conference Proceedings 1400(2001) 127–130.

# Análisis Computacional de una Turbina Hidrocinética de Eje Horizontal con y sin Difusor

## Computational Analysis of Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine with and without Diffuser

Cristian Cardona Mancilla<sup>1</sup>, Julio Alberto Casas Monroy<sup>2</sup>, Jorge Sierra Del Rio<sup>2</sup>, Edwin Lenin Chica Arrieta<sup>3</sup> y Diego Hincapié-Zuluaga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Mecatrónico, Estudiante maestría en gestión energética industrial, Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM, Medellín Colombia

<sup>2</sup>Magister, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM, Medellín Colombia

<sup>3</sup>Doctor, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia – UdeA, Medellín, Colombia

E-mail: [cristianmancilla17@gmail.com](mailto:cristianmancilla17@gmail.com); [diegohincapie@itm.edu.co](mailto:diegohincapie@itm.edu.co); [cristiancardona@itm.edu.co](mailto:cristiancardona@itm.edu.co)

### Resumen

Las turbinas hidrocinéticas utilizan la energía contenida en el flujo de agua, generalmente de mares y ríos, para generar energía eléctrica, sin la necesidad de utilizar represas debido a que su funcionamiento es independiente de caídas o cabezas de agua, lo que las convierte en una tecnología de bajo costo; pese a esto, se evidencia en Colombia poca investigación respecto al tema. Este trabajo presenta el análisis computacional, realizado en el programa ANSYS CFX V16.2®, de una turbina hidrocinética de eje horizontal de tres álabes con perfil hidrodinámico NREL S822 y ángulo de ataque de 5°, la cual es también analizada utilizando un difusor generado a partir del mismo perfil hidrodinámico, con el fin de evaluar el efecto que éste presenta sobre el comportamiento de la turbina; utilizando como principales condiciones de operación una velocidad de la corriente de agua de 1.5 m/s y una variación de la velocidad angular entre 0 y 300 RPM. Como resultado se obtiene la potencia generada en función de la velocidad angular de la turbina hidrocinética con y sin difusor, encontrándose que la mayor potencia generada por la turbina sin el difusor es de 845.9 W a 200 RPM y con difusor de 879.7 W a 180 RPM equivalente a un incremento del 3.84 %.

**Palabras claves:** Análisis hidrodinámico, difusor, energía cinética, fuente renovable, modelado computacional, picogeneración eléctrica, turbina hidrocinética.

### Abstract

Hydrokinetic turbines use the energy contained in the flow of water, usually seas and rivers, to generate electricity without the need for dams because its operation is independent of falls or heads of water, which makes them a low-cost technology; despite this, in Colombia there is very little research on the subject. This paper presents the computational analysis, performed in the ANSYS CFX V16.2®, of a hydrokinetic turbine of horizontal axis with three blades, an hydrodynamic profile NREL S822 and angle of attack of 5°, which is also analyzed using a diffuser generated from the same hydrodynamic profile in order to evaluate the effect it has on the behavior of the turbine; using main operating conditions a rate of water flow of 1.5 m/s and a variation of the angular velocity between 0 and 300 RPM. As a result the generated power is obtained based on the angular velocity of the hydrokinetic turbine without diffuser, being the higher power generated by the turbine without the diffuser is 845.9 W at 200 RPM and diffuser 879.7 W to 180 RPM equivalent to an increase of 3.84%.

**Keywords:** Computational modeling, diffuser, hydrodynamic analysis, hydrokinetic turbine, kinetic energy, peak power generation, renewable source.

## 1. Introducción

Un tema de gran interés en la actualidad es la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, esto es debido a que este tipo de aplicaciones contribuye con la preservación del medio ambiente, al reducir la utilización de combustibles fósiles para realizar la extracción de la energía contenida en dichas fuentes [1]. Actualmente se vienen realizando investigaciones sobre la implementación de turbinas hidráulicas para generar energía eléctrica a partir de la extracción de la energía contenida en corrientes o flujos de fuentes hídricas, enfocadas en la viabilidad y ubicación de las mismas, destacando la posibilidad de emplear este tipo de tecnología en diferentes localidades del mundo donde se presentan corrientes de agua a bajas velocidades con picos medios de aproximadamente 2 m/s [2].

Las turbinas hidrocínéticas están basadas en parámetros de diseño y operación de turbinas eólicas, pese a lo cual, existe un amplio margen con relación a la cantidad de información concebida sobre cada una de éstas, dejando un vacío importante por cubrir representado especialmente en los diversos perfiles de velocidades que no han sido analizados. Por tal razón, se hace necesaria la implementación de herramientas de simulación validadas que permitan el diseño y análisis de dichas turbinas, evitando así los altos costos que trae consigo la fabricación a ensayo y error [3].

Para mejorar la potencia generada por turbinas hidrocínéticas (y eólicas) de eje horizontal se ha venido fomentando el uso de difusores, los cuales tienen como función principal incrementar el flujo a la entrada de la turbina y a su vez acelerarlo aguas abajo de la misma, mejorando así su circulación al disminuir el estancamiento del fluido en dicha zona [4]. Siendo un factor importante a tener en cuenta, que la implementación de dichos difusores, permite incrementar el coeficiente de potencia de la turbina hidrocínética de eje horizontal, al punto de exceder el límite de Betz [4]–[6].

Con el fin de compensar la baja densidad de potencia generada por una turbina hidrocínética, Gaden y Bibeau realizan un estudio numérico analizando el rendimiento y la viabilidad que representaría el uso de difusores en turbinas hidrocínéticas de flujo axial, obteniendo como resultado que al emplear un difusor con las dimensiones propuestas en su trabajo se presenta 3.1 veces más potencia en comparación con la turbina sin dicho componente [6]. Un estudio semejante es llevado a cabo por Shamsavarifard et al., en el cual se evalúan experimentalmente tres modelos, siendo el primero de ellos una turbina hidrocínética de eje horizontal, el segundo la implementación de una cubierta exterior sobre la turbina y el tercero la misma turbina con un difusor, encontrando como resultado un incremento del 91 % en la potencia máxima de salida del tercer modelo con respecto al primero [7].

## 2. Metodología

El modelo tridimensional de la turbina hidrocínética de eje horizontal fue realizado utilizando el programa NX 10.0® de SIEMENS®. El rotor de 1.5 m de diámetro está diseñado para generar una potencia de 1 HP a velocidades promedio de 1.5 m/s, está conformado por un cubo y tres (3) álabes (Fig. 1), utilizando para estos un perfil hidrodinámico NREL S822 y un ángulo de ataque de 5°. Para el difusor, se utilizó el mismo perfil de los álabes escalado a una proporción de 3:1 con respecto al perfil de mayor tamaño localizado en la base del álabes (cerca del cubo). Para modelar el difusor se empleó el programa Solid Edge ST8® de Siemens®, en el cual también se llevó a cabo el respectivo ensamble con la turbina hidrocínética, teniendo en cuenta una ubicación central de la misma a lo largo y ancho del interior del difusor.

Luego, se genera el volumen circundante de la turbina hidrocínética con y sin difusor, el cual está compuesto por un volumen rotativo, correspondiente al volumen más cercano al rotor y un volumen estacionario, concerniente al fluido aguas arriba y aguas abajo de la turbina (Fig. 1). Ambos modelos fueron exportados al programa ANSYS V16.2®, donde se realizó el proceso de discretización, empleando una malla tetraédrica, con relevancia de 100, con tamaño mínimo de elementos de 1 mm en el borde de salida de los álabes, y un algoritmo de proximidad y curvatura. Se obtuvo una malla compuesta por 20'963979 y 10'193443 elementos, respectivamente, obteniendo para ambos casos métricas aceptables con valores máximos de oblicuidad inferiores a 0.87, calidad ortogonal superiores a 0.98 y de relación de aspecto por debajo de 30. La cantidad de elementos de malla para cada modelo, se estableció luego de realizar un estudio de independencia de la misma, en el cual se garantizó que el porcentaje de error fuera inferior al 4 % (Fig. 1 y Fig. 2).

Posteriormente, se hizo un análisis fluido-dinámico computacional (CFD, por sus siglas en inglés) en el módulo CFX, utilizando una simulación transitoria por 4 s y 6 s para la turbina sin y con difusor, respectivamente, el cual varió de un modelo a otro debido a que se llevó un constante chequeo de la variación del torque generado por los álabes respecto al tiempo para garantizar su estabilización; un Time Step de 0.01 s, un modelo de turbulencia k- $\epsilon$ , consideración de agua a temperatura ambiente como fluido de trabajo, una velocidad de entrada de 1.5 m/s, una variación de la velocidad de giro con incrementos de 10 RPM para un rango de 0 a 300 RPM.

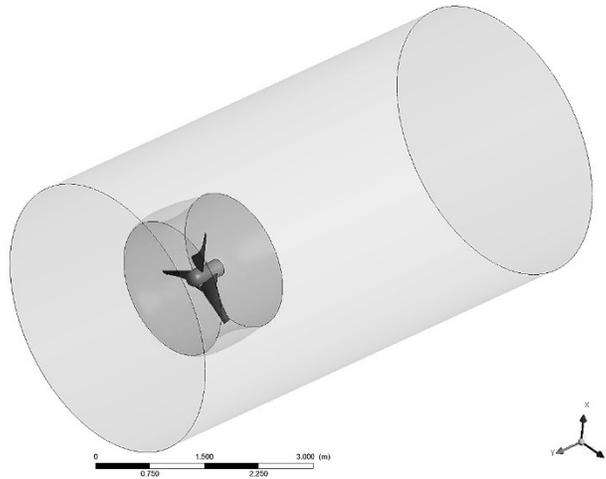


Figura 1. Volumen de fluido del modelo tridimensional de la turbina hidrocínética de eje horizontal constituido por un volumen rotativo y un volumen transitorio.

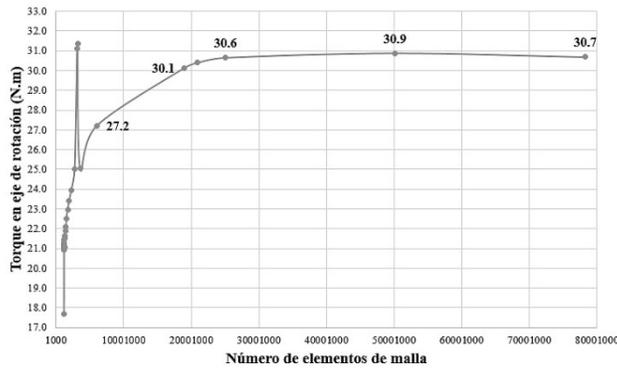


Figura 2. Estudio de malla para el modelo tridimensional de la turbina hidrocínética sin difusor.

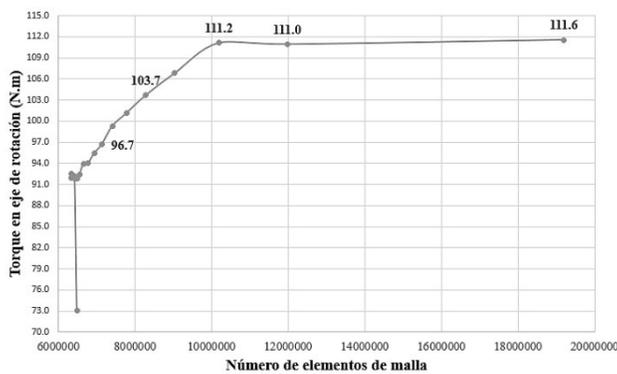


Figura 3. Estudio de malla para el modelo tridimensional de la turbina hidrocínética de eje horizontal con difusor.

### 3. Resultados

En la Fig. 4 se presenta la potencia generada (W) por la turbina hidrocínética de eje horizontal sin y con difusor representadas con línea discontinua (---) y continua (—) respectivamente, en función de la variación de la velocidad angular de 0 a 300 RPM.

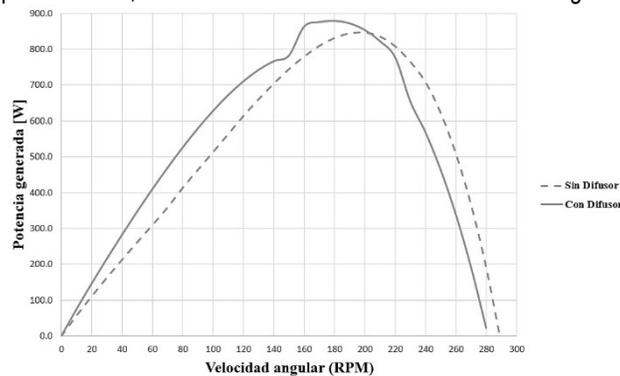


Figura 4. Potencia generada (W) en función de la velocidad angular (RPM) por la turbina hidrocínética sin y con difusor.

De la Fig. 4 se puede apreciar que la turbina con difusor (línea continua) alcanza una potencia máxima generada de 879.7 W cuando gira a 180 RPM, mientras que la turbina sin difusor (línea discontinua) alcanza 845.9 W a 200 RPM; representando un incremento de 3.84 % de la potencia generada como respuesta a la influencia causada por la implementación del difusor. Esta influencia se ve reflejada a lo largo de las curvas de potencia, ya que al utilizar el difusor se genera una mayor potencia con velocidades angulares inferiores a las requeridas por la turbina sin difusor.

Otro aspecto a resaltar de la Fig. 4 es el hecho de que la turbina hidrocínética con difusor alcanza una potencia de generación de 854.1 W a 200 RPM, lo cual sigue estando por encima del punto de mayor generación de la turbina sin difusor a dicha velocidad de giro.

### 4. Conclusiones

La implementación del difusor en la turbina hidrocínética de eje horizontal generó un incremento del 3.84 % con relación a la turbina sin dicho elemento, lo cual podría ser considerado como un resultado poco significativo para el trabajo que podría traer consigo el desarrollo de este tipo de difusor, dada la complejidad de la curvatura presentada por el perfil hidrodinámico; además de presentarse una diferencia abismal al compararse dicho incremento con los resultados obtenidos por Gaden y Bibeau, y Shahsavarifard et al. [6], [7].

Pese a lo anterior, un paso a seguir puede ser el análisis del mismo difusor, bajo diferentes posiciones de la turbina con respecto a la entrada del mismo e incluso evaluarlo a diferentes escalas, con el fin de mejorar la potencia de salida.

### 5. Referencias

- [1] F. Behrouzi, a Maimun, and M. Nakisa, "Review of Various Designs and Development in Hydropower Turbines," *Int. J. Mech. Aerospace, Ind. Mechatronics Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 87–91, 2014.
- [2] W. M. J. Batten, a. S. Bahaj, a. F. Molland, and J. R. Chaplin, "The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 1085–1096, 2008.
- [3] A. S. Bahaj, W. M. J. Batten, and G. McCann, "Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbines," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2479–2490, 2007.
- [4] L. Chen, F. L. Ponta, and L. I. Lago, "Perspectives on innovative concepts in wind-power generation," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 4, pp. 398–410, 2011.
- [5] T. Y. Chen, Y. T. Liao, and C. C. Cheng, "Development of small wind turbines for moving vehicles: Effects of flanged diffusers on rotor performance," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 42, pp. 136–142, 2012.
- [6] D. L. F. Gaden and E. L. Bibeau, "A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydro kinetic turbines using a validated momentum source turbine model," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1152–1158, Jun. 2010.
- [7] M. Shahsavarifard, E. L. Bibeau, and V. Chatoorgoon, "Effect of shroud on the performance of horizontal axis hydrokinetic turbines," *Ocean Eng.*, vol. 96, pp. 215–225, Mar. 2015.

# Análisis Numérico Vía ANSYS De Intercambiadores De Calor Con Mejora Pasiva: Casos De Estudio Densidad Del Mallado Y Modelo De Turbulencia

## Via ANSYS Numerical Analysis of Heat Exchangers with Passive Improvement: Case Study Meshing Density and Turbulence Model

Miyer Jaiver Valdés Ortiz<sup>1\*</sup>, Juan Gonzalo Ardila Marín<sup>1</sup>, Adrián Felipe Martínez Pérez<sup>1</sup>, Juan Diego Betancur Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecatrónica & Electromecánica, Facultad de Ingenierías,  
Instituto Tecnológico Metropolitano

[\\*juanardila@itm.edu.co](mailto:juanardila@itm.edu.co); [miyervaldes0022@correo.itm.edu.co](mailto:miyervaldes0022@correo.itm.edu.co)

### Resumen

Los intercambiadores de calor se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales determinando su funcionamiento, por lo tanto, se ha trabajado en diseños eficientes y fiables, y sus posibilidades de mejora han sido ampliamente estudiadas; lo anterior sumado al desarrollo actual de poderosos microprocesadores, ha justificado y promovido el empleo de la Dinámica de Fluidos computacional – CFD para estudiar las técnicas de mejora de estos dispositivos, aplicando diferentes modelos de turbulencia como  $k-\epsilon$  o  $k-\omega$ , con resultados aceptables. Pero el modelo no es la única variable que inciden en los resultados, se ha visto que la malla los afecta bastante, por eso durante este trabajo se estudia la incidencia del refinamiento de malla en los resultados alcanzados durante el análisis CFD de la transferencia de calor en intercambiadores empleando los modelos  $k-\epsilon$  y  $k-\omega$ ; las simulaciones fueron desarrolladas con ANSYS® V17.0 en el Laboratorio de Modelado del grupo de investigación en Materiales Avanzados y Energía del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (MATyER-ITM). El estudio consistió en la búsqueda de convergencia en soluciones de mallas cada vez más finas comparando el número de Nusselt contra el número de elementos de malla para determinar dónde se vuelve innecesario el refinamiento, las simulaciones se corrieron con CFX® de ANSYS® y logró comprobarse efectivamente la incidencia del refinamiento en los resultados y en el tiempo y la necesidad de capacidad de cómputo. La validación de los modelos se realizó a partir de resultados experimentales reportados por Kumar en 2006, como lo propuso Di Piazza en 2010; encontrándose que el modelo  $k-\epsilon$  estándar permite mayor ajuste de los resultados numéricos a los experimentales.

**Palabras claves:** ANSYS; CFD; Intercambiador de Calor Helicoidal; Número Dean; Número Nusselt.

### Abstract

Heat exchangers are extensive used in industrial applications determining operation. Therefore, has worked on efficient and trusted designs, and possibilities for improvement have been extensively studied; This coupled to the current development of powerful microprocessors, justified and promoted the use of computational fluid dynamics - CFD to study improving techniques for these devices using different turbulence models as  $k-\epsilon$  or  $k-\omega$ , with acceptable results. However, model is not the only variable affecting results. Has been that mesh affects too, so during this work the incidence of mesh refinement is studied in results achieved during heat exchangers transfer CFD analysis using  $k-\epsilon$  and  $k-\omega$  models; simulations were developed with ANSYS® V17.0 in Modeling Laboratory of Advanced Materials and Energy Research Group of Metropolitan Institute of Technology (MATyER-ITM) at Medellin. The study consisted of finding convergence solutions increasingly finer meshes comparing the Nusselt number against the number of mesh elements to determine where refinement becomes unnecessary, simulations run with ANSYS's CFX® and obtained effectively refinement incidence checked in results, and time and need for computing capacity. Models validation was performing from experimental results reported by Kumar in 2006, as proposed by Di Piazza in 2010; finding the  $k-\epsilon$  standard model allows for greater adjustment of numerical experimental results.

**Keywords:** ANSYS; CFD; Helical Heat Exchanger; Dean Number; Nusselt number.

## 1. Introducción

Se han usado diferentes métodos para aumentar la transferencia de calor en los intercambiadores, estos métodos se pueden clasificar en dos: el primero es el método activo que requiere alimentación externa como campos magnéticos o vibración y el segundo es el método pasivo que consiste en el curvado del tubo, el intercambiador de calor curvado helicoidalmente es usado comúnmente debido a su tamaño compacto y a su alto coeficiente de transferencia de calor [1]; debido a las fuerzas centrífugas del fluido se genera un flujo secundario en los tubos, lo que provoca un mayor contacto entre las partículas aumentando así la transferencia de calor. Este fenómeno fue estudiado por Dean en 1927 [2].

Computational Fluid Dynamics (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos para el análisis de fenómenos en los fluidos, como el de volúmenes finitos, [3]. Los programas CFD permiten predecir resultados numéricos aproximados a los resultados experimentales, esta validación ha sido ampliamente reportada [2], [4]; la precisión de los resultados obtenidos depende de la configuración de la simulación en la cual se adoptan modelos de turbulencia como  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , DNS, RSM, SST y algoritmos como SIMPLE, SIMPLEC, PISO, etc. Di Piazza y Ciofalo, estudiaron la incidencia de los modelos de turbulencia en los resultados de las simulaciones, afirmando que el modelo  $RSM-\omega$  para flujos turbulentos mayores a 14000 Reynolds da excelentes resultados comparados con los resultados experimentales [5].

En este trabajo se busca validar modelos numéricos para intercambiadores de calor con resultados experimentales publicados en la literatura, variando las propiedades termo-dependientes del fluido con diferentes modelos de turbulencia haciendo uso del software comercial ANSYS Workbench®. A continuación, se presentará la metodología usada para la validación de los resultados numéricos comenzando por la descripción del desarrollo de la geometría del intercambiador de calor, el estudio de la independencia de malla, luego se describe la configuración en CFX® de los modelos de turbulencia, las condiciones de frontera, el monitoreo de los valores de interés, y los criterios de convergencia. Después de la metodología se presentarán los resultados obtenidos para la validación con los modelos  $k-\epsilon$  Estándar y  $k-\omega$  Estándar, luego se presenta un análisis y discusión de los resultados obtenidos.

## 2. Marco teórico

El modelo  $k-\epsilon$  estándar es un modelo basado en las de ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) y su tasa de disipación ( $\epsilon$ ), la ecuación de transporte para  $k$  se deriva de una ecuación exacta, mientras la ecuación de transporte de  $\epsilon$  se obtiene utilizando razonamiento físico. El modelo  $k-\omega$  estándar es de un modelo empírico basado en ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) y la tasa de disipación específica ( $\omega$ ). En este modelo, varios coeficientes, usados para el cierre del modelo  $k-\epsilon$  estándar con valores constantes determinados empíricamente, se vuelven funciones de diferentes parámetros, agregando dos ecuaciones más y volviéndolo más complejo y más exacto en el análisis de los fenómenos de capa límite.

## 3. Metodología

El presente trabajo reporta diferentes modelos numéricos des arrollados con ANSYS CFX® V17.0 en el Laboratorio de Modelado del grupo de investigación en Materiales Avanzados y Energía del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (MATyER-ITM).

### 3.1. Desarrollo geométrico

La geometría se desarrolló con el módulo DesignModeler® generando dos tubos concéntricos curvados helicoidalmente con la herramienta *sweep*, con las dimensiones proporcionadas por Kumar [2], siendo el diámetro del tubo interno de 25.4 mm y el diámetro del tubo externo de 50.8 mm, el diámetro de la hélice entre el centro de los tubos es de 762 mm y el paso de la hélice es de 100 mm, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 5. Geometría del proyecto

### 3.2. Independencia de malla

Ya obtenida la geometría se procedió a realizar las mallas en el módulo Meshing® con una inflación de 1.2 mm la cual fue especificada por Kumar et al.[2]; se llevó a cabo el estudio de independencia de malla de la siguiente manera: se ejecutó una simulación con la malla inicial de cada modelo con la convergencia de error residual de  $10^{-4}$ , y vigilando los valores de interés como la temperatura en la salida del fluido externo y la temperatura en la pared de transferencia de calor; se observó que para las 100 iteraciones los errores residuales habían alcanzado su valor de convergencia ver Figura 6a, pero las temperaturas de interés aun no eran constantes, ver Figura 6b. Se procedió a cambiar la convergencia de los residuos a  $10^{-6}$ , y se observó que para las 255 iteraciones las temperaturas de interés ya eran constantes, ver

Figura 7.

Una vez obtenidos los criterios de convergencia, se refinó la malla para obtener celdas más finas en ambos dominios, y se ejecutó la simulación con esta malla, se comparó el resultado del número Nusselt obtenido con el de la malla anterior esperando un error menor del 1%. Este procedimiento se repitió 13 veces para el modelo  $k-\omega$  con los valores de malla de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y ocho veces para el modelo  $k-\epsilon$  con las mallas reportadas en la tabla 2.

Tabla 1 mallas modelo  $k-\omega$

Modelo $k-\omega$	# de elementos	Oblicuidad
malla 1	1427086	0,8802
malla 2	1716249	0,8678
malla 3	2348779	0,82424
malla 4	2511271	0,83436
malla 5	2933745	0,83759
malla 6	4565420	0,86349
malla 7	4986491	0,84658
malla 8	5595213	0,89145
malla 9	5949050	0,89726
malla 10	6413470	0,86667
malla 11	6869015	0,88146
malla 12	7464173	0,88871
malla 13	8350316	0,85824

Tabla 2 mallas modelo  $k-\epsilon$

Modelo $k-\epsilon$	# de elementos	Oblicuidad
malla 1	950620	0,88115
malla 2	1427086	0,8802
malla 3	2348779	0,82424
malla 4	2511271	0,83436
malla 5	2933745	0,83759
malla 6	4565420	0,86349
malla 7	4986491	0,84658
malla 8	5595213	0,89145

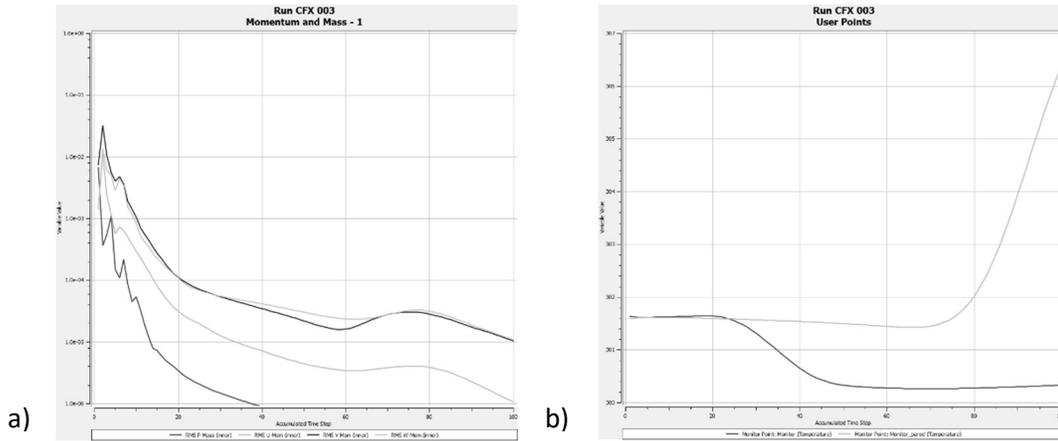


Figura 6 a) Convergencia de residuos b) Valores de interés

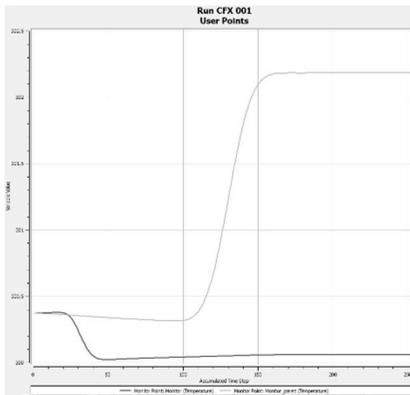


Figura 7 Valores de interés constantes

Debido a que la solución estaba cambiando con el refinamiento de la malla en ambos modelos, se seleccionó la malla menos densa con un error relativo menor al 1%; en la

Figura 8 se observa que las mallas dos, tres y cuatro para el modelo k- $\omega$  tienen un error menor del 1% pero la malla cinco tiene un error mayor lo que indica que aún no hay una independencia de malla por lo que para el modelo k- $\omega$  se seleccionó la malla ocho a partir de la cual el error se mantiene por debajo del 1%, por lo cual es seleccionada para reducir el tiempo de simulación.

En la Figura 9 se presenta el estudio de malla para el modelo k- $\epsilon$  en el cual se observó que a partir de la malla tres el error se mantiene por debajo del 1%, por lo tanto, se seleccionó la malla tres para este modelo.

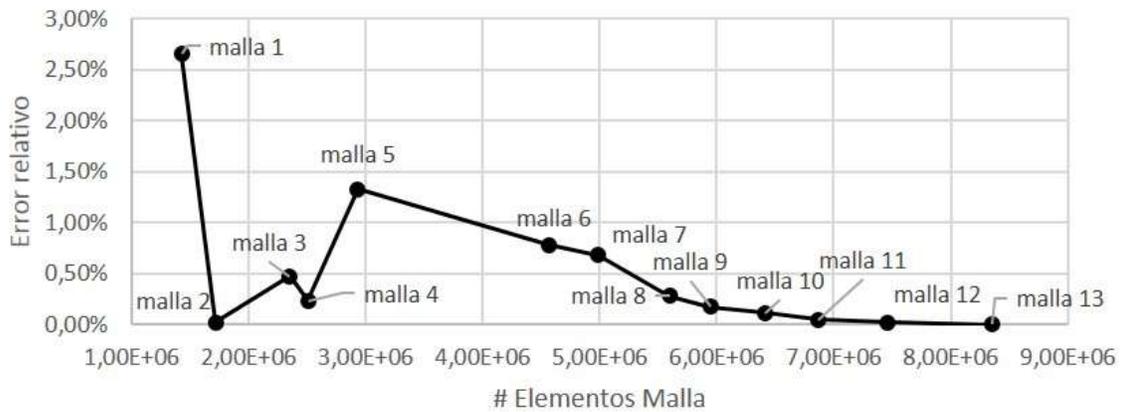


Figura 8 Independencia de malla modelo k- $\omega$

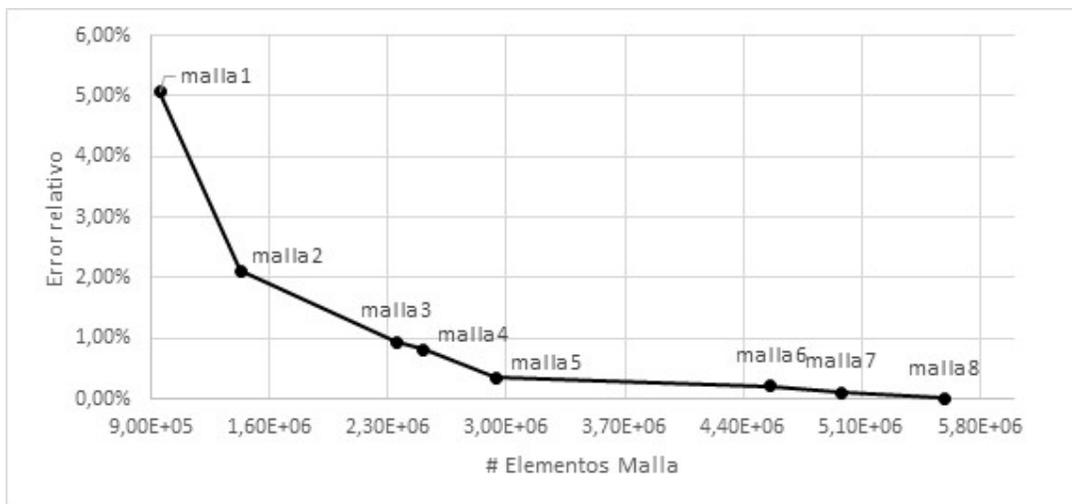


Figura 9 Independencia de malla modelo k- $\epsilon$

### 3.3. Simulación en CFX®

Se configuró el dominio como agua, en los modelos del fluido se eligió para transferencia de calor el thermal energy, y como modelo de turbulencia se configuró k- $\epsilon$  o k- $\omega$  según la malla a simular, se ingresaron las velocidades de cada fluido en las entradas del dominio con su respectiva temperatura, la salida de los fluidos se configuró con temperatura ambiente y con presión manométrica cero, las paredes de contacto entre los fluidos se configuraron como una interface de fluido a fluido con una pared de deslizamiento en la interface de masa y momento, se activó el modelo de interface para transferencia de calor. Se optó por un total de 500 iteraciones con un criterio de convergencia de  $10^{-6}$  para los residuos y se configuró un monitoreo para los valores de interés como las temperaturas de salida y la temperatura en la pared.

Se procedió al ajuste de las propiedades termo-dependientes del fluido, de la siguiente manera: se realizaron tres simulaciones cada una con diferentes velocidades de entrada para el tubo interno calculadas a partir de tres números Dean reportados por Kumar et al. [2], se obtuvieron los resultados de simulación de la temperatura a la salida para el tubo interno, y se calculó la temperatura promedio que caracteriza el fluido en su paso a través del intercambiador. Ya calculada la temperatura promedio, con los polinomios empleados por Zachar [1], se calcularon los valores de las propiedades del fluido, con los nuevos valores de las propiedades se calculó nuevamente la velocidad de entrada por su dependencia de la viscosidad, se ingresaron estos valores de las propiedades termo-dependientes y velocidades en CFX®; con los nuevos resultados de simulación se volvió a calcular la temperatura promedio, este proceso se realizó tres veces con cada modelo de turbulencia hasta que la temperatura promedio varió menos de 0.05 K.

#### 4. Resultados

Se realizaron tres simulaciones con los modelos  $k-\epsilon$  para hallar la temperatura promedio adecuada. Simulación 1: con propiedades del fluido constantes a  $40^\circ\text{C}$  y Dean: 732, 823, 979; simulación 2: con propiedades constantes a la nueva temperatura promedio hallada con sus respectivos Dean; y simulación 3: con propiedades constantes a la nueva temperatura promedio hallada con sus respectivos Dean, ver Fig. 6a.

Se realizaron dos simulaciones con el modelo  $k-\omega$  para hallar la temperatura promedio adecuada. Simulación 1: con propiedades constantes a  $40^\circ\text{C}$  y dos Dean (732, 979); simulación 2: con propiedades constantes a la nueva temperatura promedio hallada con sus respectivos Dean, ver Fig. 6b.

Los resultados muestran que la pendiente de las líneas se reduce para el modelo  $k-\epsilon$  a medida que se corrigen las propiedades del fluido con la temperatura promedio hallada, aproximándose la pendiente de los ajustes a la pendiente de Kumar et al. [2]. Los resultados muestran que la pendiente de las líneas aumenta para  $k-\omega$  a medida que se corrigen las propiedades del fluido con la temperatura promedio hallada, alejándose de la pendiente de Kumar et al. [2], como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

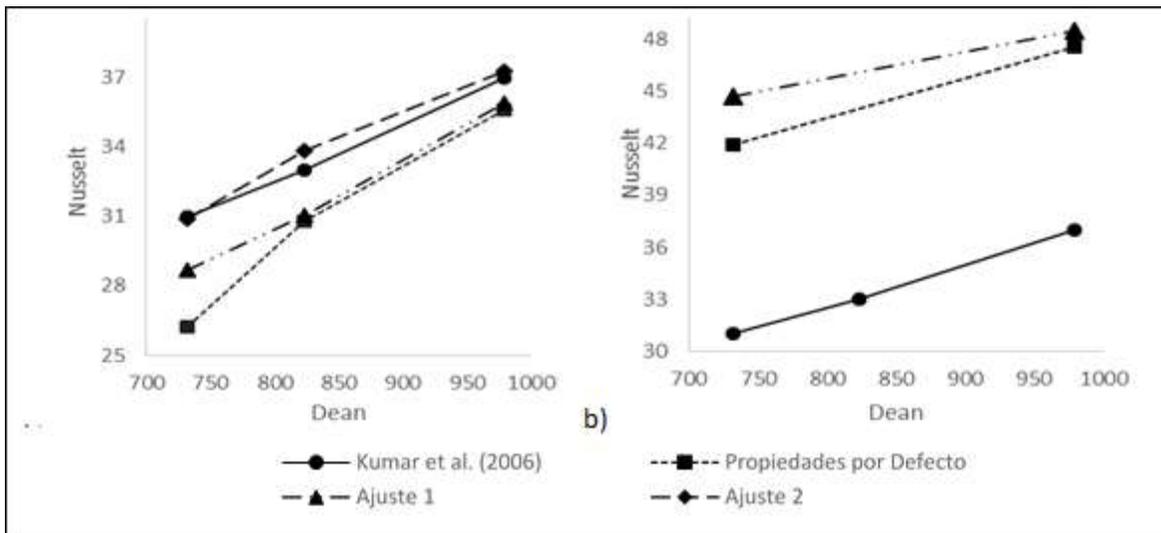


Figura 10 Resultados de simulación

Tabla 3 Error de la Pendiente

Modelo de Turbulencia	$k-\epsilon$	$k-\omega$
Propiedades por Defecto	52%	6%
Ajuste de Propiedades 1	20%	37%
Ajuste de Propiedades 2	5%	

Los resultados muestran que el modelo  $k-\omega$  no es el adecuado para las simulaciones con CFX® y con la densidad de malla aplicada, debido a que el error de la pendiente aumenta a medida que se corrigen las propiedades del fluido.

Por otro lado el modelo  $k-\varepsilon$  Estándar presentó resultados más aproximados a los resultados de Kumar, et al. [2] con un error del 5%, demostrando ser adecuado para simular estos intercambiadores.

## 5 Conclusiones

Las propiedades termo-dependientes del fluido afectan los resultados de manera significativa por lo cual es recomendable tener en cuenta su incidencia en todo estudio numérico. El modelo  $k-\varepsilon$  es adecuado para simular estos intercambiadores de calor, debido a que los resultados numéricos se aproximan a resultados experimentales cuando se corrigen las propiedades termo-dependientes del fluido. Los resultados para los modelos  $k-\omega$  se alejan de la pendiente de Kumar a medida que se realizan los ajustes de las propiedades termo-dependientes, para las simulaciones con CFX® y con la densidad de malla aplicada, además que requieren casi el doble de número de elementos para brindar la independencia de malla.

## 6. Referencias

- [1] A. Zachár, "Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 19–20, pp. 3928–3939, Sep. 2010.
- [2] V. Kumar, S. Saini, M. Sharma, and K. D. P. Nigam, "Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 13, pp. 4403–4416, Jul. 2006.
- [3] J. Ardila, D. Hincapié, and J. Casas, "Numerical models validation to correlations development for heat exchangers," *Actas Ing.*, vol. 1, pp. 164–168, 2015.
- [4] S. S. Pawar and V. K. Sunnapwar, "Experimental and CFD investigation of convective heat transfer in helically coiled tube heat exchanger," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, no. 11, pp. 2294–2312, Nov. 2014.
- [5] I. Di Piazza and M. Ciofalo, "Numerical prediction of turbulent flow and heat transfer in helically coiled pipes," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 4, pp. 653–663, Apr. 2010.

# Modelado Computacional de la Distribución de Campo para Procesos de Magneto-Estimulación en Germinación de Semillas

## Computational modeling of the field distribution for magneto- stimulation processes in seed germination

J. L. Palacio, I. E. Rivera, M. R. Fulla

Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Calle 73 No.73ª-226, Medellín, Colombia

[jlpalaci@pascualbravo.edu.co](mailto:jlpalaci@pascualbravo.edu.co), [ismael.rivera@pascualbravo.edu.co](mailto:ismael.rivera@pascualbravo.edu.co), [mrfulla@pascualbravo.edu.co](mailto:mrfulla@pascualbravo.edu.co)

## Resumen

La aplicación de campos magnéticos para estimular la rata de germinación de semillas ha sido objeto de intensa investigación en los últimos años. Debido a las alteraciones en las corrientes iónicas a través de la membrana celular, inducidas por la aplicación de campos magnéticos, los procesos catabólicos pueden ser intensificados significativamente en beneficio de la primera etapa del crecimiento de las plantas: la germinación. Aunque los efectos de la aplicación de campos magnéticos varían en los distintos tipos de plantas, son notorios los efectos en el proceso de germinación, en las primeras 72 horas generalmente, para la mayoría de ellas. La evidente importancia e impacto de este hecho en el sector agroindustrial, ha planteado una línea derivada de investigación para el diseño de dispositivos estimuladores de la germinación de semillas, partiendo de generadores de campo magnético como las muy conocidas configuraciones de bobinas tipo Helmholtz.

El uso de una configuración de bobinas tipo Helmholtz asegura la uniformidad del campo magnético generado en el centro del dispositivo, permitiendo así la realización y validación de estudios de los procesos de germinación de semillas. Sin embargo, la relación entre el volumen útil para el alojamiento de semillas y el volumen necesario para la construcción del dispositivo de este tipo de configuraciones es muy bajo, requiriendo una gran cantidad de espacio para alojar pequeñas cantidades de semillas, dificultando el escalamiento de esta aplicación y finalmente su adopción en la industria. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir del modelado mediante elementos finitos, a través del software COMSOL Multiphysics, para configuraciones de bobinas que permiten optimizar el volumen útil para el alojamiento de semillas sin sacrificar la uniformidad del campo magnético.

**Palabras claves:** germinación de semillas, rata de germinación, magneto-estimulación, COMSOL Multiphysics.



## Abstract

Applying magnetic fields to stimulate seed germination rat has been subject of intense research in recent years. Due the changes in ion currents across the cell membrane, induced by application of magnetic fields, catabolic processes can be intensified significantly in favor of the first stage of plant growth: germination. Although the effects of the application of magnetic fields on the germination process vary in different types of plants, they are notorious for most of them within 72 hours. The evident importance and impact of this fact in the agribusiness sector, has raised a research field derived for designing devices stimulators seed germination, based on magnetic field generators such as the well-known Helmholtz-like configurations.

Using Helmholtz-type configurations ensures uniformity of the magnetic field generated in the center of the device, thus allowing the realization of studies and the processes validation in seed germination. However, the relationship between the useful volume for housing seeds and the volume needed for the construction of such device configurations is very low, requiring a lot of space to house small quantities of seed, hindering the scaling of this application and finally its adoption in the industry. This paper presents the results obtained from finite element modeling, through the COMSOL Multiphysics software for coil configurations to optimize the useful volume for housing seeds without sacrificing the uniformity of the magnetic field are presented.

**Keywords:** seed germination, germination rat, magneto-stimulation, COMSOL Multiphysics.

## 1. Introducción

El creciente interés en los tratamientos físicos que contribuyan al desarrollo vegetal ha propiciado un gran número de aplicaciones de campos magnéticos en plantas, en las fases de germinación y desarrollo, cuyos efectos se manifiestan desde la inhibición de efectos morfológicos tempranos [1]-[5], hasta la estimulación de la tasa y velocidad de germinación [1], [6]-[10]. El hecho de que los variados efectos de la aplicación de campos magnéticos en plantas tengan un marcado impacto aumento de la biomasa y eficiencia de los cultivos, ha planteado en su posible adopción a nivel industrial. Un ejemplo de ello son los estudios cuyo enfoque se basa en el aumento de la rata y velocidad de germinación para los cultivos de soya en la producción de biocombustibles [8], [9], [11].

Los campos magnéticos influyen el movimiento de los iones en los organismos vivos, desde los mecanismos de orientación y migración de ciertos animales hasta en la dirección de crecimiento de las plantas [1]. Entre los iones que se encuentran en el citoplasma celular, calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) tiene roles estructurales en la pared celular como agente estabilizador de las membranas celulares, jugando también un importante rol en la homeostasis. La concentración del  $\text{Ca}^{2+}$  libre intracelular está estrictamente regulado y mantenido a  $0.1 - 0.2 \mu\text{M}$ , lo cual es tres a cuatro órdenes de magnitud menor que el almacenado en el espacio extracelular. Los incrementos localizados del  $\text{Ca}^{2+}$  libre en el citosol en forma de ondas o gradientes están envueltos en la regulación de las primeras etapas de la germinación y desarrollo de las plantas, y también en la apoptosis o muerte celular programada [2], [12]. La respuesta ante el campo magnético aplicado varía entre cada tipo de planta, por lo cual los estudios se dirigen a la optimización de los parámetros y condiciones de aplicación específica de los campos con los cuales se potencia una o más etapas del crecimiento de ciertos tipos de plantas.

Un punto en común de los estudios que se enfocan en la optimización de la producción de biomasa, especialmente en el incremento de la tasa y velocidad de germinación de diversos tipos de plantas, es la aplicación de campos magnéticos débiles, del orden de los micro y los mili Teslas [2], [4], [10], [12], que pueden ser generados mediante bobinas. En general se adopta una configuración de bobinas de Helmholtz, que permiten generar un campo magnético uniforme en una región limitada entre las bobinas, muy importante para asegurar los parámetros de la intensidad y dirección del campo magnético. Esta región de campo magnético uniforme se conoce como volumen de trabajo.

En las configuraciones de bobinas de Helmholtz el volumen de trabajo suele ser una región pequeña en comparación con el volumen total ocupado por el equipo, que en las etapas de investigación no es importante, pero toma gran relevancia en el paso hacia el escalamiento industrial. Este hecho ha impulsado el desarrollo de dispositivos que permitan aumentar el volumen útil con miras a la estimulación de la germinación de semillas a escala industrial, pero que también puedan ser usados en el marco de la investigación científica al lograr un mayor número de muestras para las estadísticas.

## 2. Metodología

Con fines de investigación se propone el diseño de sistemas de bobinas que permita disponer cajas de Petri de 10 cm de diámetro y 1.5 cm de altura, los cuales sirven como contenedores de semillas. Una configuración de bobinas de Helmholtz que optimiza el volumen en función del diámetro del contenedor, corresponde a 2 bobinas de diámetro de 20 cm y 10 cm de separación entre bobinas, con lo cual se pueden disponer de 7 contenedores. El diseño que se propone consiste de cuatro bobinas elipsoides presentado en la Fig. 1.

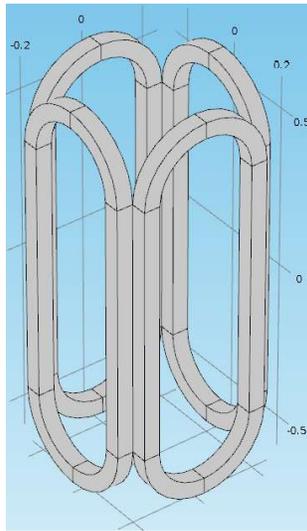


FIGURA 1. DISPOSICIÓN VERTICAL DE LA CONFIGURACIÓN DE BOBINAS PROPUESTAS

El campo magnético producido al interior de la configuración presentada en la Fig. 1 se evalúa utilizando el módulo AC/DC de COMSOL Multiphysics (versión 5.2) y se configura el análisis de Campo Magnético para un estudio estacionario. Las características geométricas y eléctricas de la configuración se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y ELÉCTRICOS DEL DISEÑO

Símbolo	Descripción	Valor
$I$	Corriente eléctrica	1A
$N$	Número de espiras,	100
$d$	Distancia entre bobinas	40cm
$l$	Longitud de las bobinas	120cm

### 3. Resultados

En la Fig. 2 se presenta la densidad de flujo de campo magnético de un corte transversal obtenido a partir de la simulación.



FIGURA 2. DENSIDAD DE FLUJO DE CAMPO MAGNÉTICO EN EL PLANO XZ DE LA CONFIGURACIÓN DE BOBINAS.

A partir de la imagen de la Fig. 2 se observa una región de campo magnético uniforme bastante amplia que puede ser utilizada para la estimulación de la germinación de semillas.

En la Fig. 3 se presenta el perfil de la distribución de la densidad de flujo de campo magnético a lo largo del eje x (línea azul), eje y (línea roja) y eje z (línea verde). De este resultado se puede inferir un cilindro de 10cm de diámetro y 80 cm de altura con campo magnético uniforme, con lo cual se puede disponer de 53 contenedores de semillas tipo caja de Petri.

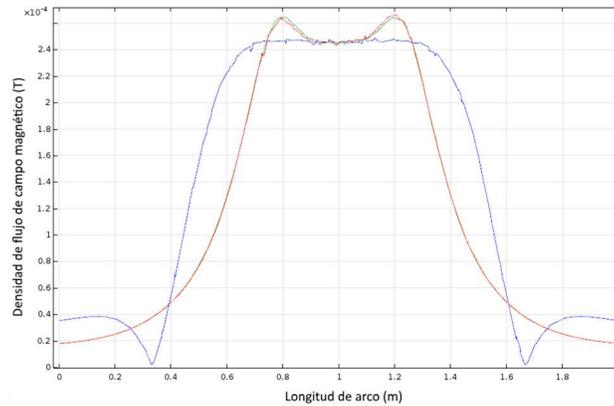


FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO A LO LARGO DE LOS EJES X, Y Y Z DE LA CONFIGURACIÓN.

La configuración propuesta puede ser modificada para almacenar mayor cantidad de contenedores cambiando el parámetro longitud de las bobinas.

#### 4. Conclusión

La estimulación de la germinación de semillas es una interesante aplicación a nivel científico de campos magnéticos en sistemas biológicos, pero cuyos resultados son muy prometedores al tener un gran impacto en el aumento de la biomasa y en la eficiencia de los cultivos. Basados en este hecho, el diseño de configuraciones de bobinas toma relevancia cuando se desea aumentar el rendimiento del proceso de generación de campos magnéticos, para la estimulación de la germinación.

La configuración de bobinas de Helmholtz tiene una limitación para el volumen óptimo relacionado con los contenedores de semillas. Hacer bobinas muy grandes resultaría en un desperdicio de espacio y, probablemente, de regiones de campo magnético uniforme. Sumando la limitación de apilar conjuntos de bobinas basados en esta configuración, puesto que la uniformidad de los campos se ve afectada por la proximidad de otras configuraciones, hace de esta una configuración poco atractiva para el escalado industrial del proceso de estimulación de la germinación de semillas.

Una configuración como la propuesta en este trabajo permite generar un campo magnético uniforme que no se limita por el tamaño de los contenedores, de forma que se pueden construir sistemas de bobinas de altura casi ilimitadas, aumentando el volumen útil para la contención de semillas. Esta optimización de espacio, sumado a la facilidad de su implementación, permite posibilitar el escalado a la industria de la estimulación de la germinación de semillas mediante la aplicación de campos magnéticos.

#### 5. Referencias

- [1] N. Hirota, J. Nakagawa, and K. Kitazawa, "Effects of a magnetic field on the germination of plants," *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 8, pp. 5717–5719, 1999.
- [2] C. L. M. Bauréus Koch, M. Sommarin, B. R. R. Persson, L. G. Salford, and J. L. Eberhardt, "Interaction between Weak Low Frequency Magnetic Fields and Cell Membranes," *Bioelectromagnetics*, vol. 24, no. 6, pp. 395–402, 2003.
- [3] P. Galland and A. Pazur, "Magnetoreception in plants," *J. Plant Res.*, vol. 118, no. 6, pp. 371–389, 2005.
- [4] J. Podlečný, S. Pietruszewski, and a Podlečna, "Influence of magnetic stimulation of seeds on the formation of morphological features and yielding of the pea," *Int. Agrophysics*, vol. 19, pp. 61–68, 2005.
- [5] T. Haneda, Y. Fujimura, and M. Iino, "Magnetic field exposure stiffens regenerating plant protoplast cell walls," *Bioelectromagnetics*, vol. 27, no. 2, pp. 98–104, 2006.
- [6] A. Vashisth and S. Nagarajan, "Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field," *J. Plant Physiol.*, vol. 167, no. 2, pp. 149–156, 2010.
- [7] L. M. Apasheva, a V Lobanov, and G. G. Komissarov, "Effect of alternating electromagnetic field on early stages of plant development.," *Dokl. Biochem. Biophys.*, vol. 406, no. 1, pp. 1–3, 2006.

- [8] D. Sleper, P. Kirawanich, S. Tantong, B. C. Raga, J. E. Thompson, and N. E. Islam, "Optimization of Soybeans as a Biofuel Resource through Germination Studies under Electromagnetic Fields," *2007 IEEE Pulsed Power Plasma Sci. Conf.*, pp. 513–513, 2007.
- [9] M. B. Shine, K. N. Guruprasad, and A. Anand, "Enhancement of germination, growth, and photosynthesis in soybean by pre-treatment of seeds with magnetic field," *Bioelectromagnetics*, vol. 32, no. 6, pp. 474–484, 2011.
- [10] Y. Yamashiro and S. Yonemori, "Magnetic Field Effect on Growth of Cucumbers," *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. TJMJ-2, no. 9, pp. 863–864, 1987.
- [11] R. Radhakrishnan and B. D. Ranjitha Kumari, "Pulsed magnetic field: A contemporary approach offers to enhance plant growth and yield of soybean," *Plant Physiol. Biochem.*, vol. 51, pp. 139–144, 2012.
- [12] N. A. Belyavskaya, "Biological effects due to weak magnetic field on plants," *Adv. Sp. Res.*, vol. 34, no. 7 SPEC. ISS., pp. 1566–1574, 2004.

## Caracterización del Material Ferroeléctrico Dieléctrico KNbO<sub>3</sub>: Propiedades de Interés para Aplicaciones Tecnológicas

### Characterization of ferroelectric dielectric material KNbO<sub>3</sub>: properties of interest for technological applications

*Sebastián Márquez<sup>1</sup>\*, Viancy Isaza<sup>1</sup>, Andrés Arias<sup>1</sup>, Juan Lezcano<sup>1</sup>, Carlos Maya<sup>1</sup>, Alfonso Agudelo<sup>1</sup>, Wilson Martínez<sup>1</sup>, Bayron Alvarez<sup>1</sup>, J. Doria<sup>1</sup>, A. Gómez<sup>2</sup>, J.L. Izquierdo<sup>1,3</sup>*

*1 Institución Universitaria Pascal Bravo, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materialografía, Grupo GIEN, Medellín, Colombia*

*2 Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo de Materiales Cerámicos y Vítreos, Medellín, Colombia*

*3 Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Básica, Grupo de Materiales Cerámicos y Vítreos, Medellín, Colombia*

*Institución Universitaria Pascual Bravo*  
[Sebastian.marquez@pascualbravo.edu.co](mailto:Sebastian.marquez@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

El estudio de las propiedades de estructuras tipo perovskitas ferroeléctricas ha despertado en los últimos años un gran interés en estudiar nuevos materiales libres del compuesto plomo (Pb). Así, la perovskita ABO<sub>3</sub> derivada de KNbO<sub>3</sub> (KN) es un material prototipo elegido para este propósito por la flexibilidad de la estructura para obtener propiedades deseadas. En este estudio, muestras policristalinas de KN monofásico fueron obtenidas por el método de reacción en estado sólido a partir de precursores de alta pureza [K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>].

Los patrones de difracción de rayos X del compuesto fueron registrados con un Panalytical X'Pert Pro diffractometer. Estos espectros muestran no estar afectados por fases secundarias o impurezas dentro del límite de resolución de esta técnica. En el análisis por refinamiento Rietveld mediante el software Maud permitió caracterizar la estructura cristalina ortorrómbica (grupo espacial Bmm<sup>2</sup>) con parámetros de red  $a=5.696 \text{ \AA}$ ,  $b=3.975 \text{ \AA}$  y  $c=5.721 \text{ \AA}$  muy cercanos a los reportes existentes en la literatura. Las propiedades eléctricas se analizaron por un polarímetro RADIANT Precision High Voltage Interface (609B model). Las curvas de polarización revelan el carácter ferroeléctrico a temperatura ambiente ( $P_{\max}=200 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ) con valor capacitivo dentro del rango conocido en este tipo de sistemas dieléctricos ferroeléctricos (C11 pF).

**Palabras claves:** piezoelectricidad, ferroelasticidad, grupo espacial.

## Abstract

The study of the properties of structures type perovskitas ferroelectric has awaken in latest years a great interest in design new lead free materials. Thus, the perovskite ABO<sub>3</sub> derived from KNbO<sub>3</sub> (KN) is a prototipe material chosen for its structure flexibility towards its desired properties. In this study, samples of polycrystalline KN monophase were made by the solid estate reaction method from high purity precursors [K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>]. The compound X ray diffraction patterns were registered with a Panalytical X'Pert Pro diffractometer. This spectrum shows no affectation from secondary phases or impurities within the resolution limits of this technique. In the analysis for refinement analysis Rietveld by the Maud software allowed the characterization of the orthorhombic crystalline structure (special group Bmm<sup>2</sup>) with parameters of red a=5.696 Å, b=3.975 Å and c=5.721 Å a very close to the existing reports in literature. The electrical propieties were analyzed for a polarimeter RADIANT Precision High Voltage Interface (609B model). The polarization curves show the ferroelectric character at room temperature (P<sub>max</sub>=200 µC/m<sup>2</sup>) with capacitive value within the know range of this type of ferroelectric dielectric systems (C<sub>11</sub> pF).

**Keywords:** Piezoelectricity, ferroelectricity, space group.

## 1. Introducción

A causa de lo perjudicial que es el plomo para la salud y el medio ambiente, en 2003 se incluyó el PZT como sustancia peligrosa y por ello debe ser progresivamente retirado. Debido al gran rango de aplicaciones que posee el PZT, para ser substituido se requiere el desarrollo de nuevos materiales piezoeléctricos sin plomo, amigables con el medio ambiente y con propiedades comparables o superiores al PZT y sus derivados.

Los cerámicos piezoeléctricos libres de plomo más estudiadas actualmente, como sustitutos del PZT, pueden ser divididos en tres familias:

- Materiales con bismuto y estructura en capas: formada por compuestos como el Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> y cuyas propiedades son una baja constante dieléctrica y alta temperatura de Curie. Con estas propiedades sus aplicaciones residen en sensores, resonadores y filtros.
- Materiales con estructura tipo Bronze-Wolframio: como el Sr<sub>x</sub>Ba<sub>1-x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> útiles en electroóptica y aplicaciones de fotorrefractiva.
- Cerámicas piezoeléctricas con estructura tipo perovskita: el KNbO<sub>3</sub> muestran propiedades ferroelectricas y poseen una alta temperatura de Curie. Sus propiedades los hacen buenos candidatos para ser aplicados como condensadores.

El interés de estudiar estos materiales ferroeléctricos, entre los que se encuentra el KNbO<sub>3</sub> (Niobato de Potasio), y la correlación entre sus propiedades estructurales y eléctricas se debe principalmente a que presentan propiedades interesantes como: ferroelectricidad, antiferroelectricidad y piezoelectricidad. El estudio y entendimiento de estas propiedades se ha convertido en un desafío para la Física de la Materia condensada dado éste material ha atraído gran interés, no solo por ser una matriz de los materiales piezoeléctricos, sino también por sus aplicaciones en transductores, actuadores, capacitores, y memorias de almacenamiento de información.

Sin embargo, también presenta algunas desventajas, como la dificultad de obtener cerámicos con alta densidad por métodos convencionales de preparación y sinterización, debido a la volatilidad de los elementos alcalinos a las altas temperaturas requeridas en la sinterización, hecho que disminuye sus propiedades piezoeléctricas y electromecánicas.

Para la caracterización estructural, morfológica, ferroeléctrica y dieléctrica de los sistemas realizados en este trabajo, se utilizaron las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Espectroscopia de impedancia compleja y polarización. Debido a que en las aplicaciones industriales estos materiales se emplearían compactados, en este trabajo se analizó los compuestos obtenidos en forma de polvos y pastillas compactadas.

Los materiales sinterizados se caracterizaron estructuralmente mediante (DRX). Para las mediciones de difracción de rayos X presentadas en este trabajo utilizamos un difractómetro Panalytical X'Pert Power diffractometer, en una configuración estándar theta -2theta, usando radiación CuK $\alpha$  ( $\lambda=0.15418$  nm).

Curvas de polarización eléctrica de LiNbO<sub>3</sub> fueron obtenidas usando un sistema Radiant Technologies RT66A para mediciones de propiedades ferroelectricas. Una onda bipolar estándar con periodo de 10 ms fue aplicada a una pastilla cilíndrica de 5 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor. Estas pastillas fueron situadas entre electrodos de cobre simulando un capacitor de placas paralelas. Las mediciones se llevaron a cabo en el rango de 100 V a 1100 V conservándose el comportamiento ferroeléctricos dentro de este rango.

Para un análisis más detallado de las propiedades dieléctricas de estos compuestos, se realizaron medidas implementando la técnica de espectroscopia de impedancia compleja en un rango de baja frecuencia (5 mHz – 200 kHz) a una temperatura de 300 °K, este análisis se realizó usando un analizador de impedancia HIOKI 3532-50 empleando una configuración de dos electrodos de plata y una celda para control de atmosfera.

## 2. Resultados de la Investigación

### Propiedades estructurales

Para corroborar los resultados del ensayo DRX posteriormente se realizó el refinamiento Rietveld comparando la fase obtenida experimentalmente con espectros teóricos encontrados en bases de datos.

El refinamiento y análisis del patrón de difracción del compuesto cerámico KNbO<sub>3</sub> se obtuvieron mediante el uso del software MAUD (Material Analysis Using Diffraction) el cual permite calcular el patrón de difracción de rayos X teóricos descargados de la base de datos de ICSD, mediante los valores de los parámetros de red cristalina y grupo espacial calculados con el MAUD, y compararlo con los conseguidos experimentalmente, obteniendo de este modo que la estructuras se ajustan a la cristalización de dichas perovskitas.

Es importante anotar que al comparar los difractogramas teóricos con los experimentales en el software MAUD se observa una pequeña diferencia de fase, debida a que los parámetros de red teóricos son aproximados a los obtenidos experimentalmente mediante la técnica de difracción de rayos X. Sin embargo, esta diferencia de fase se soluciona ajustando estos parámetros mediante el programa MAUD, hasta que se observa una mayor similitud (figura 1).

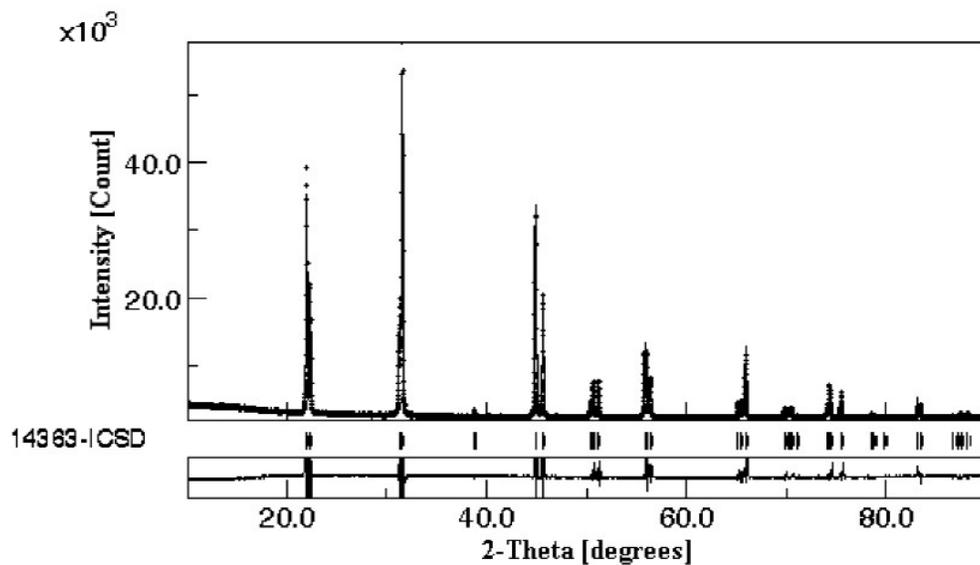


Figura 1. Refinamiento Rietveld del compuesto monofásico KNbO<sub>3</sub>

### Propiedades ferroeléctricas por medio del ensayo de polarización.

Estos resultados de polarización son obtenidos al ser realizado el ensayo a una muestra de 5mm de diámetro, y 2mm de espesor; del compuesto KNbO<sub>3</sub>. Se puede observar mediante este ensayo varias curvas de histéresis correspondientes a diferentes voltajes aplicados a la muestra, estas curvas nos muestran las propiedades ferroeléctricas del compuesto a temperatura ambiente (300 K). Una onda dipolar estándar con periodo de 1ms fue aplicada. Se puede apreciar una completa polarización de saturación en todo el rango del campo eléctrico aplicado.

Se pudo observar que el ciclo de histéresis características de materiales ferroeléctricos asociado a la presencia de dominios. Las mediciones se llevaron a cabo con un rango de 50V a 250V conservándose el comportamiento ferroelectrico dentro de este orden de magnitudes con una polarización máxima ( $P_{max} = 1.5 \times 10^{-3} \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) y ( $P_{max} = 7.7 \times 10^{-3} \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ), respectivamente, con una capacitancia constante de  $C = 10 \text{ pF}$ .

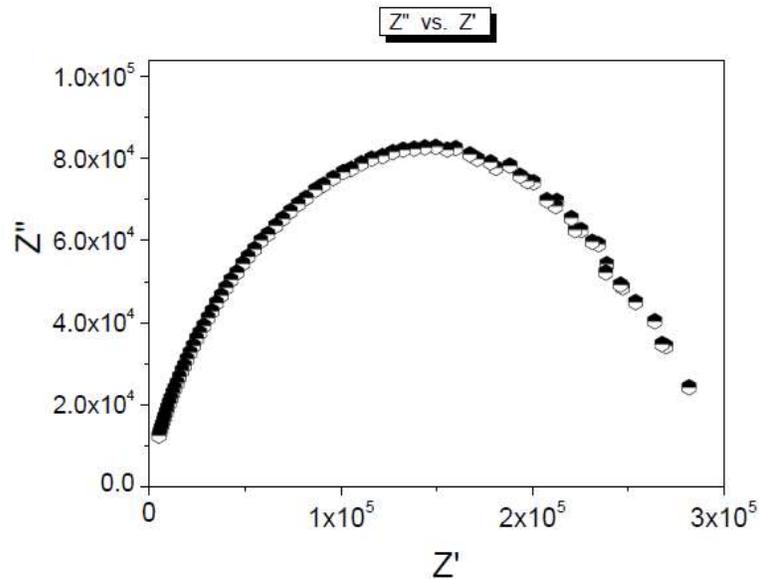
### Propiedades dieléctricas por medio de ensayo

Se analizaron las muestras KNbO<sub>3</sub> a temperatura ambiente (300 °K). En ella se muestra la representación compleja de la impedancia ( $Z'$  vs  $Z''$ ).

Se realizó un ajuste o simulación de los espectros de impedancia con el circuito eléctrico, donde CPE es un elemento de fase constante, este elemento es utilizado para procesos no ideales; además, toma en cuenta las heterogeneidades de la superficie de la muestra.

El compuesto KNbO<sub>3</sub> exhibe un comportamiento semiconductor, debido a que la resistencia eléctrica de los límites de grano presenta un valor elevado con respecto a la asociada a los granos, además, se muestra su capacidad aislante a temperatura ambiente

del orden de los Mohm ( $1,8E+5$ ) y un valor capacitivo teórico de  $9,284 E-9$  con un porcentaje de error de 8,6%. En este caso se obtiene un comportamiento para la impedancia que fluctúa entre 105 Ohm a 106 Ohm, para valores de frecuencia entre 0.01 Hz a 0.1 MHz respectivamente en orden de magnitud.



### 3. Referencias

- [1]D. Fu, T. Arioka, H. Taniguchi, T. Taniyama, M. Itoh, Appl. Phys. Lett. 99 (2011) 012904
- M. Aballe, J. López Ruiz, J.M. Badía y P. Adeva, Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X, CSIC, España (1996).
- [2]Seidel, P. B. omas, H. and Hoffmann, W., Temperature dependence of the birefringence at the phase transition of NaNbO3 P-NaNbO3 No. Ferroelectrics, 1978, 18, 243.
- [3]Nitta, T., Properties of sodium-lithium niobate solid solution ceramics with small lithium concentrations. J. Am. Ceram. Soc., 1968, 51 (11), 626.
- [4]Hardiman, B., Henson, R. M., Reeves, C. P. and Zeyfang, R. R., Hot pressing of sodium lithium niobate ceramics with perovskite-type structures. Ferroelectrics, 1976, 12, 157.
- [5]Henson, R. M., Zeyfang, R. R. and Kiehl, K. V., Dielectric and electromechanical properties of (Li, Na) NbO3 ceramics. J. Am. Ceram. Soc., 1977, 60 (1-2), 15.
- [6]M.C. Reyes, Trabajo de grado, Síntesis de la perovskita  $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$  y caracterización de su resistividad eléctrica en presencia de monóxido de carbono, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física. 2005.
- Cuervo, Javier Alonso., Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogota., (2011). Magister en Ciencias-Física, Propiedades estructurales y espectroscopía de impedancia del estanato tipo perovskita (Ba, Sr)  $SnO_3$ , 113.
- [7]Zeyfang, R. R., Henson, R. M. and Maier, W. J., Temperature- and time-dependent properties of polycrystalline (Li, Na) NbO3 solid solutions. J. Applied Phys., 1977, 48 (7), 3014.
- [8]B. Merino Raquel., Universidad de Barcelona, facultad de química., (2012 - 2013). Master en química de materiales aplicada., síntesis dirigida a la mejora de las propiedades del (K,Na) NbO3, 41.
- [9]Von der Mühl, R., Sadel, A., Ravez, J. and Hagenmuller, P., Etude des transitions ferroélectrique-paraelectrique des composés du système NaNbO3- LiNbO3. Solid State Comm., 1979, 31, 151.
- [10]J. Roa-Rojas. Propiedades y aplicaciones de nuevos materiales de tipo perovskita, Memorias de V Semana Ciencia y Tecnología, Universidad Francisco de Paula Santander, Pg. 18, 2008, ISBN: 978-958-8489-001.
- [11]R. Jiménez et al., J. Phys.: Condens. Matter 16, 7493 (2004); M. P. Ivliev et al., Phys. Solid State 45, 1984 (2003).
- [12]Clécio Clemente de Souza Silva, Desenvolvimento de substratos para Filmes Supercondutores de Alta Tc e Dinâmica de Vórcices em Multicamadas Supercondutoras, Tesis de Maestría, Universidad Federal de Pernambuco, Brasil, (1999).

# Evaluación Preliminar de los Factores que Afectan la Estabilidad de Nanofluidos para Aplicaciones de Transferencia de Calor

## Preliminary evaluation of factors that affect nanofluids stability for heat transfer applications

*Karen Cacua Madero*

*Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano  
Grupo de Ciencia de los Materiales Avanzados, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín  
[karencacua@itm.edu.co](mailto:karencacua@itm.edu.co); [kpcacuam@unal.edu.co](mailto:kpcacuam@unal.edu.co)*

*Robison Buitrago Sierra*

*Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano  
[robinsonbuitrago@itm.edu.co](mailto:robinsonbuitrago@itm.edu.co)*

*Elizabeth Pabón Gelves*

*Grupo de Ciencia de los Materiales Avanzados, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín  
[epabon@unal.edu.co](mailto:epabon@unal.edu.co)*

*Bernardo Herrera Múnera*

*Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano  
[bernardoherrera@itm.edu.co](mailto:bernardoherrera@itm.edu.co)*

*Jorge Luis Rentería*

*Joven Investigador ITM, Estudiante de Ingeniería Electromecánica  
Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano  
[jorgenteria137111@correo.itm.edu.co](mailto:jorgenteria137111@correo.itm.edu.co)*

## Resumen

A nivel mundial la búsqueda de alternativas que permitan incrementar la eficiencia energética en los procesos industriales ha estado en constante crecimiento, debido principalmente a la preocupación por alcanzar un uso eficiente de la energía y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

La mayoría de los procesos a nivel industrial, involucran producción o absorción de energía en forma de calor, estos procesos podrían tener mayores eficiencias energéticas, a partir de la sustitución de sus fluidos térmicos convencionales (agua, etilenglicol, aceite motor) por nanofluidos. Los nanofluidos son suspensiones coloidales obtenidas al dispersar nanopartículas (tamaño < 100 nm) de diferentes materiales con el objetivo de incrementar la conductividad térmica de los fluidos convencionales. Sin embargo, a pesar de los numerosos estudios que se encuentran en la literatura mostrando los incrementos en la conductividad térmica y la transferencia de calor en los diferentes sistemas térmicos a escala de laboratorio, la inestabilidad de los nanofluidos ocasionada por la aglomeración y sedimentación de las nanopartículas sigue siendo un reto de investigación.

Entre los factores que afectan la estabilidad de un nanofluido se encuentran el método de dispersión, la concentración de nanopartículas, el pH, tipo de nanopartícula y aditivos químicos. En este estudio, se prepararon nanofluidos de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y se implementó un diseño factorial fraccionado  $2^{6-2}$  de resolución IV, con el fin de evaluar el efecto de diferentes parámetros en la estabilidad de los nanofluidos. La estabilidad se evaluó como el cambio en la conductividad térmica con el tiempo. Los resultados mostraron que el tiempo de ultrasonido, la concentración de surfactante y las interacciones entre el tipo de nanopartícula y el tipo de surfactante y entre el tipo de nanopartícula y la concentración de surfactante tienen un efecto significativo estadísticamente en la estabilidad del nanofluido.

**Palabras claves:** nanofluidos, estabilidad, conductividad térmica

## Abstract

Worldwide searches for alternatives to increase energy efficiency in industrial processes has been steadily growing, mainly due to concerns about achieving efficient use of energy and mitigate emissions of greenhouse gases.

Most processes at industrial level, produce or involve absorption energy as heat, these processes may have greater energy efficiency, from replacing their conventional thermal fluids (water, ethylene glycol, engine oil) by nanofluids. Nanofluids are colloidal suspensions obtained by dispersing nanoparticles (particle size <100 nm) of different materials in order to increase the thermal conductivity of conventional fluids. However, despite numerous studies in the literature showing increases in thermal conductivity and heat transfer in the various thermal systems at laboratory scale, instability nanofluids caused by agglomeration and sedimentation of nanoparticles remains a research challenge.

Among the factors affecting the stability of a nanofluids are dispersion method, nanoparticle concentration, pH, type of nanoparticle and chemical additives. In this study, nanofluids of aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) were prepared and a fractional factorial design  $2^{6-2}$ , resolution IV, was implemented, in order to evaluate the effect of different parameters on the stability of nanofluids. Stability was evaluated as the change in thermal conductivity with time. The results showed that the ultrasound time, the surfactant concentration and the type of interactions between nanoparticle and the type of surfactant and the type of nanoparticle and surfactant concentration have a statistically significant effect on nanofluids stability.

**Keywords:** nanofluids, stability, thermal conductivity

## 1. Introducción

Los nanofluidos actualmente son conocidos como suspensiones obtenidas al dispersar nanopartículas (tamaño <100 nm) con bajas concentraciones volumétricas (generalmente menores al 10%) en fluidos base como agua, etilenglicol, aceites y soluciones poliméricas [1]. El principal objetivo de las nanopartículas suspendidas en un fluido es incrementar la conducción de calor debido a su alta área superficial e incrementar la conductividad térmica de los fluidos [2].

A partir de la introducción de los nanofluidos para aplicaciones de transferencia de calor realizada por Choi y col. [3], se han utilizado nanopartículas de diferente naturaleza tales como metales (ej. Oro, cobre), óxidos metálicos (ej. Sílica, alúmina, zirconia, titania), carburos metálicos (ej. SiC), nitruros metálicos (ej. AlN, SiN), carbón en varias formas (ej. Diamante, grafito, nanotubos de carbono, fullerenos), así como también nanopartículas mezcladas o compuestas [4].

Sin embargo, a pesar de todo el potencial que tienen los nanofluidos para incrementar la eficiencia energética de los sistemas de transferencia de calor, estos aún no han podido tener aplicación industrial, debido principalmente a problemas de inestabilidad (variación de sus propiedades termofísicas con el tiempo debido a la agregación y sedimentación de nanopartículas) [4]–[10].

Es por esto que estudiar los factores que afectan la estabilidad y encontrar métodos que permitan obtener nanofluidos estables, para aplicaciones de transferencia de calor, se ha convertido en uno de los principales retos de investigación a nivel mundial [4]–[10].

Entre los diferentes factores que afectan la estabilidad se encuentran el tipo de nanopartícula utilizada, su concentración, el tipo y concentración de surfactante, tiempo de ultrasonido y potencia de ultrasonido y el pH entre otros factores [11], [12]. Sin embargo, aunque se han encontrado diferentes estudios que evalúan el efecto de los diferentes factores en diferentes nanofluidos [10], [13], [14], en la literatura revisada no se encontró un estudio experimental que analizara el efecto de más de cinco factores en la estabilidad de nanofluidos de óxidos metálicos. En este estudio experimental se implementó un diseño factorial fraccionado  $2^{6-2}$  de resolución IV, con el fin de determinar los factores o sus interacciones que tuvieran un efecto significativo en la estabilidad de nanofluidos de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), con el fin de investigar posteriormente dichos factores o interacciones y optimizar sus valores para obtener nanofluidos estables.

## 2. Materiales y métodos

Los nanofluidos se prepararon por el método de dos pasos, el cual consiste en adicionar las nanopartículas sólidas y el surfactante al fluido base y dispersarlas usando una sonda de ultrasonido (Qsonica-Q500). Para la disipación de calor en el nanofluido durante la sonicación, se utilizó un baño termostataado (LAUDA, RA24). El montaje experimental se muestra en la FIGURA 11. Se utilizaron nanopartículas de óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , fase gama, <50 nm) y dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ , <21 nm), obtenidas comercialmente en Sigma-Aldrich. Los surfactantes utilizados fueron Dodecilbenzeno Sulfonato de Sodio (SDBS, por su nombre en inglés) y Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB, por su nombre en inglés).

La estabilidad del nanofluido se determinó teniendo en cuenta la variación de la conductividad térmica con el tiempo, utilizando un analizador transitorio de hilo caliente KD2 Pro (Decagon, Inc). Para evaluar el efecto de los diferentes factores y sus interacciones, se implementó un diseño factorial fraccionado  $2^{6-2}$  de resolución IV, realizando 16 corridas experimentales. En la Tabla 4 se muestran los diferentes factores estudiados y se establecen sus niveles. Los experimentos fueron realizados de forma aleatoria, la matriz de diseño ejecutada se muestra en la Tabla 5. Los resultados obtenidos se procesaron utilizando el software estadístico Minitab 17 versión demo.

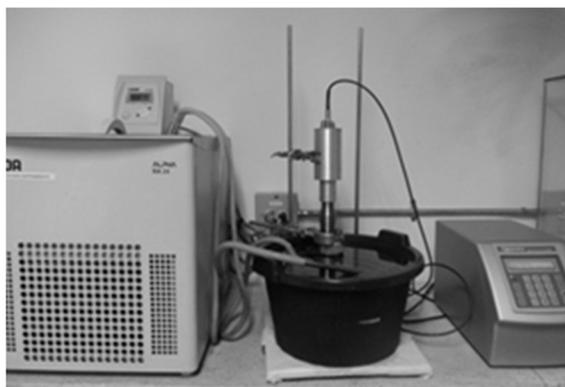


FIGURA 11. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA PREPARACIÓN DE NANOFLUIDOS POR EL MÉTODO DE DOS PASOS

TABLA 4. FACTORES Y NIVELES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Factores	Nivel inferior (-1)	Nivel superior (+1)
A: Tipo de nanopartícula	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
B: Concentración de nanopartículas %p/p	0,1	0,5
C: Tipo de surfactante	SDBS	CTAB
D: Concentración surfactante	1 CMC	2 CMC
E: Amplitud de ultrasonido	30%	50%
F: Tiempo de ultrasonido	10 min	20 min

TABLA 5. MATRIZ DE DISEÑO EXPERIMENTAL

Orden estándar	Orden de ejecución	Tipo de nanopartícula	Concentración de nanopartícula %p/p	Tipo de surfactante	Concentración de surfactante %p/p	Amplitud de ultrasonido	Tiempo de ultrasonido
7	1	-1	1	-1	-1	1	1
15	2	1	1	1	-1	1	-1
2	3	-1	-1	1	1	1	-1
12	4	-1	1	1	1	-1	1
5	5	1	-1	1	1	-1	-1
13	6	1	1	-1	-1	-1	1
4	7	1	-1	-1	1	1	1
9	8	1	1	1	1	1	1
10	9	1	1	-1	1	-1	-1
6	10	1	-1	1	-1	-1	1
16	11	-1	-1	1	-1	1	1
1	12	-1	-1	-1	1	-1	1

3	13	-1	-1	-1	-1	-1	-1
8	14	-1	1	-1	1	1	-1
14	15	-1	1	1	-1	-1	-1
11	16	1	-1	-1	-1	1	-1

## 2.1. Evaluación de la estabilidad de los nanofluidos

La evaluación de la estabilidad se realizó teniendo en cuenta la diferencia entre la conductividad térmica del nanofluido inmediatamente después de preparado ( $K_1$ ) y la conductividad térmica ocho días después ( $K_2$ ). Un valor de cero indica un nanofluido estable. La ecuación (1) muestra el cálculo de la estabilidad:

$$Estabilidad = \left| \frac{K_1 - K_2}{K_1} \right| \quad (1)$$

## 3. Resultados

### 3.1. Diagrama Pareto

El diagrama de Pareto muestra los efectos estimados y las interacciones ordenados desde el mayor hasta el menor, utilizando columnas. En la FIGURA 12 se muestran los efectos significativos y no significativos estadísticamente en la variación de la conductividad térmica. La línea vertical punteada indica cuán grande debe ser un efecto para ser estadísticamente significativo. Como se puede observar solo la interacción entre el tipo de nanopartícula y el tipo de surfactante tiene un efecto significativo sobre la variación de la conductividad térmica. Al combinar una nanopartícula específica con un determinado tipo de surfactante, ya sea iónico, catiónico o no iónico, este influencia el tipo de interacción que se presenta entre las nanopartículas, así como también, las propiedades térmicas e hidrodinámicas del nanofluido [15].

Para refinar el análisis, se aplicó el método de la curvatura sugerido por Gutiérrez y de la Vara (2008, p. 197), en el cual se repite el análisis sólo con aquellos factores e interacciones que forman una tendencia curva en el diagrama de Pareto. Estos factores e interacciones son AC, F, D, AD y AF. Con esta elección, se logró obtener un total de 10 grados de libertad en el error. La interacción ABF no se tomó en cuenta debido a que es una interacción de tres factores, la cual no es significativa según los supuestos del diseño factorial fraccionada. Es posible que la aparición de esta interacción dentro de los primeros lugares en el diagrama de Pareto se deba a un efecto marcado del factor F o de la interacción AF. Es por esta razón que en el nuevo análisis se incluye la interacción AF, aun cuando esta no está definida completamente dentro de la concavidad superior.

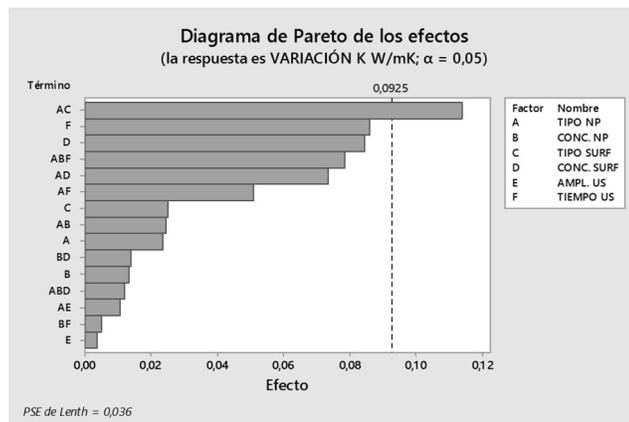


FIGURA 12. DIAGRAMA PARETO DE LOS EFECTOS EN LA VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En la FIGURA 13 se muestra el diagrama de Pareto para la variación de la conductividad térmica incluyendo solamente los factores e interacciones AC, F, D, AD y AF. En este caso se observa que los factores F (tiempo de ultrasonido) y D (concentración de surfactante), al igual que las interacciones AC (tipo de nanopartícula y tipo de surfactante) y AD (tipo de nanopartícula y concentración de surfactante) resultaron tener un efecto significativo estadísticamente sobre la variación de la conductividad térmica del nanofluido. Estos resultados se confirman en el análisis de ANOVA que se muestra en la Tabla 6, donde se puede observar que las fuentes de variación AC, F, D, y AD tuvieron valores p de 0,003; 0,015; 0,016 y 0,031; respectivamente, menores que el nivel de significancia de 0,05.

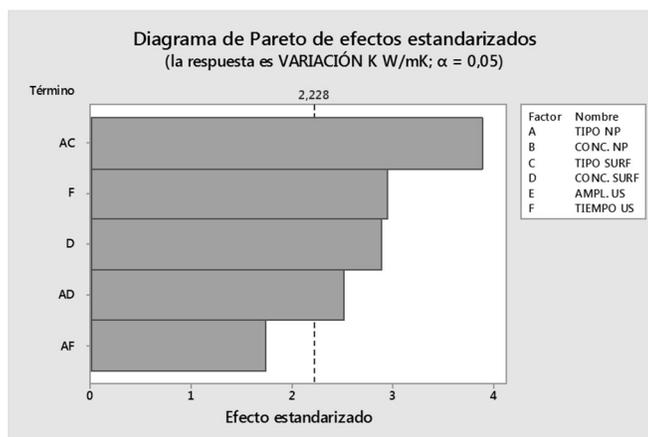


FIGURA 13. DIAGRAMA PARETO DE LOS EFECTOS EN LA VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

TABLA 6. ANÁLISIS ANOVA DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO CON LOS FACTORES AC, F, D, AD Y AF

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	F	p
Modelo	5	0,14164	0,028329	8,28	0,003
Lineal	2	0,05798	0,028988	8,47	0,007
Conc. Surf.	1	0,02839	0,028392	8,29	0,016
Tiempo US	1	0,02958	0,029584	8,64	0,015
Int. Dobles	3	0,08367	0,027889	8,15	0,005
Tipo NP – Tipo Surf.	1	0,05176	0,051756	15,12	0,003
Tipo NP – Conc. Surf.	1	0,02161	0,02161	6,31	0,031
Tipo NP –Tiempo US.	1	0,01030	0,010302	3,01	0,113
Error	10	0,03423	0,003423		

En la Tabla 7 se muestra la estructura de alias para los factores e interacciones seleccionados. Se nota claramente que los factores principales D y F solo están aliados con interacciones de tres y cinco factores, por lo que se puede decir con certeza que estos efectos son atribuibles exclusivamente a estos factores. Los valores de estos factores que minimizan la variación de la conductividad térmica son el uso de SDBS como surfactante y un menor tiempo de ultrasonido, es necesario por lo tanto realizar un estudio adicional para encontrar valores óptimos de estos factores que minimicen la variación en la conductividad térmica.

Las interacciones AC y AD están aliadas con las interacciones dobles BE y EF, por lo que no puede distinguirse su efecto único por encima de estas interacciones.

TABLA 7. ESTRUCTURA DE ALIAS DE LOS FACTORES E INTERACCIONES SELECCIONADAS

$$\begin{aligned}
 & I + ABCE + ADEF + BCDF \\
 & D + AEF + BCF + ABCDE \\
 & F + ADE + BCD + ABCEF \\
 & AC + BE + ABDF + CDEF \\
 & AD + EF + ABCF + BCDE \\
 & AF + DE + ABCD + BCEF
 \end{aligned}$$

El hecho de que la interacción AC (tipo de nanopartícula y tipo de surfactante) resulte significativo es consecuente con el tipo de interacción química que se presenta en este tipo de sistemas, ya que al combinar una nanopartícula específica con un surfactante se presentan una serie de efectos de atracción y repulsión entre las nanopartículas que llevan a una aglomeración o separación de las mismas, trayendo como consecuencia cambios en la conductividad térmica del nanofluido [16]. No obstante, esta interacción está aliada con la interacción BE (concentración de nanopartículas y amplitud de la sonicación), la cual también explicaría un cambio en la conductividad térmica, dado que los aumentos en concentración de nanopartículas conllevan aumentos en conductividad térmica y la amplitud de la sonicación afecta la dispersión de las nanopartículas.

Por lo tanto, no se puede concluir con certeza a cuál de estas interacciones dobles aliadas se puede atribuir el efecto observado sobre la variación de la conductividad. Esta misma ambivalencia se presenta entre interacciones AD (tipo de nanopartícula y concentración de surfactante) y EF (amplitud y tiempo de sonicación), dado que la conductividad térmica depende de la interacción del surfactante con el tipo de nanopartícula y con el fluido base, pero también se debe tener en cuenta que la amplitud y el tiempo de sonicación en conjunto afectan la dispersión de las nanopartículas, influyendo sobre la conductividad térmica del nanofluido. Con estos resultados preliminares y la resolución de este diseño, no es posible concluir cuáles efectos o sus interacciones tienen mayor influencia sobre la variación de la conductividad térmica con el tiempo y establecer un modelo estadístico predictivo de esta variación.

En la Figura 14 se muestran los efectos de las interacciones en la variación de la conductividad térmica. De acuerdo a la interacción entre el tipo de nanopartícula y el tipo de surfactante para el caso de las nanopartículas de  $Al_2O_3$ , la variación de la conductividad térmica se minimiza con el surfactante aniónico SDBS, mientras que para las nanopartículas de  $TiO_2$  la variación en la conductividad térmica se minimiza con CTAB. En el caso del tiempo de ultrasonido, un mayor tiempo de ultrasonido minimiza la variación de la conductividad térmica para el caso de las nanopartículas de  $TiO_2$ , mientras que para las partículas de  $Al_2O_3$  un menor tiempo disminuye la variación en la conductividad térmica. Por lo tanto, es evidente que la naturaleza de la nanopartícula y su interacción con el tipo de surfactante, así como también el tiempo de ultrasonido para su sonicación, deben ser estudiados con mayor profundidad con el fin de obtener valores óptimos que minimicen la variación de la conductividad térmica y mejoren la estabilidad de los nanofluidos.

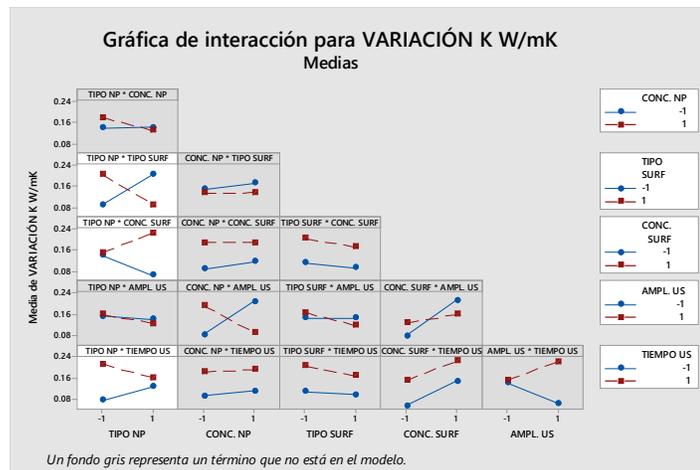


Figura 14. Efecto de las interacciones dobles en la variación de la conductividad térmica.

#### 4. Conclusiones

Se utilizó un diseño factorial fraccionado de resolución IV con el fin de identificar preliminarmente el efecto de seis factores y/o sus interacciones en la variación de la conductividad térmica de nanofluidos, como indicativo de estabilidad.

El tiempo de ultrasonido y la concentración de surfactante tienen una influencia significativa sobre la variación de la conductividad térmica del nanofluido. Sin embargo, es necesario evaluar con mayor profundidad dicho efecto con el fin de obtener valores óptimos de estos factores que permitan minimizar la variación en la conductividad térmica con el tiempo.

La interacción del tipo de nanopartícula con el tipo y la concentración de surfactante influyen significativamente sobre la variación de la conductividad térmica, aunque estos efectos están confundidos con otros factores determinantes de la estabilidad de un nanofluido como son la amplitud y el tiempo de sonicación, por lo que no se puede concluir sobre cual efecto es más significativo en la variación de la conductividad térmica.

Es necesario aplicar el diseño factorial fraccionado como herramienta de análisis preliminar teniendo en cuenta otras variables respuesta, tales como absorbancia, potencial zeta y dispersión de luz dinámica, con el fin de confirmar cuál factor o sus interacciones tienen un efecto significativo en la estabilidad de los nanofluidos y poder confirmar los resultados obtenidos en este primer estudio.

## 5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto dentro del cual se enmarca esta investigación.

## 6. Referencias

- [1] R. Kamatchi and S. Venkatachalapathy, "Parametric study of pool boiling heat transfer with nanofluids for the enhancement of critical heat flux: A review," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 87, pp. 228–240, Jan. 2015.
- [2] S. K. Das, S. U. S. Choi, and H. E. Patel, "Heat Transfer in Nanofluids—A Review," *Heat Transf. Eng.*, vol. 27, no. 10, pp. 3–19, Dec. 2006.
- [3] S. Choi and J. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, pp. 12–17, 1995.
- [4] J. Sarkar, P. Ghosh, and A. Adil, "A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 164–177, Mar. 2015.
- [5] C. Pang, J. W. Lee, and Y. T. Kang, "Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 87, pp. 49–67, Jan. 2015.
- [6] L. Yang, K. Du, X. S. Zhang, and B. Cheng, "Preparation and stability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particle suspension of ammonia–water solution," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 17–18, pp. 3643–3647, Dec. 2011.
- [7] W. Yu and H. Xie, "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications," *J. Nanomater.*, vol. 2012, pp. 1–17, 2012.
- [8] N. A. C. Sidik, H. a. Mohammed, O. a. Alawi, and S. Samion, "A review on preparation methods and challenges of nanofluids," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 54, pp. 115–125, May 2014.
- [9] J. Philip and P. D. Shima, "Thermal properties of nanofluids.," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 183–184, pp. 30–45, Nov. 2012.
- [10] L. Fedele, L. Colla, S. Bobbo, S. Barison, and F. Agresti, "Experimental stability analysis of different water-based nanofluids.," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 6, no. 1, p. 300, Jan. 2011.
- [11] N. Nikkam, "Engineering Nanofluids for Heat Transfer Applications," Royal Institute of Technology (KTH), 2014.
- [12] M. E. Meibodi, M. Vafaie-Sefti, A. M. Rashidi, A. Amrollahi, M. Tabasi, and H. S. Kalal, "The role of different parameters on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube/water nanofluids," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 3, pp. 319–323, 2010.
- [13] X. Wang, X. Li, and S. Yang, "Influence of pH and SDBS on the Stability and Thermal Conductivity of Nanofluids," no. 16, pp. 2684–2689, 2009.
- [14] a. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. C. Metselaar, "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 17–18, pp. 4051–4068, Aug. 2011.
- [15] R. V. Pinto and F. A. S. Fiorelli, "Review of the Mechanisms Responsible for Heat Transfer Enhancement Using Nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 108, pp. 720–739, 2016.
- [16] C. Pang, J.-Y. Jung, and Y. T. Kang, "Aggregation based model for heat conduction mechanism in nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 72, pp. 392–399, May 2014.

## Secado Mecánico de Café con Deshumidificación por Bomba de Calor

### Mechanical drying of coffee by dehumidifying using a heat pump

Bernardo Herrera Múnera

Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano  
[bernardoherrera@itm.edu.co](mailto:bernardoherrera@itm.edu.co)

Karen Cacia Madero

Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano  
[karencacia@itm.edu.co](mailto:karencacia@itm.edu.co)

Jhony Gutiérrez Flórez

Soluciones Energéticas y de Automatización  
[ingenieria@iosoluciones.co](mailto:ingenieria@iosoluciones.co)



## Resumen

El uso de una bomba de calor para deshumidificar el aire de secado de granos de café puede ser una solución tecnológica que facilite esta operación en menor tiempo, sin depender de condiciones climáticas y sin emitir gases de efecto invernadero.

En este trabajo, se adaptó un secador mecánico de café, cuyos elementos principales son una bandeja de secado y dos de presecado con una capacidad total de 125 kg de café pergamino seco, un ventilador centrífugo, una bomba de calor de 20 toneladas de refrigeración y celdas de carga para la medición de la variación del peso de las bandejas.

Los resultados mostraron que el secado con la bomba de calor tardó entre 35 y 51 horas para todas las bandejas, más tiempo de lo que se lograría con un secador mecánico usando combustible como fuente de calentamiento. Este resultado se debe a que el secado se hizo por medio de gradientes de humedad y sin adición de calor, lo cual hace que el tiempo de secado sea más largo.

Con base en el consumo de electricidad de la bomba de calor durante el secado, se calcularon las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>. Estas emisiones se compararon con las emisiones derivadas de resultados previos de evaluación del secador mecánico usando GLP y alcohol carburante, encontrando que las emisiones de CO<sub>2</sub> con la tecnología de bomba de calor son mayores debido al largo tiempo de secado. Sin embargo, estas mediciones podrían ser competitivas con el secado mecánico si el sistema de secado con bomba de calor se optimiza usando fuentes de calor de origen renovable.

**Palabras clave:** secado, bomba de calor, deshumidificación, gradiente de humedad.

## Abstract

Using of a heat pump to dehumidify the drying air of coffee beans can be a technological solution that facilitates this operation in less time, without depending on weather conditions and without emitting greenhouse gases.

In this work, a mechanical dryer coffee was adapted, whose main elements are a drying tray and two pre-drying trays with a total capacity of 125 kg of dry parchment coffee, a centrifugal fan, a heat pump with a capacity of 20 tons of refrigeration and load cells for measuring weight variation of the trays.

The results showed that drying with heat pump took between 35 and 51 hours for all trays, longer than would be achieved with a mechanical dryer using fuel as a heating source. This result is because the drying is made by moisture gradients without addition of heat, which makes the drying time is longer.

Based on the electricity consumption of the heat pump during drying, the equivalent CO<sub>2</sub> emissions were calculated. These emissions compared with emissions from previous results of evaluation of mechanical dryer using LPG and fuel alcohol, finding that CO<sub>2</sub> emissions with heat pump technology are greater because of the long drying time. However, these measurements could be competitive with mechanical drying if the drying system with heat pump is optimized using heat sources from renewable sources.

**Keywords:** drying, heat pump, dehumidifying, humidity gradient

## 1. Introducción

En Colombia, el secado del café se ha realizado tradicionalmente mediante dos métodos: el secado solar y el secado mecánico. En el primero se aprovecha la entalpía del aire y la radiación solar para sustraer la humedad del grano [1], [2], es recomendado para fincas con producciones anuales inferiores a 2.500 kg con una duración entre 7 Y 15 días dependiendo de las condiciones atmosféricas, lo que lo hace un método totalmente dependiente del clima, con la ventaja de ser económico, pero con dos grandes desventajas debido a que la época de cosecha coincide con la época de lluvias incrementando el tiempo de secado y que sólo puede utilizarse en fincas de pequeña producción, en bajo flujo de cosecha para fincas medianas y muy pocas veces en fincas de alta producción, porque de utilizarse se necesitaría de extensas áreas de secado, ya que la altura máxima de capa recomendada es de 3 cm [3].

En el secado mecánico se utiliza una fuente externa de calentamiento para aumentar la temperatura del aire hasta 50°C e impulsarlo por un ventilador, generalmente centrífugo, a través de la capa o las posibles capas de grano provistas en las cámaras de secado y presecado, con una altura máxima por capa de 35 cm [4], hasta que se seque por extracción de humedad libre y difusión de humedad. Cuando la presión de vapor del agua en el grano es mayor que la presión de vapor del aire, ocurre la difusión de humedad o transferencia de masa desde el grano hacia el aire y viceversa. Este proceso puede suceder hasta que el aire se sature y aumente su contenido de humedad relativa al 100% [5].

En general los secadores mecánicos constan de cuatro componentes principales: la cámara de secado y presecado, ventilador, intercambiador de calor y el sistema de combustión. Una alternativa para reemplazar el intercambiador y el sistema de combustión consiste en la implementación de una bomba de calor, la cual puede al mismo tiempo retirar la humedad del aire y aumentar su temperatura, logrando así condiciones favorables para el secado. Entre otros sistemas de recuperación de calor, las bombas de calor integradas en secadores de aire convectivo tienen el potencial de ahorrar hasta 50% o más de la energía primaria usada [6].

Varios estudios se han desarrollado para implementar bombas de calor en secado de varios productos agrícolas, biológicos e incluso maderas [6]–[15]. Sin embargo, en la mayoría de estos trabajos, se ha dado poca información acerca de los datos experimentales y de los métodos usados. Más aún, funcionamientos inadecuados de las bombas de calor tales como cortos circuitos de

operación del compresor, al igual que temperaturas y presiones del refrigerante muy altas o muy bajas, raramente son reportados. Esa falta de información pone en riesgo la credibilidad y las futuras aplicaciones tecnológicas del secado con bomba de calor [16]. Por otra parte, varios trabajos de tipo académico se han enfocado en el impacto del secado con bomba de calor sobre la estructura final, el color y la calidad nutricional de los productos secos, mientras que los procedimientos experimentales y los métodos de secado son altamente cuestionables [16].

En este trabajo se realizó la evaluación experimental de un secador de bandejas de café operando en ciclo cerrado para favorecer el secado de los granos por medio de la creación de gradientes de humedad. Los experimentos realizados incluyen la caracterización neumática del sistema de suministro de aire con la incorporación de la bomba de calor, la construcción de las curvas de secado, el cálculo de la eficiencia de secado y el impacto indirecto en emisiones de CO<sub>2</sub> mediante el uso de esta tecnología.

## 2. Materiales y métodos

Para la realización de los experimentos se dispuso de un secador mecánico de bandejas con una capacidad de 125 kg de café pergamino seco (cps), que se muestra en la . Esta cantidad de café se distribuyó en tres bandejas de igual capacidad de carga. La cámara de secado viene equipada con un ventilador centrífugo, mostrado en la Figura 1. Esta cantidad de café se distribuyó en tres bandejas de igual capacidad de carga. La cámara de secado viene equipada con un ventilador centrífugo, mostrado en la Figura 2, capaz de aportar un flujo de 100 m<sup>3</sup>/min.ton de cps, es decir, aporta 12,5 m<sup>3</sup>/min de aire de secado a la capacidad nominal del secador (125 kg de cps). El rotor de este ventilador está acoplado directamente a un motor monofásico de 373,25 W de potencia (1/2 HP) y gira a 1730 revoluciones por minuto.

El sistema de deshumidificación y calentamiento se construyó con base en una bomba de calor, cuyos componentes básicos son un compresor de 1 HP para refrigerante R22 y dos intercambiadores de calor de cobre con aletas de aluminio para la sección del evaporador y condensador, respectivamente. Estos intercambiadores se muestran en la Figura 3.

La etapa de reducción de presión se realizó por medio de un capilar de cobre en espiral de 3 mm de diámetro que conecta la tubería de cobre que sale del condensador con la que entra al evaporador. Estos componentes fueron instalados en una cámara horizontal, dotada con válvulas en la parte inferior para evacuar la humedad condensada y un ducto que recircula el aire húmedo de la cámara de secado hacia la succión del ventilador. En la Figura 4 se observa el montaje completo de la cámara de secado, ventilador y deshumidificador con bomba de calor.



FIGURA 1. CÁMARA DE SECADO DE TRES BANDEJAS



FIGURA 15. VENTILADOR CENTRÍFUGO

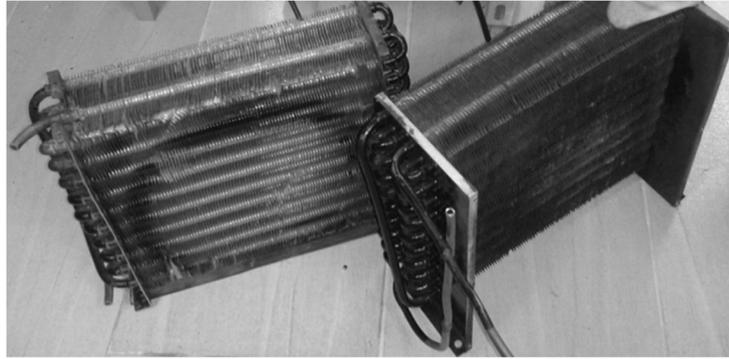


FIGURA 16. INTERCAMBIADORES DE CALOR PARA EL EVAPORADOR Y EL CONDENSADOR

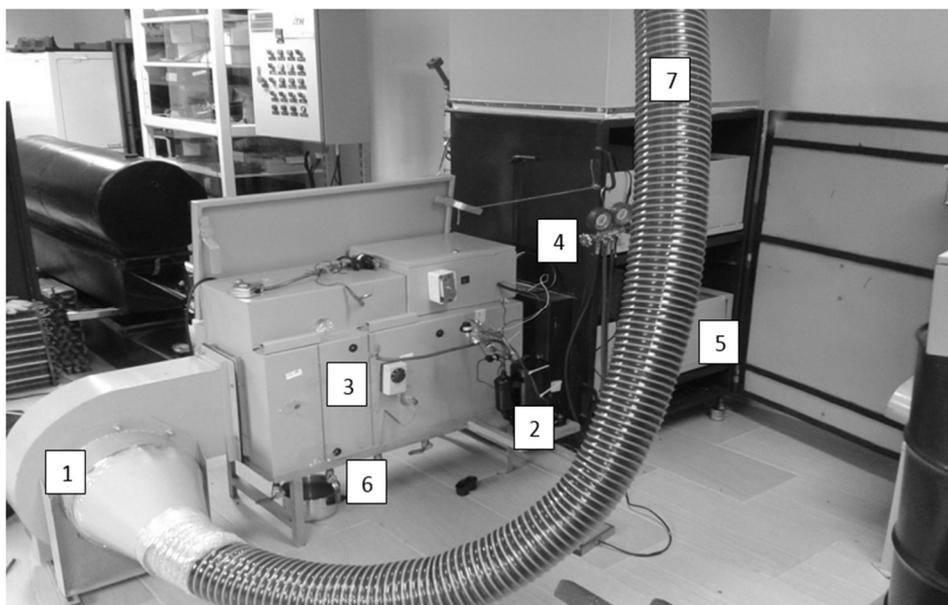


FIGURA 17. MONTAJE DEL SISTEMA DE SECADO CON DESHUMIDIFICACIÓN POR BOMBA DE CALOR. 1) VENTILADOR CENTRÍFUGO DE ½ HP, 2) COMPRESOR DE 1 HP, 3) DESHUMIDIFICADOR CON BOMBA DE CALOR, 4) CÁMARA DE SECADO, 5) BANDEJA, 6) VÁLVULAS DE DRENAJE, 7) DUCTO DE RECIRCULACIÓN DE AIRE HÚMEDO

Los granos de café húmedos fueron suministrados en la Finca “La Casa de Sabaneta”, ubicada en la Calle 77 Sur # 34 - 65, Sabaneta (Antioquia), con una altitud de 1.420 m.s.n.m y una temperatura promedio de 21 °C. Estos granos de café habían pasado por el proceso de despulpado y lavado antes de ingresar al secador. La humedad inicial de los granos se midió por el método de la estufa, arrojando un valor promedio de  $56,4 \pm 1,2\%$  en base húmeda.

## 2.1. Evaluación neumática del ventilador

La evaluación neumática del ventilador se hizo mediante 3 mediciones independientes. Para cada una de las 3 caracterizaciones neumáticas, los registros de presión se realizaron con un ducto dotado de una lámina acrílica deslizante que actúa como dâmpner, con la cual se obtuvieron 10 caudales de aire diferentes por reducción del área de flujo, uno para cada posición de la lámina. Para cada una de estas posiciones se tuvieron tres registros de presión. El primer registro, entre el ducto de recirculación de aire húmedo y la entrada del ventilador (presión de succión), el segundo, a la entrada del deshumidificador, y el tercero, antes de las capas de granos de café siguiendo la dirección del flujo de aire (presión manométrica).

La eficiencia neumática del ventilador se calculó con (1):

$$\eta_n = \frac{Q_{\max} P}{VICos\phi} \times 100$$

64

Donde:

- $\eta_n$  : Eficiencia neumática en %  
 $Q_{\max}$  : Caudal máximo de aire  
 $P$  : Presión estática  
 $V$  : Voltaje de alimentación del motor a 1730 rpm  
 $I$  : Corriente del motor a 1730 rpm  
 $\text{Cos}\phi$  : Factor de potencia del motor (0,84)

## 2.2. Evaluación de eficiencia de secado

Para la prueba de secado se midió el espesor de capa de granos de café, se registró el peso inicial de cada bandeja de secado y el contenido de humedad inicial del café. El peso de las bandejas, medido con celdas de carga electrónicas se anotó cada hora, y cada tres horas se agitaban manualmente todas las bandejas de secado y presecado. Cada hora se anotó la humedad relativa y la temperatura del aire de secado en dos puntos: a la entrada del ventilador y a la salida del deshumidificador de bomba de calor. Sólo se realizó una prueba de secado debido a que la cosecha de la finca era escasa en la época de octubre, fecha en la que se realizó la prueba.

La eficiencia de secado se determinó con (2):

$$\eta_s = \frac{(m_{i,ch} - m_{f,ch}) \times \Delta H_v}{[(VICos\phi)_{\text{ventilador}} + (VICos\phi)_{\text{compresor}}] \times t} \quad (2)$$

Donde:

- $\eta_s$  : Eficiencia de secado en %  
 $m_{i,ch}$  : Masa de café húmedo inicial  
 $m_{f,ch}$  : Masa de café húmedo final  
 $\Delta H_v$  : Entalpía de vaporización del agua (2270 kJ/kg)  
 $V$  : Voltaje de alimentación  
 $I$  : Corriente  
 $\text{Cos}\phi$  : Factor de potencia  
 $t$  : Tiempo de secado

## 2.3. Construcción de curvas de secado

Para el seguimiento del cambio en la humedad del café se instalaron tres celdas de carga Vector SP 100 KG, una en cada bandeja de secado. Cada celda tiene un rango de medición de 0 a 100 kg, con una sensibilidad de  $2 \pm 10\%$  mV/V.

Para la construcción de las curvas de secado, se registró el peso de café húmedo en cada bandeja desde el inicio de la operación hasta alcanzar peso aproximadamente constante en cada bandeja. Debido a que la bandeja inferior se seca más rápido que las superiores, una vez que se alcanzara el peso constante en la bandeja inferior, el café se retiró y se almacenó en un recipiente protegido para evitar su rehumidificación con el aire exterior. Este procedimiento se repitió con la segunda y tercera bandeja, una vez que se alcanzó un peso aproximadamente constante.

Para determinar el porcentaje de humedad del café húmedo, se utilizó el método de la estufa. Se pesó una muestra de café húmedo en una balanza analítica marca OHAUS, con una resolución de 0,0001 g. Esta muestra se calentó por 4 horas a 105°C en estufa cerrada herméticamente, hasta que diera peso constante. Con este valor final y el del peso inicial de la muestra se calculó el porcentaje de humedad de la muestra con (3):

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso muestra inicial} - \text{Peso muestra final}}{\text{Peso muestra inicial}} \times 100 \quad (3)$$

Esta medición se realizó por triplicado y arrojó un porcentaje de humedad promedio del café de  $56,4 \pm 1,2$ .

## 2.4. Determinación de la huella de CO<sub>2</sub>

Con el ánimo de comparar el impacto ambiental del secado con deshumidificación por bomba de calor con secado mecánico de café usando combustibles, se determinó la huella de CO<sub>2</sub> generada por el equipo probado. Para determinar estas emisiones, se usó el factor de emisión sugerido por la UPME en el documento “Cálculo del factor de emisión de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico interconectado colombiano” Este resultado ha sido oficializado mediante la resolución número 180947 de junio 4 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía MME que resuelve en su artículo 1°: “Adoptar el Factor de Emisión correspondiente al año 2008, de 0,2849 kg CO<sub>2</sub> eq/KWh para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero para los proyectos de generación de energía eléctrica que se encuentran conectados al Sistema Interconectado Nacional”.

Las emisiones alcanzadas con el uso de energía eléctrica por la bomba de calor se compararon con las reportadas en trabajos anteriores usando secado mecánico con GLP y bioetanol, el cual fue realizado en el Trabajo de Investigación de Maestría en Gestión Energética Industrial de Gutiérrez [17].

## 3. Resultados

### 3.1. Comportamiento neumático del secador

Cómo se explicó en la sección anterior, el equipo de secado original corresponde a un secador de bandejas cuyo ventilador fue diseñado para proveer 12,5 m<sup>3</sup>/min. Estas condiciones fueron calculadas para una altura máxima de capa de grano de 75 cm, distribuidas en tres capas de 25 cm en cada bandeja. Con la incorporación del intercambiador de calor que constituye el deshumidificador con la bomba de calor, estas condiciones neumáticas presentaron variaciones que afectaron la eficiencia del secado. En la Figura 12 se presentan las curvas de presión estática y caudal del sistema de secado. Allí se puede ver que el deshumidificador impone una mayor caída de presión que la de las capas de café, aun cuando estas solo fueron de 15 cm de altura.

El cruce de la curva del sistema con la curva del ventilador se da aproximadamente a un caudal de 6,8 m<sup>3</sup>/min y 7,9 cm c.a. de presión estática, con lo cual se evidencia la disminución en el rendimiento neumático del suministro de aire de secado, esto es, el ventilador no alcanza su valor nominal de caudal (12,5 m<sup>3</sup>/min) con menos capa de grano. Incluso, con una carga inicial de 172 kg de café húmedo al 56,4% de humedad, se requerirían aproximadamente entre 7 y 7,5 m<sup>3</sup>/min para conservar una proporción adecuada entre aire de secado y café pergamino seco, la cual debe ser de 100 m<sup>3</sup>/min.ton.

La principal razón para explicar el comportamiento de la Figura 12 es la discrepancia entre las condiciones de diseño del ventilador del secador original y el secador modificado con el deshumidificador. Mientras que en el secador original, el ventilador está acoplado directamente al módulo de bandejas, en este proyecto se introdujo una carga adicional al flujo del aire, el cual debe atravesar los intercambiadores de calor serpenteados y aleteados que constituyen el evaporador y el condensador de la bomba de calor, lo cual impone una caída de presión que no fue prevista en la etapa de diseño del sistema de secado precedente. Adicionalmente, la evacuación del agua condensada en el evaporador de la bomba de calor requirió la manipulación constante de las válvulas de desagüe, lo cual impone una pérdida de aire adicional.

Teniendo en cuenta el caudal de aire en el punto de operación cercano de 6,8 m<sup>3</sup>/min, una presión estática de 7,9 cm c.a., una potencia de alimentación al motor de 110 V y una corriente medida en el motor de 8,2 A, la eficiencia neumática del sistema ventilación calculada con la Ecuación 1 tiene un valor de 11,6%. El ventilador para el sistema de secado original tuvo una eficiencia neumática de 62% [17], lo cual indica que la introducción del deshumidificador con bomba de calor modificó totalmente la fluidodinámica del suministro de aire de secado y aumentó la caída de presión.

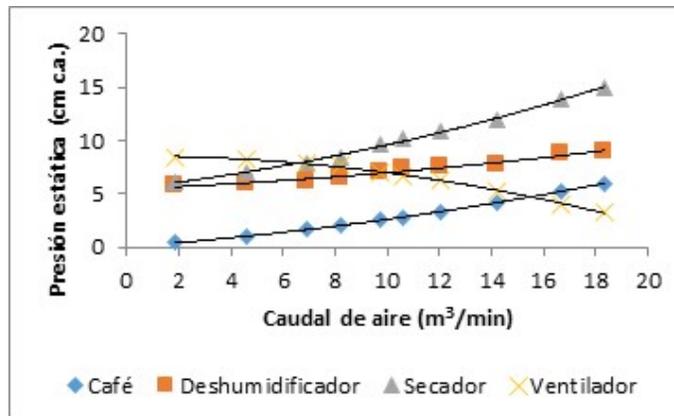


FIGURA 18. CURVA DE CARACTERIZACIÓN NEUMÁTICA DEL SECADOR CON DESHUMIDIFICACIÓN POR BOMBA DE CALOR

### 3.2. Caracterización del secado

En la Figura 19 se presentan las curvas de secado del café en cada una de las bandejas del módulo de secado. Como se esperaba, la bandeja inferior fue la primera en alcanzar el porcentaje de humedad objetivo de 11%, para lo cual el sistema tardó aproximadamente 35 horas. Una vez se retiró el café de esta bandeja, la bandeja 2 tardó 9 horas más y finalmente la bandeja superior alcanzó una humedad de 11,3% en un tiempo total de aproximadamente 51 horas.

La corriente eléctrica del ventilador y del compresor fueron 8,4 y 7,5 A, respectivamente, mientras que el factor de potencia para cada uno, determinado con analizador de redes fue 0,84 y 0,89. Con estos datos, en la Tabla 8 se presentan los resultados de la eficiencia de secado para cada una de las bandejas. Dicha eficiencia tuvo valores entre 32,6% para la bandeja inferior y 24,0% para la bandeja superior, calculados con (2). Estos valores son relativamente bajos, con la desventaja de tener tiempos de secado de hasta 51 horas, lo cual en la práctica es casi la mitad del tiempo que tardaría con secado solar en una época de intenso verano.

TABLA 8. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DE SECADO

Masa café húmedo inicial (kg)	Masa café húmedo final (kg)	Tiempo de secado (h)	Eficiencia de secado
53,8	26,5	35	32,6%
57,41	28,41	44	27,5%
57,59	28,31	51	24,0%

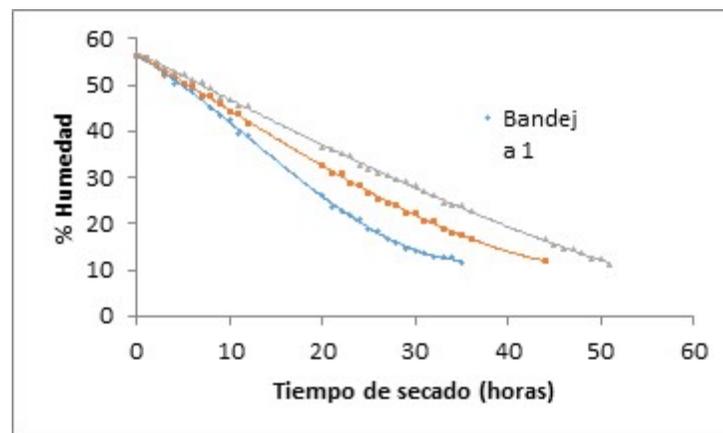


FIGURA 19. CURVAS DE SECADO

En el trabajo de Gutiérrez [17], se reportaron tiempos de secado entre 15 y 23 horas para la capacidad nominal del secador (125 kg cps) operando con GLP. Para esas condiciones, la temperatura del aire de secado a la entrada de la bandeja 1 se mantuvo alrededor de 49 °C, mientras que el deshumidificador con bomba de calor introdujo en el secador aire con temperaturas entre 35 y 38 °C, con humedades relativas entre 43 y 50%. Esta baja temperatura explica el largo tiempo de secado con la bomba de calor, mientras que la humedad relativa permaneció más alta que en secadores convencionales debido a la recirculación del aire del secador cargado de humedad. Aunque parte de esta humedad se retiró en el intercambiador del evaporador, la caída de presión impuesta al aire de secado no permitió un flujo adecuado a través de esa sección, con lo que se redujo la cantidad de agua condensada. Por otra parte, la temperatura máxima en el intercambiador del condensador de la bomba de calor fue 49,5 °C, como se muestra en la Figura 20. Esto explica por qué la temperatura del aire de secado no subió más de 38 °C. Cuando se intentó aumentar la temperatura del aire hasta 42 °C por medio de resistencias eléctricas, la presión del refrigerante en el condensador sobrepasó los 250 psi, lo cual constituye una condición riesgosa para la operación del compresor y por lo tanto no fue posible mantener el incremento en la temperatura.

El diseño del secador de bandejas también influyó en la calidad del secado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra una termografía del café en la bandeja 1 a las 3 horas de empezado el proceso de secado. Se puede ver que solo una parte de la bandeja se encuentra a temperaturas alrededor de 38 °C, mientras que hay zonas frías en menos de 30 °C. Esta estratificación se debe a que el aire suministrado por el ventilador entra por la parte inferior del módulo de secado, para lo cual debe hacer un cambio de dirección perpendicular que hace que la mayor parte del aire se dirija hacia la zona más alejada de la compuerta de entrada, creando así dos zonas a distinta temperatura.

Los resultados mostrados hasta este punto permiten establecer que hay una relación entre la eficiencia neumática del secador y la eficiencia de secado. La baja eficiencia neumática del ventilador hace que la caída de presión en el evaporador de la bomba de calor no permita una condensación adecuada de la humedad recirculada desde la cámara de secado, con lo cual no se aprovecha al

máximo una de las principales ventajas del secado con bomba de calor: la reducción simultánea de la humedad relativa y la humedad absoluta. Debido a esta reducción limitada de la humedad y la baja temperatura alcanzada en el condensador, el secado toma más tiempo que en el caso del secado mecánico con combustibles fósiles.

Otro hecho que debe tenerse en cuenta para explicar el bajo rendimiento de la bomba de calor para el secado radica en que este secado se basa principalmente en gradientes de humedad por la acción de deshumidificación de la bomba de calor en el evaporador y en el ligero calentamiento que se alcanza en el condensador. Los resultados muestran que este gradiente no es suficiente para alcanzar tiempos de secado competitivos con secado mecánico con combustibles y es necesario proveer una fuente de calor adicional, como, por ejemplo, la introducción de aire fresco al secador y/o el uso de concentradores solares.

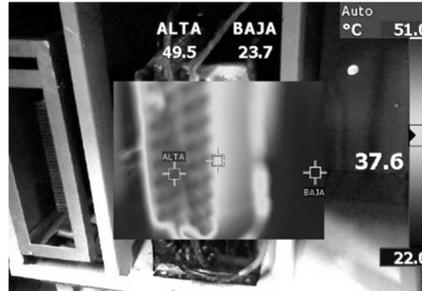


FIGURA 20. PERFIL DE TEMPERATURA EN EL CONDENSADOR DE LA BOMBA DE CALOR

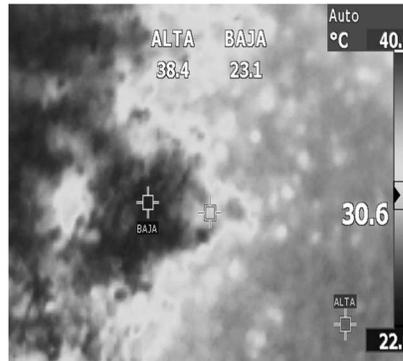


FIGURA 21. ESTRATIFICACIÓN DE TEMPERATURA EN LA BANDEJA 1

### 3.3. Análisis de emisiones de carbono del secado con bomba de calor

En teoría, la energía eléctrica obtenida a partir de generación hídrica no aporta emisiones de carbono, por lo que esta se considera una energía limpia y amigable con el ambiente. Sin embargo, no siempre la energía eléctrica disponible en la red nacional proviene de esta fuente y en ocasiones está combinada con la energía generada en plantas termoeléctricas. Es por eso que el Ministerio de Minas y Energía de Colombia publicó en 2010 la resolución 18-0947 en la que fija el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico interconectado colombiano. De acuerdo con este documento, cada kWh de energía eléctrica generado por este tipo de plantas en Colombia tiene una emisión de 0,2849 kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

Durante el proceso de secado de café con bomba de calor se tuvo un consumo de energía eléctrica total igual a 77,03 kWh correspondientes al consumo de energía en el ventilador para suministro de aire de secado y en el compresor de la bomba de calor. Este consumo eléctrico se calculó con la expresión indicada en el denominador de (2), para un tiempo total de 51 horas de secado. Con esta cantidad de energía se logró el secado de aproximadamente 79,3 kg de cps. Por lo tanto, con el secador desarrollado en este proyecto se tiene un consumo específico de 0,97 kWh/kg cps y al aplicar el factor definido por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, el índice de emisión de CO<sub>2</sub> para esta tecnología es de 276 kg CO<sub>2</sub>/ton cps. En el escenario de consumo de energía eléctrica producida por generación hidroeléctrica, este indicador se reduce casi a cero debido al bajo impacto de emisiones de gases de efecto invernadero de este tipo de generación.

En el trabajo de Gutiérrez [17], los factores de emisión de CO<sub>2</sub> para el secador operando con bioetanol y GLP fueron 5 y 158 kg CO<sub>2</sub>/ton cps, respectivamente. Estas emisiones más bajas se deben al origen renovable del bioetanol y a que el secado con GLP tardó máximo 23 horas en la bandeja superior, que es menos de la mitad del tiempo que se tardó con el deshumidificador con bomba de calor. Por lo tanto, para minimizar el impacto ambiental del secador con bomba de calor desarrollado en este proyecto, es necesario adecuar un ventilador a la demanda de caudal y caída de presión estática, de tal manera que se pueda reducir el tiempo de secado, al igual que proveer fuentes de calentamiento alternativas diferentes al condensador de la bomba de calor. Sin embargo, se aclara que el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> con la tecnología de deshumidificación por bomba de calor se hizo bajo el caso extremo de energía eléctrica generada por plantas termoeléctricas, lo cual, en condiciones climáticas normales, está alrededor del 30% de toda la energía

eléctrica generada en Colombia. En tal caso, un estimado de las emisiones de CO<sub>2</sub> más cercano al panorama de la generación de energía eléctrica en Colombia estaría cerca de 83 kg CO<sub>2</sub>/ton cps.

#### 4. Conclusiones

Con la incorporación del intercambiador de calor que constituye el deshumidificador con la bomba de calor, las condiciones neumáticas presentaron variaciones que afectaron la eficiencia del secado debido a que el deshumidificador impone una mayor caída de presión que la de las capas de café, aun cuando estas solo fueron de 15 cm de altura. Por tal razón, el ventilador no alcanzó su valor nominal de caudal (12,5 m<sup>3</sup>/min) con menos capa de grano y no se alcanzó una proporción adecuada entre aire de secado y café pergamino seco, la cual debe ser de 100 m<sup>3</sup>/min.ton.

La eficiencia neumática del sistema de secado con deshumidificación por bomba de calor tuvo un valor de 11,6%, mientras que para el mismo ventilador operando acoplado directamente al módulo de secado, la eficiencia neumática fue 62%, lo cual indica que la introducción del deshumidificador con bomba de calor modificó totalmente la fluidodinámica del suministro de aire de secado y aumentó la caída de presión.

La eficiencia de secado tuvo valores entre 32,6% para la bandeja inferior y 24,0% para la bandeja superior, los cuales son valores relativamente bajos, con la desventaja de tener tiempos de secado de hasta 51 horas, lo cual en la práctica es casi la mitad del tiempo que tardaría con secado solar en una época de intenso verano. Esta baja eficiencia está relacionada con el hecho de que en el evaporador de la bomba de calor no se alcanzaron temperaturas mayores a 38 °C y a que el caudal de aire de secado fue menor a 100 m<sup>3</sup>/min.ton cps.

El perfil de flujo a la entrada de la cámara de secado genera una estratificación de temperatura en las capas de café debido a que el aire que entra por la parte inferior del módulo de secado, hace un cambio de dirección perpendicular que hace que la mayor parte del aire se dirija hacia la zona más alejada de la compuerta de entrada. Esta estratificación deteriora la calidad del secado y hace necesario la adopción de mecanismos de homogenización de temperatura, bien sea por agitación del café o por distribución equitativa del flujo del aire de secado.

El secado con bomba de calor por deshumidificación, sólo empleando gradientes de humedad no es viable para reducir la humedad del café en corto tiempo, lo cual hace que este método no sea competitivo con el secado mecánico haciendo uso de combustibles. Se requiere por lo tanto proveer fuentes adicionales de calentamiento para aumentar la temperatura del aire se secado al mismo tiempo que se deshumidifica.

Bajo un escenario de energía eléctrica generada por termoeléctricas, el índice de emisión de CO<sub>2</sub> para el secado por deshumidificación con bomba de calor es de 276 kg CO<sub>2</sub>/ton cps, el cual resulta mayor al de secado mecánico con GLP debido al mayor tiempo de secado con la bomba de calor. En el escenario de consumo de energía eléctrica producida por generación hidroeléctrica, este indicador se reduce casi a cero debido al bajo impacto de emisiones de gases de efecto invernadero de este tipo de generación. En condiciones climáticas normales en Colombia, la generación termoeléctrica está alrededor del 30% de toda la energía eléctrica generada en Colombia, por lo que las emisiones de CO<sub>2</sub> con el dispositivo desarrollado estaría cerca de 83 kg CO<sub>2</sub>/ton cps.

#### 5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto Tecnológico Metropolitano, la Institución Universitaria Pascual Bravo y a la empresa Soluciones Energéticas y de Automatización por el apoyo brindado para la ejecución del proyecto P13108 “Secado mecánico de café con deshumidificación por bomba de calor”.

#### 6. Referencias

- [1] B. Buitrago, “Medición de humedad en línea en secado mecánico de café. Informe anual de actividades, Octubre de 2.007 a Septiembre de 2.008,” Chinchiná, Caldas, 2008.
- [2] J. M. Jurado, “Medición de humedad en línea para secado solar Gravimet. Informe Anual de Actividades, Octubre de 2.007 a Septiembre de 2.008,” Chinchiná, Caldas, 2008.
- [3] C. Oliveros, C. A. Ramírez, J. R. Sanz, and A. E. Peñuela, “Secador solar de túnel para café pergamino. Avance Técnico No.353,” Chinchiná, Caldas, 2006.
- [4] C. Oliveros, J. R. Sanz, C. A. Ramírez, and A. E. Peñuela, “Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. Avance Técnico No.380,” Chinchiná, Caldas, 2009.
- [5] C. A. González, “Control de temperatura y caudal de aire para optimización del secado mecánico de café,” Unversidad del Valle, 2008.
- [6] V. Minea, “Drying heat pumps – Part I: System integration,” *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 3, pp. 643–658, 2013.
- [7] Í. Ceylan and A. E. Gürel, “Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, pp. 899–905, 2016.
- [8] Z. Yang, Z. Zhu, and F. Zhao, “Simultaneous control of drying temperature and superheat for a closed-loop heat pump dryer,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 93, pp. 571–579, 2016.
- [9] Y. Qiu, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, X. Luo, and Q. Yu, “Performance and operation mode analysis of a heat

- recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 225–235, 2016.
- [10] M. Aktaş, S. Şevik, and B. Aktekel, “Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 113, pp. 82–94, 2016.
- [11] M. Yahya, A. Fudholi, H. Hafizh, and K. Sopian, “Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava,” *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 606–613, 2016.
- [12] A. Gungor, G. Tsatsaronis, H. Gunerhan, and A. Hepbasli, “Advanced exergoeconomic analysis of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 132–139, 2015.
- [13] S. Şevik, “Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products,” *Sol. Energy*, vol. 105, pp. 190–205, 2014.
- [14] S. Şevik, M. Aktaş, H. Doğan, and S. Koçak, “Mushroom drying with solar assisted heat pump system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 72, pp. 171–178, 2013.
- [15] K. Chapchaimoh, N. Poomsa-Ad, L. Wiset, and J. Morris, “Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 95, pp. 491–498, 2016.
- [16] V. Minea, “Drying heat pumps-Part II: Agro-food, biological and wood products,” *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 3, pp. 659–673, 2013.
- [17] J. Gutiérrez, “Desarrollo de un secador mecánico de café con empleo de alcohol carburante obtenido de los subproductos del proceso de beneficio húmedo,” Instituto Tecnológico Metropolitano, 2012.

## Evaluación de los Tiempos de Carga y Descarga de las Baterías del Vehículo Eléctrico Rizoma con un Sistema de Adquisición de Datos

### Evaluation of Charging and Discharging Times of the Rizoma Electric Vehicle Batteries with a Data Acquisition System

Jesús Adrian Santamaria-Giraldo <sup>a</sup>, Jose Alfredo Palacio <sup>b</sup>,  
José Alejandro Posada-Montoya <sup>c</sup> & Carlos Mario Serna-Zuluaga <sup>d</sup>

<sup>a,b,c,d</sup> Grupo de Investigación e Innovación Ambiental GIIAM  
Facultad de Ingeniería  
Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia.

[ja.santamaria@pascualbravo.edu.co](mailto:ja.santamaria@pascualbravo.edu.co), [josealpa@pascualbravo.edu.co](mailto:josealpa@pascualbravo.edu.co), [alejandro.posada@pascualbravo.edu.co](mailto:alejandro.posada@pascualbravo.edu.co),  
[c.serna@pascualbravo.edu.co](mailto:c.serna@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

La Institución Universitaria Pascual Bravo diseñó y construyó el Vehículo Solar Eléctrico Rizoma 0.1, el cual cuenta con dos sistemas de generación, como lo son el Kinetic Energy Recovery System (KERS) y la energía solar fotovoltaica. Un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) fue implementado para medir y registrar el voltaje y corriente de las baterías y del panel durante la carga y la descarga. También se realizaron mediciones con una pinza amperimétrica para verificar las mediciones del SAD. El tiempo de descarga de las baterías con el motor a máxima potencia operando en vacío sin la carga de mover las llantas o el vehículo es de 7 horas pasando de 78V a 55V. La corriente durante la descarga es de aproximadamente 6A. El KERS genera impulsos de corriente durante la desaceleración del rotor cuando se pasa el selector de avance de adelante a neutro, los cuales cargan las baterías. El panel solar puede cargar las baterías en 53 horas. Las baterías son cargadas con la red eléctrica en 2 horas, 54 minutos; primero a 15A durante 60 minutos y luego bajando la corriente exponencialmente a 2 A.

**Palabras claves:** Vehículo Solar Eléctrico, Sistema de Adquisición de Datos, Arduino, Sistema de Recuperación de Energía Cinética.

## Abstract

The Pascual Bravo University Institution designed and built the electric solar vehicle Rizoma 0.1, this vehicle has two energy generation systems, the Kinetic Energy Recovery System (KERS) and the photovoltaic solar energy. A data acquisition system (DAQ) was implemented to measure and to register the voltage and current of the batteries and the panel during the charging and discharging. Also, a current clamp was used to verify the DAQ measurements. The batteries' discharging time with the motor at maximum power operating without the load of the rims or vehicle weight is of seven hours passing from 78V to 55V. The discharging current is approximately 6A. The KERS generate current pulses during the decelerating of rotor when the selector is switched from forward to neutral, this pulses charges the batteries. The solar panel can charge the batteries in 53 hours. The batteries are charging with the electrical grid in 2 hours, 54 minutes, first at 15A during 60 minutes and then the current decays exponentially at 2A.

**Keywords:** Electric Solar Vehicle, Data Acquisition System, Arduino, Kinetic Energy Recovery System.

## 1. Introducción

Actualmente el planeta está ante un grave problema de emisiones de CO<sub>2</sub> generadoras del cambio climático y de partículas cancerígenas de la combustión de combustibles fósiles. En Medellín los niveles PM 2.5 se han elevado hasta 160 µg/m<sup>3</sup>, superando ampliamente el límite de 25 µg/m<sup>3</sup> recomendado por la OMS [1]. Los vehículos eléctricos se presentan como la mejor solución a estos problemas.

Estos vienen desarrollándose desde hace mucho tiempo, pero su desarrollo fue desplazado por los vehículos de combustión interna. Los cuales, a pesar de ser más contaminantes y menos eficientes, presentan niveles de autonomía muy superiores y un tiempo de recarga mucho menor.

Algunos vehículos solares eléctricos experimentales han alcanzado autonomías de incluso 500 km mediante el uso de baterías de litio-ion [2]. Sin embargo, la mayoría de estos vehículos tienen un elevado tiempo de recarga, bajo nivel de autonomía y alto costo. La Institución Universitaria Pascual Bravo diseñó y construyó un vehículo solar eléctrico que fuera asequible y sirviera como plataforma para que los estudiantes aprendieran, investigaran y desarrollaran nuevas tecnologías de movilidad sostenible (FIGURA 1).



FIGURA 1. VEHÍCULO SOLAR-ELÉCTRICO RIZOMA 0.1 DISEÑADO Y CONSTRUIDO EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

Para mejorar la autonomía de estos vehículos se debe analizar más a fondo su funcionamiento y su consumo energético.

El vehículo solar eléctrico Rizoma 0.1 ofrece la posibilidad de integrar dos sistemas de generación, como lo son el Kinetic Energy Recovery System (KERS) y la energía solar fotovoltaica. La combinación de estos dos sistemas de generación plantea muchas

preguntas que solo pueden ser resueltas estudiando el consumo energético del vehículo, para poder establecer con exactitud el papel que desempeñan el KERS y el panel solar en los niveles de autonomía del vehículo.

KERS significa Sistema de Regeneración de Energía Cinética, y es un sistema que convierte la energía cinética de las llantas en energía eléctrica. Existen varios tipos de KERS pero en este caso se cuenta con un KERS eléctrico. El cual consiste en un motor eléctrico que hace las veces de generador. Cuando se desacelera el rotor continúa girando por inercia y parte de esta energía es suministrada a las baterías.

Mediante la implementación de un SAD se puede registrar y graficar de manera precisa el consumo energético del vehículo e implementar mejoras que ayuden a reducirlo. La adquisición y el análisis de datos están claramente ligados al desarrollo experimental de la ciencia [3]. Actualmente existen sistemas que permiten integrar diversos recursos para controlar y monitorear diferentes variables de un proceso, los cuales se conocen genéricamente como SAD [4]. Los SAD ofrecen la posibilidad de estudiar el comportamiento de las variables involucradas en un proceso, esto permite crear un registro preciso de los valores que toman las variables en un instante de tiempo dado. Esto hace de los SAD una herramienta muy poderosa usada en diversas áreas y con múltiples propósitos.

Los SAD se componen de diferentes etapas. En la primera se requiere determinar las variables del proceso que contienen la información requerida para el análisis y el tipo de transductores adecuados. La segunda etapa requiere el acondicionamiento de estas variables, con el propósito de convertirlas en señales eléctricas que se adecúen a las especificaciones del SAD. La tercera etapa hace uso de las señales adquiridas, las cuantifica y las convierte en un código digital equivalente para enviarlas a un ordenador mediante un protocolo de comunicación. La cuarta y última etapa consiste en la utilización de un software especializado, con el fin de procesar los datos equivalentes a las variables registradas para su manipulación, de acuerdo con la aplicación específica del SAD [5].

Para la implementación de un SAD se debe contar con un hardware que digitalice y cuantifique las señales capturadas. Generalmente se emplean tarjetas de adquisición de datos comerciales que cumplen ampliamente con las necesidades de los SAD [5]. Sin embargo, suelen ser costosos y poco asequibles. Por esta razón, muchas veces se usan dispositivos más económicos y fáciles de usar que puedan cumplir las mismas funciones que una tarjeta de adquisición de datos comercial, más concretamente, un Arduino UNO.

Arduino es una plataforma de prototipos de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino son capaces de leer una gran cantidad de entradas y convertirlas en una amplia cantidad de salidas, además pueden operar de manera independiente y guardar los datos medidos en una tarjeta de memoria. Se pueden programar para múltiples propósitos, para ello se utiliza el lenguaje de programación de Arduino (basado en Wiring), y el software de Arduino (IDE), basado en Processing [6], [7].

## 2. Materiales y Métodos

El SAD implementado en el vehículo solar consta principalmente de los siguientes elementos: un computador, una placa Arduino uno, un shield con microSD para Arduino y dos sensores de corriente.

Los planos eléctricos del SAD durante el proceso de descarga en vacío, durante el proceso de carga con la red eléctrica y durante el proceso de carga por medio del panel solar se muestran en las figuras **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, respectivamente.

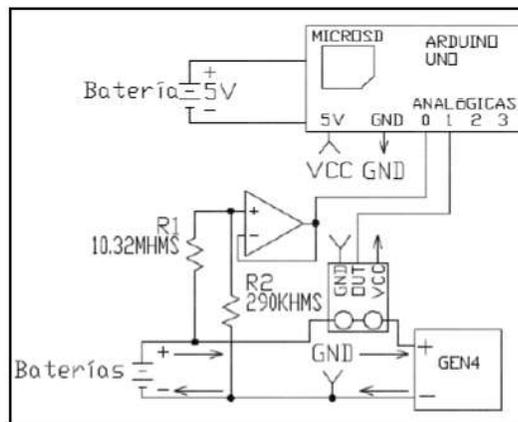


FIGURA 2. ESQUEMA DE MEDICIÓN DE DESCARGA.

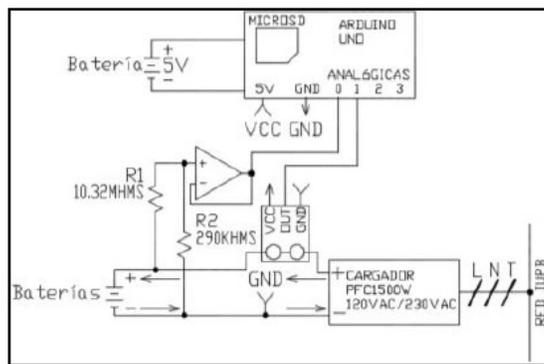


FIGURA 3. ESQUEMA DE MEDICIÓN DE CARGA CON LA RED ELÉCTRICA.

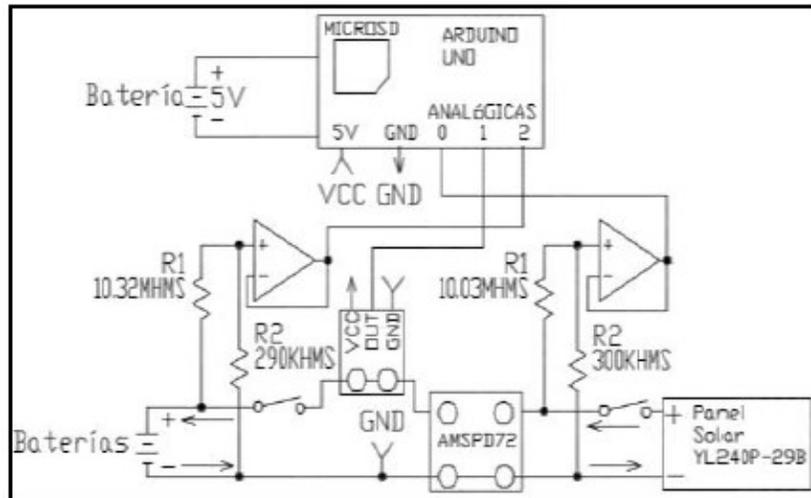


FIGURA 4. ESQUEMA DE MEDICIÓN DE CARGA CON EL PANEL SOLAR

Como se puede apreciar, el SAD mide el consumo de energía a la salida de las baterías. La función de las resistencias y del trimer es disminuir el voltaje nominal de las baterías (77.6V) al máximo voltaje que puede registrar el Arduino (5V).

El amplificador operacional sirve de puente entre los 3.7V que entregan las resistencias y los 3.7V que recibe el Arduino. El sensor de corriente se coloca en serie con la tierra de las baterías, y la tierra de las baterías se conecta con la tierra del Arduino. El programa se transfiere al Arduino mediante el cable USB tipo AB, y luego el Arduino lo compila y lo ejecuta indefinidamente mientras se encuentre energizado.

El Arduino lee los datos en las entradas análogas (0 y 1 en el caso de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). A estas entradas llega un valor de voltaje entre 0 y 5 voltios, el Arduino lo registra y mediante una serie de operaciones matemáticas convierte los valores de voltaje analógicos en los valores reales de medición y posteriormente los guarda en la microSD. Esta lectura es realizada cada 50 milésimas de segundo, y en cada lectura de datos registra una línea de texto con el siguiente formato:

Año/mes/día, hora: minutos: segundos, Voltaje, Corriente sensor 1  
2015/11/6,10:3:9, V=77.60, C=-3.17

Este intervalo de tiempo tan corto permite obtener entre 8 y 9 líneas de texto por segundo, lo cual resulta muy útil para estudiar todas las variaciones del voltaje y la corriente a lo largo de la medición.

Mediante el uso de este SAD se logró registrar el comportamiento del voltaje y la corriente, tanto en el proceso de descarga de las baterías, como en el proceso de carga de las mismas. Inicialmente las baterías tenían un estado de carga del 60% cuando se realizaron las primeras cargas con la red y con el panel solar, luego de que estuvieran cargadas al 100%, se realizó el proceso de descarga en vacío y a máxima potencia del motor. La descarga se realizó en intervalos de 20 a 30 minutos con el fin de proteger el motor del sobrecalentamiento. El tiempo total de medición fue de 7 horas y 6 minutos.

Luego se conectaron las baterías al panel solar y se realizó la medición de forma continua hasta que las baterías estuvieran cargadas al 100%, esta última medición, se realizó de forma manual con el objetivo de medir el voltaje de circuito abierto de las baterías durante todo el proceso de carga. Esta medición duró 53 horas y 15 minutos.

Paralelamente al proceso de medición con el SAD, se realizaron mediciones con el multímetro y la pinza amperimétrica, con el fin de medir voltaje y corriente respectivamente y verificar la veracidad de los datos registrados por el SAD.

### 3. Resultados y Discusión

El voltaje y la corriente, medidos durante las primeras cargas con la red y el panel solar se pueden observar en las figuras FIGURA 5 y FIGURA 6, respectivamente.

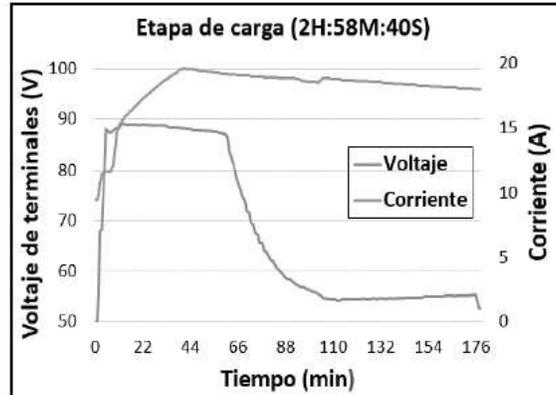


FIGURA 5. GRÁFICA DE CARGA CON LA RED

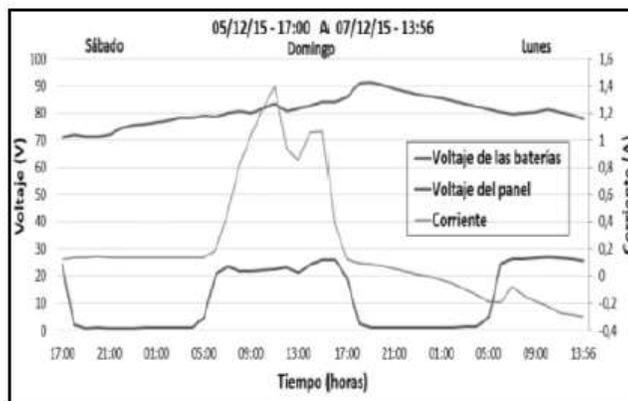


FIGURA 6. GRÁFICA DE CARGA CON EL PANEL SOLAR.

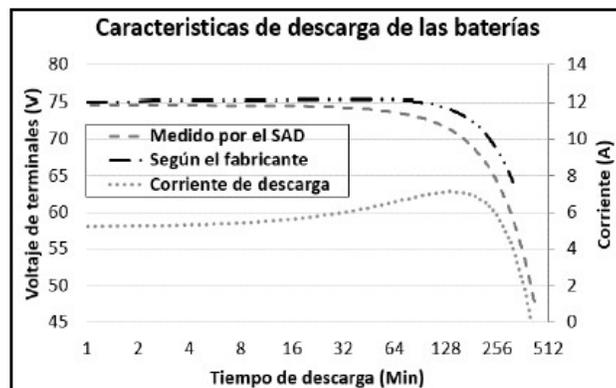


FIGURA 7. GRÁFICA DE DESCARGA PROFUNDA

Por último, en la FIGURA 8 se puede apreciar el voltaje de circuito abierto de las baterías durante todo el tiempo de carga con el panel solar.

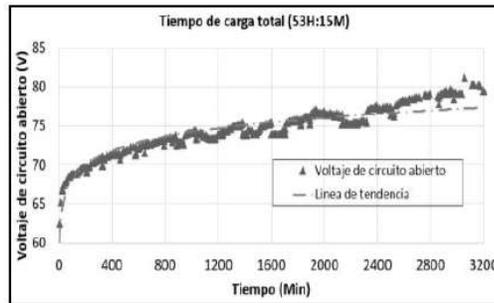


FIGURA 8. GRÁFICA DE CARGA CON EL PANEL SOLAR.

#### 4. Conclusiones

De acuerdo con las gráficas de las figuras FIGURA 5 y FIGURA 6, el panel solar se tarda casi dos días en suministrar el mismo porcentaje de carga que suministra el cargador eléctrico en 3 horas. Además, se ve claramente la influencia del sol en la cantidad de corriente generada por el panel, puesto que los valores más altos se obtienen en las horas más centrales del día.

Por otro lado, en la FIGURA 7, se puede ver como las baterías pueden suministrar un buen nivel de corriente durante las primeras cuatro horas y media de descarga. Sin embargo, después de este tiempo, el nivel de corriente decae y se mantiene cercano a los 2 amperios durante las 2 horas y media restantes, hasta que finalmente la corriente es tan baja, que el motor deja de girar. Al igual que la corriente, el voltaje también se ve afectado durante el proceso de descarga, a diferencia de la corriente (la cual se mantiene “constante”) el voltaje decae a lo largo de todo el proceso de descarga. Solo que esta caída se hace más pronunciada cuando el voltaje está por debajo de los 70V.

Por último, se puede apreciar un comportamiento muy interesante en la FIGURA 8, el cual parece como si se hiciera retroceder la gráfica de descarga. Es decir, durante la descarga el voltaje empieza a decaer muy lentamente para luego caer en picada cuando las baterías están por descargarse, mientras que, durante la carga, el voltaje aumenta rápidamente al inicio de la carga para luego aumentar más lentamente a medida que las baterías alcanzan su carga máxima.

#### 5. Agradecimientos

Al Semillero de Investigación Ambiental (SIA), el Grupo de Investigación e Innovación Ambiental (GIIAM) y a la Dirección Operativa de Investigaciones (DOI) de la Institución Universitaria Pascual Bravo por su apoyo en la realización de este proyecto de investigación. Este artículo y la ponencia hacen parte del proyecto de investigación: “Vehículo Solar-Eléctrico en Estructura de Guadua”.

#### 6. Referencias

- [1] El Colombiano, “Así se ve la contaminación en medellín,” <http://www.elcolombiano.com/antioquia/asi-se-ve-la-contaminacion-en-medellin-BJ3856461>.
- [2] J. F. Cesareo Aviles, J. Mendoza Sanchez, and M. Paniagua Torres, “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE AUTO SOLAR,” Xalapa, 2010.
- [3] C. A. U. D. A. Vera, F. U. D. A. Lopez, L. U. D. A. Rayes, and J. U. D. A. Tobon, “INTERFAZ PARA ADQUISICION DE DATOS IMPLEMENTADA EN MATLAB,” *Rev. Colomb. Fis.*, vol. 37, no. 1, pp. 61–65, 2005.
- [4] J. E. Osorio, J. D. Pérez Ramírez, and M. A. Rodríguez Barrera, “Implementación de un sistema de adquisición de datos para monitorear una máquina de corriente directa,” 2010.
- [5] C. Antonio, *Instrumentación industrial*, vol. 1, no. 9. 2010.
- [6] Arduino, “Introduction: What is Arduino?,” <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>, 2016.
- [7] A. R. De Souza, A. C. Paixão, D. D. Uzêda, M. a. Dias, S. Duarte, and H. S. De Amorim, “A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC,” *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 33, no. 1, pp. 01–05, 2011.

# Sistemas Expertos para Atender las Fallas Mecánicas en un Sistema de Transporte por Cable Aéreo.

## Expert prototype system to assist in the determination of mechanical operational failures in aerial cable-car transport systems

*Tabares Ospina Hector*  
Profesor I.U. Pascual Bravo  
[h.tabares@pscualbravo.edu.co](mailto:h.tabares@pscualbravo.edu.co)

*González Rojo Alexander*  
Operador de Mantenimiento  
Metro de Medellín, Ltda.  
Medellín-Colombia  
[rojo535@yahoo.es](mailto:rojo535@yahoo.es)

### Resumen

La determinación de la solución de fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo requiere un rápido tratamiento, si lo que se pretende es no afectar su operación en la movilidad y conectividad urbana y cumplimiento del servicio. Estas fallas no generan alarmas ni se visualizan en los módulos de control por cuanto no existen sensores de bajo costo para su detección, por lo que su localización hace parte de las labores de inspección diarias que hace el personal operativo y de mantenimiento.

Se presenta en este artículo el listado de reglas que asiste del operador de cable para atender las fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable y facilitar la toma de decisiones conducentes a resolver la ocurrencia.

Las reglas modelan el conocimiento específico del personal de mantenimiento de cable aéreo, mediante relaciones entre las variables evidenciables y objetivo.

**Palabras claves:** Sistema experto, fallas operativas mecánicas, sistema de transporte por cable aéreo.

### Abstract

The determination of mechanical operational failures in aerial cable-car transport systems requires a swift response, especially if the intended result is not to adversely affect the operational mobility and connectivity in urban areas that depend on the reliability of the service. These failures do not generate alarms nor are they displayed in the control modules because there are no low-cost sensors for detection. As a result, their detection is part of the daily inspection tasks that maintenance workers perform.

This paper will present the list of rules that acts as an assistant to the maintenance operator. Its purpose is to assist in determining the mechanical operational failures in aerial cable-car systems and facilitate the decision-making process in resolving the issue. The proposed system is based on the same knowledge that a cable-car maintenance worker possesses, derived from the relationships among the objective and visible variables.

**Keywords:** Expert system, mechanical operational failures, aerial transport cable-car system.

## 1. Introducción

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en determinar una base de reglas que actúa como asistente del personal de mantenimiento, para atender las fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo, caso en particular, el Metrocable de la ciudad de Medellín. Este trabajo es un subproducto del proyecto de investigación "Nuevas funcionalidades de un PLC para hacer gestión activa de cargas", realizado en la INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO (IUPB), Medellín, Colombia.

El artículo comienza tratando el sistema de transporte por telecabina, Metrocable, continua con el estado de la técnica relacionado con los procedimientos para atender las fallas operativas mecánicas en el Metrocable y el estado del arte sobre el asunto. A continuación, se presenta la metodología utilizada para la determinación de la base de reglas relacionadas con las fallas mecánicas. Finaliza, presentando las principales conclusiones del trabajo investigativo.

### *Sistema de transporte por telecabina*

Un detallado estudio sobre los sistemas de transporte por telecabina esta más allá del ámbito de esta unidad. En [1, 2], se ofrece una completa información con referencias específicas. Se presenta a continuación un resumen sobre los principales aspectos relacionados con el tema.

Se indica en [3], que los sistemas de transporte por telecabina se han utilizado principalmente en las zonas turísticas. Sin embargo, en los últimos años, estos sistemas también se han empezado a utilizar en áreas urbanas densamente pobladas.

El sistema de transporte por telecable de la ciudad de Medellín, denominado Metrocable, está concebido como el primer sistema por cable aéreo en el mundo, conectado a un sistema de transporte masivo tipo Metro y se presenta como una opción limpia y sostenible de desarrollo.

El Metrocable cuenta con 4 estaciones y 90 telecabinas desenganchables con capacidad para ocho pasajeros, y un tiempo de recorrido de 19 minutos para la vuelta completa de 2.072 metros. La estación motriz esta ubicada en la estación Acevedo del sistema Metro donde se encuentra el garaje, el puesto de mando del cable y la infraestructura de tracción eléctrica y de socorro. La estación Santo Domingo Savio, ubicada al final del trayecto del cable, es la destinada para el regreso de las cabinas, también llamada estación retorno. Las estaciones intermedias Andalucía y Popular están ubicadas entre la estación motriz y la estación retorno.

En total son 20 torres las que sostiene el cable por el que se desplazan las cabinas, a una velocidad promedio de 5 metros por segundo, lo que permite a los usuarios movilizarse desde la estación terminal de Santo Domingo Savio, hasta la estación Acevedo del Metro, en aproximadamente 8 minutos.

En caso de ausencia de energía el sistema se opera con un motor térmico (Diesel), el cual acciona motores hidráulicos que mueven la polea principal.

El sistema del Metrocable, (véase figura 1), opera alrededor de 19 horas por día, por consiguiente, los requisitos de mantenimiento del sistema son más altos que otros teleféricos, siendo necesario verificar las condiciones de operatividad, facilidad de mantenimiento y seguridad de los usuarios y el sistema en sí [5, 6].

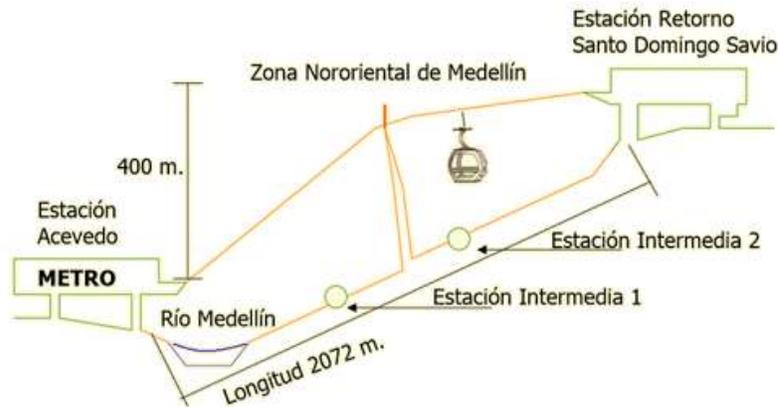


Figura 1. Estructura básica del Metrocable. Fuente [4]

La operación del Metrocable es supervizada desde el Puesto Central de Control, por el Supervisor de Operaciones y controlada desde el Puesto de Mando del Cable, por el Operador del Cable, mediante los tableros de control y equipos de comunicación.

El sistema de transporte es similar en diseño y construcción a las utilizadas para el transporte de pasajeros en las zonas turísticas de invierno en Donovaly-Eslovaquia, Daemyung-Corea, La Clusaz-Francia.

Las características técnicas del sistema se describen a continuación. (Véase la tabla 1).

Tabla 1. Características Técnicas

Característica	Detalle
Tipo de sistema	Monocable desenganchable
Sistema de tensión	Motriz fija
Energía	Eléctrica
Potencia del motor	920 Kw
Consumo energía/día	6.072 kWh
Longitud del trazado	2070m.
Desnivel	398.68 m
Pendiente promedio de la línea	20%
Velocidad línea	Hasta 5m/s
Numero de pilonas	20
Altura máxima de piona	33m
Ancho vía	5.7m
Capacidad de usuario	3000 usuarios/hora

Número de estaciones	4
Número de cabinas	93
Pasajeros por cabina	8 sentados
Distancia entre cabinas	60m
Frecuencia	12 seg (a 5 m)
Ciclo de operación	Continuo, 18 horas al día, 360 días al año.
Horario de operación	De lunes a sábado desde las 4:15h hasta las 23:30h. Domingos y festivos desde las 9:00h hasta las 22:30 h.
Fabricante	Empresa Pomagalski (Francia)

### *Estado de la técnica sobre fallos operativos mecánicos en el sistema Metrocable*

En [1, 2, 4], se ofrece una completa información sobre el asunto. Un recuento sobre los principales aspectos relacionados con el tema, se presenta a continuación.

Independientemente del fabricante (austriacos, franceses o italianos), tipo, modelo y tamaño, los sistemas de transporte de cables aéreos son tecnologías concebidas como un conjunto de sistemas electromecánicos que deben ser supervisados y monitoreados desde diferentes equipos de control automático con el fin de garantizar la integración de cada uno de ellos y su correcto funcionamiento. Las averías o fallas del sistema están clasificados en dos grandes grupos: averías operativas eléctricas y mecánicas. La primera, que genera alarmas en el sistema, esta relacionada con fallos o defectos detectados en el generador de impulsos, gálibos, CPU del PLC, motores, zonas de avance, pesaje de pinza, entre otras. Al respecto, el sistema cuenta con una pantalla “touch panel” que permite la visualización de las fallas. Dichos equipos están ubicados en todos los armarios de mando y control en todas las estaciones. Como lo relaciona el fabricante, las averías mecánicas tratan las fallas del sistema relacionadas con las llantas, correas, piñones, poleas, chumaceras, riel de circulación, y las partes propias de la cabina como son las ruedas de circulación, el patín de arrastre, rozadores y defecto en puertas.

No existe herramienta o dispositivo que automáticamente detecte fallas en las anteriores partes mecánicas, por lo que su localización hace parte de las labores de inspección diarias sugeridas por el fabricante, que hacen los operarios de mantenimiento, razón por la cual, este trabajo investigativo se justifica en la medida en que se desarrolle una aplicación del tipo sistema experto, que actúe como asistente del Personal de Operativo y de Mantenimiento, para atender las referidas fallas mecánicas del sistema.

En todos los casos, para abordar e identificar los defectos generados durante la operación comercial del Sistema, se hace necesario un conocimiento previo del mismo, de los eventos y de cómo se deben atender por parte de los Operadores de Cable (OPC), Operadores de Estación (OES) y Personal de Mantenimiento (PM), tratando de afectar lo menos posible la operación, es decir, que los tiempos de parada sean mínimos. Esto se logra conociendo el funcionamiento y la manipulación de los equipos, los elementos que intervienen en éstos y la buena interpretación de los defectos presentados en la operación, de esta manera se le brinda comodidad y rapidez a los usuarios en el desplazamiento en las cabinas.

#### *Antecedentes*

El sistema de transporte por telecabina de la ciudad de Medellín, Metrocable, es el primer sistema por cable aéreo en el mundo, conectado a un sistema de transporte masivo. Adicionalmente los requisitos de mantenimiento del sistema son más altos por cuanto no se trata de un teleférico de turismo sino de un sistema de transporte comercial que trabaja alrededor de 19 horas al día. Por otra parte, no existen dispositivos de bajo costo con los cuales sensar los indicadores de fallas de los sistemas mecánicos del Metrocable. Por consiguiente, la literatura presenta pocos estudios relacionados con el asunto. En el mejor de los casos, se trata de investigaciones realizadas a nivel local, y validados internacionalmente.

Con respecto al estado del arte y de la técnica, relacionadas con las fallas operativas mecánicas del sistema, se presenta a continuación un recuento. En [7], Quintero argumenta que los estudios sobre las tareas de mantenimiento de los sistemas de transporte por cable aéreo se han desarrollado en el campo de análisis dinámico, análisis de vibraciones, las simulaciones matemáticas, entre otros, pero todos ellos, básicamente centrado en temas de diseño más que los temas de mantenimiento.

Las tareas de mantenimiento actuales en el sistema Metrocable se realizan siguiendo las instrucciones del fabricante, pero debido a la naturaleza de la operación del sistema, el PM ha desarrollado otras rutinas de mantenimiento complementarias asociadas a la nueva dinámica de la operación de teleféricos.

Quintero presenta una metodología para el diseño e implementación de un sistema experto SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), para el sistema de transporte masivo Metro de Medellín. En este caso, el objetivo del desarrollo de un sistema experto SCADA se basa en la necesidad de preservar el conocimiento adquirido por el personal de mantenimiento. Básicamente, el SCADA utiliza la información en tiempo real de los sensores situados en la pinza desenganchable de las telecabinas, para el cumplimiento de

los requisitos de operatividad, facilidad de mantenimiento y seguridad del Metrocable. El sistema experto propuesto por los autores es un sistema SCADA tradicional combinado con un sistema experto basado en los sistemas de inferencia difusos [8].

Con el sistema experto SCADA propuesto, los autores modelaron las reglas de mantenimiento establecidas por el fabricante y el conocimiento de los Operadores de Mantenimiento, para estimar el comportamiento del sistema en términos de Mantenimiento Basado en Condición (CBM).

Así mismo, en la Revista Metro [1, 2] se informa que el Metro de Medellín en conjunto con la Universidad EAFIT y Colciencias, formalizó un convenio de investigación para desarrollar un sistema de diagnóstico para el sistema pinza-cable del Metrocable, que permitirá conocer el comportamiento dinámico de todas las variables del sistema, tales como alineación horizontal y vertical de las rampas de ingreso a las estaciones, alineación horizontal y vertical del cable portador-tractor, la velocidad de ingreso y salida de los vehículos en las estaciones, el comportamiento en la máxima y mínima apertura de la pinza, entre otras. Todo lo anterior con el fin de evaluar aspectos de seguridad, vida útil, condiciones de comodidad y estabilidad, y buscar así mejorar los tiempos de disponibilidad del sistema.

Otra investigación que adelanta el Metro de Medellín con la Universidad Eafit es la que tiene que ver con la dinámica de los cables aéreos. El convenio, que inició a mediados del 2011, tiene como objetivo identificar medidas de mantenimiento y de control adicionales a las que ya existen en el manual de cables de la Empresa, con el fin de garantizar el excelente funcionamiento de los cables existentes.

A la vez, el Área Operación de Cables Aéreos del Metrocable, consciente de la necesidad de garantizar que las intervenciones realizadas durante cada una de las rutinas de mantenimiento en los equipos y elementos de control se ejecuten de manera confiable y óptima, implementó un simulador de pruebas eléctricas y de manejo del "Touch Panel", que permite la verificación del estado de los componentes de los equipos electrónicos y de control sin intervención durante la operación del cable.

En [9] los investigadores diseñaron un sistema de inferencia difuso que incorpora los procedimientos de mantenimiento establecidos por el fabricante y por los operadores de mantenimiento que, con sus años de experiencia, han establecido otras rutinas, propias de las condiciones en las que opera el sistema Metrocable, y el concepto de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) para modelar los modos de fallo del sistema Metrocable. Como se indica en [10], el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) es una metodología o técnica de mantenimiento, también conocida como "Mantenimiento Predictivo", que se realiza con base en las condiciones o parámetros de los equipos, en los que se establecen algunos límites o ventanas operacionales y se verifica su comportamiento, mediante algunas tecnologías como: Análisis de Vibraciones, Termografía Infrarroja, Coronografía Ultravioleta, Alineación y Balanceo Dinámico.

En [11], los investigadores informan que los sistemas de transporte por telecabinas utilizan elementos estandarizados de producción, que no tienen en cuenta ciertas condiciones de las operaciones concretas (el diseño no discrimina entre un medio de transporte para los pasajeros de turismo y otros medios de transporte urbano con un funcionamiento continuo).

Sin embargo, las telecabinas comerciales son sensibles a las siguientes condiciones externas: (i) cargas y frecuencia de operación; (ii) las condiciones ambientales -vientos, temperatura, la humedad, corrosión, etc.; y (iii) la disponibilidad del sistema. Por esa razón, los investigadores evalúan el efecto de las condiciones comerciales de funcionamiento de las telecabinas, basado en mediciones obtenidas a partir de una disposición de sensores que registran el comportamiento conjunto de acoplamiento entre la cabina, las pinzas desengalchables y los cables de sujeción y tracción.

Finalmente se informa que el PM del Metrocable integran grupos de investigación de la INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, y han venido trabajando modelos computacionales usando SE como el expuesto en [12]. Para los propósitos de este trabajo investigativo, el artículo antes referido fue tomado y adaptado para la atención de fallas operativas mecánicas del Metrocable.

## 2. Metodología y procesos de desarrollo

Las fallas operativas mecánicas del sistema Metrocable, las tareas de mantenimiento que se realizan en el sistema siguiendo las instrucciones del fabricante, y la experiencia adquirida por el personal de mantenimiento desarrollando nuevas rutinas de vigilancia, llevó a pensar en determinar la base de reglas del tipo determinista, para que actúe como su asistente en las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.

La metodología abordada para la determinación de la base de reglas contempló las siguientes etapas:

Identificación del problema. En este caso, atender las fallas operativas mecánicas en un sistema de transporte por cable aéreo.

Selección de la variable objetivo y sus valores. El EDC definió como variable objetivo la atención de las soluciones de las fallas operativas mecánicas del sistema de transporte por cable aéreo, (véase tabla 2), sujetas a revisión periódica con el propósito de detectar sus modos de fallo.

La selección de las variables evidenciales y sus posibles valores. Sobre la base de conocimiento del EDC, se seleccionaron el conjunto de variables evidenciales relevantes. Cada parte mecánica del sistema de cable aéreo (véase tabla 2, llantas, correas, poleas, etc.) debe ser evaluado por distintos indicadores. Para el caso de las llantas, son: presión de aire, desgaste, tracción cabina. Todas las variables son de tipo booleano, asumiendo el valor de uno con el que se confirma el evento. El valor de cero, cuando no se presenta falla.

Diseño de las preguntas. El desarrollo del cuestionario es la parte más complicada y en general es una actividad iterativa. El proceso se puede comenzar identificando los indicadores de fallas, representadas en las variables evidenciales, presentes o no en los valores que asume la variable objetivo, estado de las partes mecánicas, identificada para el dominio del problema. En esta fase

intervinieron el IC y el EDC. La adquisición de la información relevante se obtuvo consultando con el EDC y el IC extrajo los principales indicadores de los diferentes tipos de fallas operativas mecánicas. Estos modos de falla provienen de la relación de los indicadores descritos por el fabricante y monitorizadas por el personal de mantenimiento y los diferentes defectos que pueden ocurrir en cada elemento. Con base a los rasgos identificados en el paso anterior, el IC y el EDC diseñan las reglas a evaluar y las preguntas a formular a los UF del sistema cuando interactúa con el subsistema de interfaz de usuario final. Véase en la tabla 2, las reglas a evaluar y las preguntas a formular al UF.

Tabla 2. Variables evidenciales o de entrada

Parte mecánica	Regla	Consecuente
Llantas	Falla presión de aire + Desgaste llanta + No Tracciona cabina.	Cambio de llantas
Correas	Desgaste Correas + Mal Estado Correas	Cambio correas
Correas	Falla tensión de Correas	Tensionar correa
Poleas	No Tracciona el eje de la polea	Cambio polea
Poleas	Desalineación + Desbalanceo de la polea	Se alinea polea
Chumacera	Falla Plato de sujeción de la chumacera	Cambio de plato
Chumacera	Falla Cuerpo de la Chumacera	Cambio de la chumacera
Chumacera	Falla Rodamiento de chumacera	Cambio de rodamientos de chumacera
Piñon	Fractura piñon + Desgaste piñon + Mal Estado piñon	Cambio de piñones
Riel de circulación	No Limpieza de riel de circulación	Limpiar la zona del riel afectado.
Cabina - Ruedas de circulación	Falla Rodamiento Cabina + Rueda Incompleta + Presencia de material	Cambio ruedas de circulación de la cabina
Cabina - Patin de arrastre	Patin desgastado + ausencia del patin de arrastre + ausencia de tornillos de sujeción	Cambio de patin

Se trata de una base de reglas especificada por el fabricante y nuevas rutinas desarrolladas por el PM, sobre las fallas operativas mecánicas del sistema.

La tabla 2 no presenta una clasificación completa de las fallas operativas mecánicas, sino que existen tantas clasificaciones como expertos en el tema, siendo todas válidas y muchas veces complementarias unas de otras.

### 3. Conclusiones

El objetivo de este trabajo consistió en determinar el listado de reglas relacionadas con las fallas operativas mecánicas en el sistema de transporte por cable aéreo.

El sistema propuesto modela datos históricos relacionados con las fallas operativas mecánicas, el conocimiento específico del fabricante o del personal de mantenimiento experto en el asunto, mediante relaciones entre conceptos explicitados en las variables evidenciables (indicadores de fallas), y las variables objetivas (solución de las fallas).

El listado de reglas permite obtener información sobre el tipo de fallas operativas mecánicas de acuerdo a los indicadores de desempeño.

Una segunda versión de este tema consiste en programar el listado de reglas en un sistema experto del tipo determinista titulado SE\_FOMCA\_IUPB que asesore las operaciones de mantenimiento mecánico del sistema.

### 4. Agradecimientos

Esta sección reconoce la ayuda de los señores profesores Oscar Botero, Julian Galeano, docentes titular de las asignaturas en Control Industrial y Bases de Datos respectivamente.

Se agradece a los revisores del artículo las constructivas sugerencias realizadas.

### 5. Referencias

- [1] Dominguez Cano, R. (abril 26 de 2016). *Operación y mantenimiento del sistema de cable aéreo en el Metro de Medellín*. Obtenido de <http://www.nxtbook.com/ml/MetroMedellin/MetroMedellinEnero2007/index.php?startid=65>
- [2] Marquez Ramirez, R. (abril 26 de 2016). *Tecnología Cable Aéreo. I+D+i: un distintivo METRO, un punto de referencia internacional*. Obtenido de <http://miaportemetro.com/revista/cable.htm>.
- [3] Hoffmann, K. (2006). *Recent developments in cable-drawn urban transport systems*. *FME Transactions*. Vol. 34. No. 4, p.p. 205-212.
- [4] Metro de Medellín. (abril 26 de 2016). *Ejemplo de intermodalidad. Sistema de transporte por cable aéreo integrado al Metro de Medellín*. Obtenido de [http://uprati.uprm.edu/interns/medellin/MetroCable\(PuertoRico\).pdf](http://uprati.uprm.edu/interns/medellin/MetroCable(PuertoRico).pdf)
- [5] Dávila, J., (2012). *Movilidad urbana y pobreza. Aprendizajes de Medellín y Soacha, Colombia*. The Development Planning Unit, UCL | Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- [6] Dale, S., Imhäuser, T., Chu, N., (2013), *Creative Urban Projects*. Creative Urban Projects Inc.
- [7] Quintero O., Castañeda L., Trujillo A. (2014), “*Design of a methodology for a SCADA expert system: massive transportation ropeway*”. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014, ResearchGate, p.p. 905-910.
- [8] Optin, T, (2007), Intelligent SCADA systems, Automation & Control Technical, EngineerIT.
- [9] Villa L., Quintero O., Castañeda L., Mejía G (2015), “*Fuzzy Inference System for Modelling Failure Modes in a Ropeway for Massive Transportation*”. International conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering. Atlantis Press, p.p. 113-116.
- [10] Copete P. (abril 26 de 2016). *Mantenimiento Basado en Condicion CBM*. Obtenido de [en:http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/soluciones/confiabilidad-operacional/cbm](http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/soluciones/confiabilidad-operacional/cbm)
- [11] Martinod R., Estepa D., Paris C., Pineda F, Restrepo J., Castañeda L., G. Mejía (2014), “*Operating conditions effect over the coupling strength for urban aerial ropeways*”. Transport problems. Vol. 9, Ed. 3, p.p. 5-14.
- [12] Primorac, C., Mariño, S. (abril 26 de 2016) “*Un sistema experto para asistir decisiones turísticas. Diseño de un prototipo basado en la web*”. Revista de investigación en turismo y desarrollo local. vol. 4, No 10. Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/turydes/10/pm.pdf>.
- [13] International Standard ISO (ISO 13379-1:2012 (E)), Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques – Part 1: General guidelines.

# Evaluación Energético-Ambiental de la Utilización de Iluminación LED en el Sector Residencial Colombiano

## Analysis of the massive introduction of LED lighting in the residential sector Colombian

Jauder Alexander Ocampo Toro  
Docente ocasional, IU Pascual Bravo  
[jauder.ocampo@pascualbravo.edu.co](mailto:jauder.ocampo@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

Este trabajo hace una evaluación del potencial de ahorro energético y económico del cambio masivo de tecnologías de iluminación tradicional por tecnología LED en el sector residencial de Colombia. También se hace un estimado del impacto ambiental favorable debido al cambio de iluminación, y se describen las posibles barreras que se tendrían para su implementación. Los resultados del trabajo van orientados a reconocer a los sistemas LED como la mejor alternativa de iluminación hacia el futuro, ya que, con el remplazo de las actuales tecnologías de iluminación en los hogares de Colombia, se podrían tener ahorros de más de 6700 GWh/año, equivalente a más del 70% de la electricidad destinada a iluminación, y al 13% del consumo total de electricidad del sector residencial colombiano.

**Palabras claves:** Ahorro de energía en iluminación, Iluminación LED, Iluminación residencial.

### Abstract

This paper assesses the potential energy and cost savings of massive change traditional lighting technologies for LED technology in the residential sector of Colombia. An estimate of the positive environmental impact due to changing lighting is also made, and possible barriers that would have to be implemented are described. The results of work are aimed to recognize the systems as the best LED lighting alternative to the future, since the replacement of existing lighting technologies in households in Colombia, could have savings of more than 6700 GWh/year, equivalent to over 70% of electricity for lighting, and 13% of the total electricity consumption of the colombian residential sector.

**Keywords:** Energy savings in lighting; LED lighting; Residential Lighting.

## 1. Introducción

La iluminación representa el 19% del consumo mundial de EE (Energía Eléctrica) [1] y es uno de los principales renglones de potencial de ahorro energético, debido a que se pueden implementar acciones a corto y mediano plazo. El consumo mundial de energía primaria para abastecer la iluminación es de 650 Mtep e implica emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) de una escala igualmente impresionante: 1900 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año [1]. En el sector residencial, hay una percepción común de que los costos de energía de la iluminación son bajos. Cualquier lámpara individual tiene un impacto mínimo, pero en conjunto, y en particular en el nivel de ciudades y países, el impacto es muy grande. En este sentido, la iluminación es un estudio de caso en el problema más amplio de la eficiencia energética [1].

En Colombia, la proyección hecha para el 2020 por el Plan Energético Nacional muestra que los sectores de mayor atención por su participación en el consumo de EE, serán en su orden el residencial con el 40 % y el industrial con el 38% del total [2]. Solo en el consumo de EE para iluminación el sector residencial tiene una participación del 43%, el industrial del 31 %, y los demás suman el 26% restante [3]. Es por esto que el reemplazo de lámparas ineficientes ocupa el segundo lugar en importancia, después del cambio de las tecnologías de refrigeración, como fuente potencial de ahorro de EE en el sector residencial [4] [5]. Su efecto es casi inmediato sobre la reducción de la demanda si se logran mantener los hábitos de compra, cosa que no sucede con otros equipos domésticos.

Varios estudios realizados en diferentes países coinciden en que las mayores reducciones del consumo de electricidad, mediante tecnologías eficientes, se pueden lograr en el sector residencial, y que la mayor parte de esta reducción se puede lograr mediante la sustitución de lámparas incandescentes con fuentes de luz de bajo consumo [6]. También hay ejemplos de aplicación de programas y políticas de iluminación eficiente: *Green Lights* y *Energy Star* en los EEUU, *PELP* en Polonia, *Best Practice* en el Reino Unido e *ILUMEX* en México [5]. El LED (*Light Emitting Diode*) es llamado la fuente de luz de cuarta generación [7]. Comparado con otras fuentes de luz blanca, la tecnología LED, puede llegar al doble de mejoras técnicas [8], consumen menos energía, tienen una alta eficiencia energética y vida útil mucho mayor, entre otras ventajas [8] [9] [10]. El LED puede producir cualquier patrón de luz, lo que le permite no sólo competir con los productos tradicionales de iluminación, sino también la creación de nuevos productos y mercados [11] [12].

## 2. Potencial de ahorro energético y económico

En el año 2007, el Ministerio de Minas y Energía, MME, patrocinó un plan piloto para hacer mediciones sobre la red eléctrica del municipio de Usiacurí, Atlántico [13]. Allí se realizó la sustitución de bombillas incandescentes por CFL (*Compact Fluorescent Lamp*) en aproximadamente el 93,5% de su población. De los resultados se destacan una reducción del 15% en el pico de potencia y del 10 % en la energía activa, así como el ahorro de \$80000 al año en la factura de energía por familia [13].

También se realizó una simulación en software para evaluar el comportamiento del sistema de potencia del país en el caso de un uso masivo de CFL, y los resultados fueron contrastados con las mediciones del plan piloto de Usiacurí, con lo que se concluyó que el país ahorraría el consumo de unos 600 MW de EE por año, que representan lo que produce una central que cuesta unos 800 millones de dólares [13].

En los programas nacionales de URE (Uso Racional de Energía) se dictan políticas que obligan al recambio de bombillas incandescentes por CFL (decretos 2331 y 2501 de 2007). Sin embargo, hoy en día las lámparas LED han alcanzado el nivel iluminación suficiente para reemplazar ambas tecnologías con un mayor rendimiento energético. El trabajo que dio origen a este artículo se realizó para estimar el potencial de ahorro en el sector residencial de Colombia, con la utilización masiva iluminación LED en vez de las tecnologías tradicionales.

Según los balances energéticos de la UPME, la iluminación representa en promedio el 16,1% del consumo de EE residencial y el 6,8% del total del consumo total de EE en Colombia [5]. Para el 2012 el consumo de EE residencial fue de 16251 GWh, equivalente al 45,5% del consumo total de EE [14]. Del estudio de la Universidad Nacional de Colombia en 2006, se calculó que las CFL alcanzan un 26% de las lámparas en los hogares, y que en promedio el número de bombillas incandescentes de 100W es igual al número de incandescentes de 60W [4]. Esta tendencia de hábitos de consumo y utilización de tecnologías parece mantenerse, ya que según los datos del SUI del balance energético, la proporción de consumo residencial al consumo total de electricidad se ha mantenido casi constante en los últimos 8 años.

En Colombia se ofertan lámparas LED de diferentes marcas para reemplazar directamente en accesorios de bombillas incandescentes y CFL. Con los datos promedio consultados a varios proveedores y en ensayos técnicos, y priorizando el flujo luminoso y la familiaridad de la forma de la lámpara para el usuario, se establecieron las equivalencias de la Tabla 1, para bombillas incandescentes de 60 W y de 100 W; Así, por ejemplo, para garantizar la misma cantidad de iluminación que una incandescentes de 60 W, se debe reemplazar por una CFL de 15 W o una lámpara LED de 8 W. Si se consideran 15000 h (la menor vida útil de las bombillas LED reportada en la Tabla 1), suponiendo 4 horas/día de utilización, una lámpara LED debería cambiarse cada 10 años, mientras que en ese mismo tiempo se requerirían 2 CFL o 14 incandescentes.

TABLA 1. EQUIVALENCIA DE LÁMPARAS INCANDESCENTES DE 60 W Y 100 W CON LÁMPARAS CFL Y LED

Tipo de bombilla	Potencia (W)	Eficacia (lm/W)	Flujo luminoso (lm)	Vida útil (h)	Precio (\$)
Incandescente	60	780	13	800-1000	1000
CLF	15	750-825	50-55	6000-8000	10000
LED	8	640-720	80-90	15000-30000	16000
Incandescente	100	1300	13	800-1000	1000
CLF	25	1250-1375	50-55	6000-8000	11000
LED	13	1040-1170	80-90	15000-30000	22000

Fuente: Construcción propia.

A partir de esto, para hacer una evaluación energética y económica, se plantearon 3 escenarios de sustitución a 10 años sobre la situación actual (sin sustitución): 74% lámparas incandescentes y 26% CFL.

- **Escenario 1:** incandescentes por CFL (100% CFL).
- **Escenario 2:** incandescentes por LED (74% LED y 26% CFL).
- **Escenario 3:** incandescentes y CFL por LED (100% LED).

Para calcular los costos anuales de las lámparas y de las tarifas de EE, se estimó un crecimiento del 3,7% según el promedio del IPC (Índice de productos al consumidor) para Colombia en los últimos 5 años (tomados del SUI).

La Tabla 2 muestra los resultados si continuara la situación actual y la Tabla 3 muestra los consumos de EE y costos asociados en cada uno de los 3 escenarios propuestos. Si bien es probable que el 100% de lámparas incandescentes no sea reemplazado con iluminación LED, la evaluación que se presenta busca cuantificar el potencial de reemplazo y el alcance en términos de ahorro esperable.

Comparando los totales de consumo de EE y de costos de cada uno de los escenarios de sustitución, son evidentes los altos porcentajes de ahorro que se pueden obtener. En la Figuras 1 y 2 se observan el potencial total de ahorro de EE y en costos respectivamente.

TABLA 2. DATOS BASE POR HOGAR Y ESTIMACIÓN DE CONSUMOS DE EE Y DE COSTOS SIN SUSTITUCIÓN (74% INCANDESCENTES Y 26% DE CFL) EN 10 AÑOS.

Tipo de usuarios	Número de viviendas (miles)	Datos promedio por vivienda			Estimado para 10 años			
		Bombilla incandescent es usadas	Bombillas CFL usadas	Tarifa promedio (\$/kWh)	Bombillas necesarias por vivienda		Total viviendas	
					Incandescente	CFL	Consumo EE (TWh)	Costo Total (billones \$)
Estrato 1	3180,4	5	1	409,1	73	2	19,4	9,8
Estrato 2	4544,3	7	1	406,5	102	2	38,4	19,1
Estrato 3	2655,0	7	2	408,3	102	4	23,2	11,7
Estrato 4	862,9	8	3	400,8	117	6	88,0	4,43
Estrato 5	344,0	10	4	396,2	146	8	44,1	2,2
Estrato 6	204,4	10	5	389,9	146	10	2,7	1,3

Fuente: Construcción propia con datos del SUI en 2015 y de (Universidad Nacional de Colombia, 2006).

TABLA 3. ESTIMACIÓN DE CONSUMOS DE EE Y COSTOS EN LOS 3 ESCENARIOS PROPUESTOS PARA 10 AÑOS.

Tipo de usuarios	Esc. 1: 100% CFL		Esc. 2: 74% LED y 26% CFL		Esc. 3: 100% LED	
	Consumo EE (TWh)	Costo total (billones \$)	Consumo EE (TWh)	Costo total (billones \$)	Consumo EE (TWh)	Costo total (billones \$)
Estrato 1	5,6	3,1	3,4	2,0	2,9	1,8
Estrato 2	10,6	5,9	6,2	3,7	5,6	3,4
Estrato 3	7,0	3,9	4,4	2,6	3,7	2,2
Estrato 4	2,8	1,5	1,8	1,0	1,5	0,9
Estrato 5	1,4	0,8	0,9	0,5	0,7	0,4
Estrato 6	0,9	0,5	0,6	0,3	0,5	0,3



FIGURA 1. AHORRO POTENCIAL DE EE AL SUSTITUIR LÁMPARAS INCANDESCENTES POR CFL Y POR LED.

Fuente: Construcción propia.



FIGURA 2. AHORRO POTENCIAL EN COSTOS AL SUSTITUIR LAMPARAS INCANDESCENTES POR CFL Y POR LED.

Fuente: Construcción propia.

La iluminación LED ofrece los potenciales más altos de ahorro energético y económico, con un 82,2% y 78,9% respectivamente, sobre la situación sin sustitución, y con el 84,7% y el 81,5% correspondientes en una conversión total a LED. Incluso, bajo el supuesto que ya existiera una conversión total a iluminación con CFL, los LED exponen ahorros potenciales de más del 47% sobre la energía consumida por las CFL y de más del 38% en lo económico, a partir de una sustitución total a LED.

Utilizando el VPN (Valor Presente Neto) y el TIR (Tiempo de Recuperación de Inversión), es posible justificar la inversión en utilización masiva de iluminación LED. Para esto se tomaron periodos anuales durante los 10 años, y los mismos datos de crecimiento, utilizados en la evaluación económica. Los costos por mantenimiento se desprecian y no se consideran costos por financiamiento o depreciación.

Puesto que se comparan los escenarios propuesto respecto al de "sin sustitución", la inversión ( $I$ ) y el beneficio ( $B$ ) se calcularon como:

$$I = CL - CC \quad (1)$$

$$B = (EC - EL) * CE \quad (2)$$

Con:  $CL$  = Costo de las lámparas a utilizar

$EC$  = Consumo de EE de las lámparas a utilizar

$CC$  = Costo de las lámparas a remplazar

$EL$  = Consumo de EE de las lámparas a remplazar

$CE$  = Costo de la EE

En la Tabla 4 se muestra el análisis para el caso de sustitución del escenario 2, y en la Figura 3 se observa gráficamente la situación.

TABLA 4. ANÁLISIS DE VPN PARA EL CASO DE SUSTITUCIÓN DEL ESCENARIO 2 FRENTE AL DE “SIN SUSTITUCIÓN”.

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Incandescentes a reemplazar (74%)	114,8	114,8	114,8	114,8	114,8	114,8	114,8	114,8	114,8	114,8
LED remplazo	78,7									
CFL (26%)	18,0					18,0				
Costo incandescentes	-0,11	-0,12	-0,12	-0,13	-0,13	-0,14	-0,14	-0,15	-0,15	-0,16
Costo LED	1,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo CFL	0,19	0	0	0	0	0,23	0	0	0	0
<b>Inversión</b>	<b>-1,57</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>-0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,16</b>
Costo EE incand.	-3,72	-3,86	-4,00	-4,15	-4,30	-4,46	-4,63	-4,80	-4,98	-5,16
Costo EE LED	0,49	0,51	0,53	0,54	0,56	0,59	0,61	0,63	0,65	0,68
Costo EE CFL	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
<b>Beneficio</b>	<b>3,02</b>	<b>3,13</b>	<b>3,25</b>	<b>3,37</b>	<b>3,49</b>	<b>3,62</b>	<b>3,76</b>	<b>3,90</b>	<b>4,04</b>	<b>4,19</b>
<b>Valor neto</b>	<b>1,45</b>	<b>3,25</b>	<b>3,37</b>	<b>3,50</b>	<b>3,63</b>	<b>3,53</b>	<b>3,90</b>	<b>4,04</b>	<b>4,19</b>	<b>4,35</b>
<b>VPN</b>	<b>29,48</b>									

Nota: Las cantidades de bombillas están dadas en millones y los costos es billones de \$.

Fuente: Construcción propia

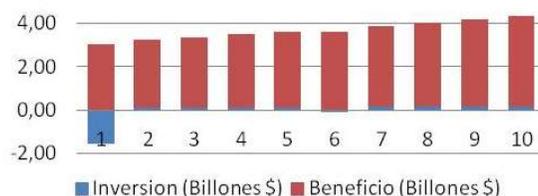


FIGURA 3. GRAFICA DE VPN PARA EL CASO DE SUSTITUCION DEL ESCENARIO 2 FRENTE AL DE “SIN SUSTITUCIÓN”.

Fuente: Construcción propia.

En la Tabla 5 se resumen los resultados de comparar cada uno de los escenarios propuestos respecto al de “sin sustitución”. Allí se observa que la mejor opción de inversión a partir de la situación actual, es la de sustitución por LED al 100%, seguida por la sustitución de lámparas incandescentes por LED, incluso por encima de la opción de conversión al 100% con CFL, a pesar que esta última permitan un tiempo menor de recuperación de la inversión.

Tabla 5. Resultados de VPN y TIR al comparar los escenarios propuestos respecto al de “sin sustitución”.

Escenario comparado respecto al de “sin sustitución”	VPN (billones \$)	TIR (meses)
100% CFL	24,99	4
74% LED y 26% CFL	29,48	6
100% LED	33,03	5

Fuente: Construcción propia.

Adicionalmente hay otras consideraciones que favorecen a la iluminación LED. Por ejemplo, es muy compatible con sistemas fotovoltaicos u otros de energía distribuida debido a su alta eficiencia y compatibilidad con fuentes de baja potencia o baterías [5]. Como no producen mucho calor, se consiguen ahorros indirectos por la disminución de consumo energético para aire acondicionado. El LED todavía está en evolución y se espera que su eficiencia aumente y su precio baje mucho más, lo que se traduce en potenciales de ahorro, tanto energético como económico, todavía mayores.

### 3. Potencial de reducción del impacto ambiental negativo

#### 3.1. Disminución en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Es uno de los objetivos ambientales más importantes y más comúnmente buscados en todo el mundo. Para hacer la estimación de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, se tomó como línea base el consumo energético hallado para el escenario sin sustitución (iluminación 74% incandescentes y 26% CFL). Luego se hizo una cuantificación de reducción de CO<sub>2</sub> para cada uno de los 3 escenarios de sustitución propuestos.

Para esto se utilizó un factor de emisión de CO<sub>2</sub> del margen combinado para Colombia de 0,2917 kg CO<sub>2</sub>/kWh [14]. Adicionalmente, se incluyó un factor de multiplicación de 1,15 para estimar pérdidas por transmisión y distribución por cada kWh. En la Figura 4 se resume la reducción anual de emisiones de CO<sub>2</sub> esperada en cada uno de los 3 escenarios propuestos.

Es claro que la utilización de menos energía del LED se traduce en menos deterioro del medio ambiente, ya sea porque contribuye a disminuir, o al menos a postergar, la necesidad de construir centrales eléctricas y de desarrollar yacimientos carboníferos y de hidrocarburos, o bien porque reduce las emisiones de GEI.

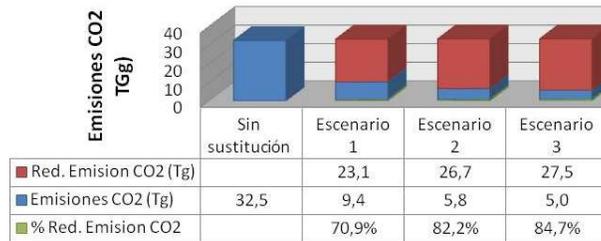


FIGURA 4. EMISIONES ANUALES DE CO<sub>2</sub> EVITADAS AL SUSTITUIR BOMBILLAS INCANDESCENTES POR CFL Y POR LED.

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2. Reducción de desechos contaminantes

Los sistemas de iluminación producen diversos tipos de desechos, siendo los más perjudiciales los correspondientes a las lámparas de descarga, cuyo contenido de mercurio (entre 3 y 50 mg) es liberado al ambiente cuando se descarta la lámpara. El peligro que suponen los residuos tóxicos, es mayor cuando llegan a vertederos y fuentes de agua afectando plantas, animales y al ser humano directa e indirectamente [15].

Mientras que la sustitución de lámparas incandescentes por CFL implica un aumento en la cantidad de mercurio, la sustitución con iluminación LED representa la posibilidad de evitar esta fuente de contaminación, puesto que no contiene ningún tipo de contaminante.

De acuerdo a la estimación hecha de consumos de EE en las viviendas colombianas, y tomando el valor más bajo (3 mg) en contenido de mercurio de una CFL, también se puede estimar la cantidad de emisiones evitadas en cada uno de los 3 escenarios propuestos (Ver Tabla 6).

TABLA 6. EMISIONES DE MERCURIO EVITADAS AL DESCARTAR LAS CFL EN 10 AÑOS DE EVALUACIÓN.

Escenario	Total estimado de CFL en 10 años (millones)	Contenido estimado de mercurio (kg)
Sin sustitución	35	105
100% CFL	180,2	540,6
74% LED y 26% CFL	35	105
100% LED	0	0

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Reducción de efectos biológicos sobre personas

Las radiaciones asociadas a la iluminación pueden provocar efectos nocivos a las personas y al ecosistema. Si bien sus niveles de intensidad están lejos de la dosis umbral de las enfermedades asociadas con los rayos UV (ultra violeta) e IR (infra rojos), es algo que los diseñadores de iluminación deben considerar. La iluminación LED está libre de estos tipos de radiaciones, y por lo tanto el riesgo de producir enfermedades es cero.

El exceso de iluminación puede alterar el ciclo vital del hombre, lo que perjudica la producción de hormonas, el desarrollo de células y, sobre todo, la actividad cerebral [16]. Acá sobresaale otra de las ventajas del LED, la posibilidad de regular fácilmente su luminosidad, e incluso su temperatura de color, con lo que se puede conseguir un ambiente acogedor o estimulante.

Posiblemente el principal efecto con la iluminación LED está asociado con el deslumbramiento, que puede producir fatiga y pérdida de confort, y en consecuencia, disminución del desempeño en tareas visuales. Sin embargo, esto lo pueden resolver los diseñadores de iluminación, a partir de recomendaciones hechas por estudios del deslumbramiento [16].

### 3.4. Sobre la polución luminosa

Toda radiación luminosa orientada a espacios donde no sea requerida o en cantidad mayor a la necesaria, altera el medio ambiente y la calidad de vida. Paralelamente es un índice de ineficiencia energética resultado de un inadecuado diseño de la instalación [16].

Para los objetivos de este trabajo, a favor de la iluminación LED se resaltan los siguientes aspectos: la iluminación LED permite dirigir la luz hacia un lugar particular donde realmente importe. En una luminaria común, en el mejor de los casos, un 22% de la luz no se aprovecha [15]. En una lámpara sin pantalla, la pérdida de energía supera el 50%. Si además, el cerramiento es tipo opal, el despilfarro se acerca al 80% del total. [15]. La utilización de iluminación LED con sensores y controles de luminosidad, permite manejar su intensidad evitando el desperdicio de luz.

## 4. Barreras para la utilización masiva de iluminación LED

### 4.1. Barreras económicas

El principal inconveniente de la iluminación LED es su aparente costo inicial alto. Un programa de sustitución de bombillas tiene como efecto la reducción del consumo de energía, sin embargo, en los estratos 1, 2 y 3, donde se concentra más del 80% de la población colombiana, los ingresos familiares no son suficientes para hacer la reposición masiva de bombillas [13] [3].

Aunque el desarrollo del mercado de iluminación LED va avanzando, los principales productos van orientados a nichos comerciales e industriales específicos, antes que, a las aplicaciones residenciales, con lo que obstaculiza la masificación de la iluminación LED residencial [17].

El aumento en los costos de la energía representa una oportunidad para la adopción de iluminación LED por su alta eficiencia energética.

### 4.2. Barreras técnicas

Los LED se encuentran todavía en desarrollo y algunas de las cuestiones alrededor de características y estabilidad del color aún no se han resuelto completamente [18]. En comparación con otras lámparas, un solo LED no alcanza un nivel que permita aplicaciones de iluminación general, por lo que se requiere el montaje de múltiples LED, así como soluciones ópticas para obtener una buena homogeneidad del haz de luz y de consistencia del color para cada lámpara [19].

La principal preocupación desde el punto de vista eléctrico, se ha basado en la distorsión armónica y el factor de potencia que puedan presentar los productos disponibles comercialmente [3]. El contenido armónico de las lámparas LED pueden no ser similares, ya que las señales de corriente dependen de la configuración del controlador que utilizan los fabricantes [20]. Todavía no hay claridad de un estándar, internacional o nacional, con los límites de calidad de energía para las lámparas LED. También enfrentan obstáculos de medición al entrar en comparación con otras fuentes de luz, bajo métricas convencionales que se basan en estándares para bombillas incandescentes [17].

### 4.3. Barreras socio-culturales

La iluminación LED sigue siendo una tecnología que no es bien conocida por los usuarios finales, pero tampoco por diseñadores, instaladores y funcionarios de normas del gobierno [17]. Los usuarios residenciales tampoco tienen un manejo integral del concepto de URE y desde luego esto incluye el tema de iluminación. En los sectores comercial e industrial, hay un mayor incentivo desde el punto de vista de la relación costo-beneficio [18].

Desde el punto de vista del interés del consumidor, no basta que una bombilla consuma menos energía, sino que junto a esto logre una eficacia luminosa comparable al que le daría el uso de una bombilla común [3].

### 4.4. Otras barreras

El papel del gobierno debe ser más protagónico y dedicar sus esfuerzos a ser promotor de proyectos de eficiencia energética, de acciones de capacitación y difusión pública que permitan a los usuarios, cualquiera sea el sector de consumo, tener conocimiento de qué tipo de medidas están disponibles en el mercado [13]. En el caso de la iluminación, están los decretos de prohibición de bombillas incandescentes, hacen falta programas para la aplicación efectiva de tecnologías eficientes y un marco regulatorio adecuado.

## 5. Conclusiones

La tecnología LED se presenta como la herramienta más efectiva no solo para generar ahorros energéticos y económicos, sino también para evitar gases y sustancias contaminantes por concepto de iluminación. Sin embargo, para lograr una sustitución masiva de la iluminación general a LED deben superarse barreras como su alto costo inicial en comparación con las tecnologías de la competencia, la inmadurez de la tecnología LED, problemas de fabricación de las luminarias y de infraestructura instalada, la falta de estándares de la industria, falta de información para compradores, diseñadores y fabricantes e incluso asuntos socioculturales y de marco regulatorio.

## 6. Referencias

- [1] IEA, International Energy Agency (2006). *Light's Labour's Lost: Policies for Energy-efficient Lighting*. Paris.
- [2] UPME (2004). *Plan Energético Nacional: Estrategia energética integral, Visión 2003 - 2020*.
- [3] Silva, Víctor Hugo (2010). *Implicaciones de los proyectos de cambios masivos de lámparas incandescentes por fluorescentes compactas en Colombia*. Especialización en Gerencia de Proyectos, Universidad Pontificia Bolivariana.
- [4] Universidad Nacional de Colombia (2006). *Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial urbano y comercial*. Informe ejecutivo presentado a UPME.
- [5] UPME & Consorcio Bariloche – BRP (2007) *Consultoría para la formulación estratégica del plan de uso racional de energía y de fuentes no convencionales de energía 2007 – 2025*. Santa Fe de Bogotá.
- [6] Trifunovic, J. & Mikulovic, J. & Djuric, Z. & Djuric, M. & Kostic, M. (2009). *Reductions in electricity consumption and power demand in case of the mass use of compact fluorescent lamps*. En *Energy* 34, 1355–1363.
- [7] Gereffi, Gary & Lowe, Marcy (2008). Chapter 1: LED Lighting. En *Manufacturing Climate Solutions*. Center on Globalization, Governance, and Competitiveness at Duke University
- [8] EERE, Energy Efficiency and Renewable Energy of U.S. DOE (2009). *Multi-Year Program Plan FY'09-FY'15: Solid-State Lighting Research and Development*.
- [9] Ken, Li Fuen (2007). *White LEDs for general illumination applications*. Tesis de maestría del MIT.
- [10] UPME (2007). *Plan Energético Nacional: Contexto y Estrategias 2006 – 2025*. Santa Fe de Bogotá.
- [11] Kelly, Timothy (2004). *Solid State Lighting: Strategies for brighter future*. Tesis de maestría del MIT.
- [12] Cheng, Y.K. & Cheng, K.W.E. (2006). *General Study for using LED to replace traditional lighting devices*. Artículo presentado en 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 173 – 177.
- [13] Universidad Nacional de Colombia (2008). *Caracterización de las bombillas para uso interior comercializadas en Colombia*. Informe para la UPME.
- [13] SUI, Sistema Unificado de Información, Colombia.  
Última consulta 28/12/15 en: [www.sui.gov.co](http://www.sui.gov.co)
- [14] UPME (2010). *Cálculo del factor de emisión de CO2 del sistema eléctrico interconectado nacional para determinar la línea base de proyectos MDL*. Bogotá DC.
- [15] Cepeda Peña, William Enrique (2002). *Contaminación lumínica*. IV Reunión Interinstitucional de Ciencias de la Tierra. Sociedad Geográfica de Colombia.
- [16] Assaf, L., Dutt, G. y Tanides, C. (2006). *Impacto ambiental de los sistemas de iluminación*. Última consulta 10/02/08 en: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli%2Diluminacion/#indicepdf>
- [17] Ton, My, & Foster, Suzanne, & Calwell, Chris (2003). *LED Lighting Technologies and Potential for Near-Term Applications*. Market Research Report prepared by Ecos Consulting.
- [18] Soumonni, Ogundiran (2008). *Lighting energy efficiency potential in Georgia: a technology and policy assessment*. Georgia Institute of Technology. Enterprise Innovation Institute Science, Technology and Innovation Policy Internship Program.

- [19] Wendt, Matthias y Andriess, Jan-Willem (2006). LEDs in Real Lighting Applications: from Niche Markets to General Lighting. IEEE. Eindhoven, The Netherlands
- [20] Blanco, M. and Parra, E. E (2010). Effects of High Penetration of CFLs and LEDs on the Distribution Networks. IEEE. 978-1-4244-7245-1110

## Generación de Energía Eléctrica Mediante Vórtices Gravitacionales

### Electric Power Generation by Gravitational Vortex for non-interconnected Areas of Colombia

*Beltrán Urango David<sup>1</sup>; Herrera Díaz Jeison Leandro<sup>1</sup>; José Alejandro Posada Montoya<sup>2</sup>, Leyton Castañeda<sup>3</sup>; Jorge Andrés Sierra del Río<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup>Estudiante de ingeniería eléctrica decimo semestre IUPB, <sup>2</sup>Docente IUPB, Ph.D. Ing. Aeroespacial, Especialista en Aeronáutica, Ing. Mecánico y Piloto, <sup>3</sup>Estudiante ITM, <sup>4</sup>Docente ITM*

*{d.beltrán, je.herrera, [Alejandro.Posada@pascualbravo.edu.co](mailto:Alejandro.Posada@pascualbravo.edu.co), [leytoncastaneda@gmail.com](mailto:leytoncastaneda@gmail.com), [jorgesierra@itm.edu.co](mailto:jorgesierra@itm.edu.co) }*

#### Resumen

Según datos del Sistema de Información Minero Energético Colombiano, el 97% de la población tiene acceso al servicio de energía eléctrica, el 3% restante corresponde a aquellos que habitan las Zonas No Interconectadas (ZNI) del país. Para suplir esta necesidad están obligados a la utilización de plantas de generación de energía eléctrica mediante el uso de combustibles fósiles, aumentando el costo tarifario y la emisión de CO<sub>2</sub>. Sumado a ello, según el Centro Nacional de Monitoreo en estas zonas se prestan en promedio entre 7 y 12 horas de servicio al día.

Buscando aportar soluciones que permitan suplir estas necesidades, se realizaron diseño y simulaciones para un prototipo de planta de generación de energía eléctrica mediante vórtices gravitacionales, identificando sus beneficios ambientales y técnicos, y determinando su viabilidad para suplir las necesidades de comunidades en las ZNI de Colombia.

Esta tecnología aprovecha la energía cinética del vórtice gravitacional inducido artificialmente mediante una estructura civil inmersa en el lecho de un afluente hídrico. De esta manera se transmite la energía mecánica a una turbina, la cual está acoplada al eje de un generador de corriente alterna. Lo anterior sin alterar significativamente las condiciones ambientales del afluente hídrico a intervenir.

Apoyados en elementos y postulados de la dinámica de fluidos e hipótesis planteadas, se calcularon las dimensiones del modelo experimental. Apoyados en la suposición de que el vórtice formado dentro del tanque es equivalente a la rotación de un fluido que se mueve como un sólido respecto a un eje, el cual se define como vórtice forzado, se procedió a encontrar la solución analítica de las variables que determinan la potencia del vórtice y la transmitida mecánicamente al generador. Lo anterior para conocer la eficiencia teórica del modelo experimental.

**Palabras clave:** vórtice gravitacional, ábaco para turbinas, similitud dinámica, dinámica de fluidos computacionales.

#### Abstract

According to the Colombian Mining-Energetic Information System, 97% of the Colombian population has access to electricity service, the remaining 3% have no access to it, this population corresponds to those who inhabit the non-interconnected areas. To meet their needs, they use power plants burning fossil fuels, increasing the tariff cost and CO<sub>2</sub> emissions. Added to this the lack of continuity of service between 7 and 12 hours a day, according to the National Monitoring Center. Design and simulations were performed for a prototype of a power plant by gravitational vortex, identifying their environmental and technical benefits and determine its feasibility to meet the needs of communities in isolated zones of Colombia. This technology harnesses the kinetic energy of gravitational vortex artificially induced by a civil structure immersed in the bed of a tributary water. In this way the mechanical energy is transmitted to a turbine, which is coupled to the shaft of an AC generator. All this without significantly altering the environmental conditions of the river. The dimensions of the experimental model was calculated by the principles of fluid dynamics and based on the experience gathered by the engineer Zotlöterer. The analytical solution of the variables that determine the vortex power and the power mechanically transmitted

to the generator was obtained given that the vortex formed within the tank is equivalent to the rotation of a fluid moving as a solid about an axis, which is defined as forced vortex. The above in order to determine the theoretical efficiency of the experimental model.

**Keywords:** gravitational vortex, Turbine abacus, dynamic similarity, computational fluid dynamics simulations.

## 1. Introducción

El 3% de la población colombiana no tiene acceso a la energía eléctrica del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Para suplir esta necesidad generan energía eléctrica por medio de grupos electrógenos que para su funcionamiento utilizan combustibles fósiles, aumentando los costos tarifarios significativamente, emitiendo CO<sub>2</sub> al medio ambiente y teniendo un servicio intermitente [1].

Existen diversos factores que encausan la clasificación las centrales hidroeléctricas, esta tipificación depende de su modo de operación y se establece que son de tipo: de agua fluyente (filo de río), de embalse y de bombeo o reversible. A su vez, cada una de ellas se clasifica de acuerdo a su potencia instalada y capacidad de almacenamiento o regulación de caudales.

En Colombia, la clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia instalada la realiza la Subdirección de Planeación Energética de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) adscrita al Ministerio de Minas y Energía.

Según las condiciones mencionadas el sistema de generación de energía por vórtice gravitacional está clasificado dentro de las minicentrales, convirtiéndose en una oportunidad para suplir las necesidades actuales, es por ello que se realiza la investigación de este tipo de generación de energía en busca del mejoramiento de la eficiencia total del sistema y las bondades que trae consigo. La última actualización realizada el año 2015 determina la siguiente clasificación Tabla 2.

TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS [2]

Designación	Capacidad Instalada	Tipo de Operación
Picocentral	Entre 0.5 y 5 kW	Filo de agua
Microcentral	Entre 5 y 50 kW	Filo de agua
Minicentral	Entre 50 y 500 kW	Filo de agua
Pequeñas Central Hidroeléctricas	Entre 500 y 20000 kW	Filo de agua y Embalse
Central Hidroeléctricas	Mayor a 20000 kW	Con Embalse

Las ZNI de Colombia se concentran al suroriente del territorio nacional, más precisamente en las zonas del Orinoco y Amazonas. Aislados del SIN y con grandes carencias energéticas. Paradójicamente según el Atlas Hidroenergético de Colombia 2015, el potencial para las minicentrales en la región del Orinoco y Amazonas es de 62,737 kW [2]. Un potencial importante para suplir las necesidades actuales en equilibrio con el medio ambiente, ya que el sistema es amigable con éste, al no requerir grandes remociones de tierra y embalsar grandes volúmenes agua, por el contrario, el vórtice generado artificialmente trae grandes beneficios para los ecosistemas que habitan en los afluentes intervenidos, ya que permite mayor oxigenación del agua sin necesidad de energía adicional.

Viktor Schauberger y Ludwig Herbrand para el año 1932, plantean que la energía inherente al flujo libre, se convierte en una oportuna alternativa para generar electricidad [3]. Esta idea es desarrollada en el año 2002 por el ingeniero Austríaco Franz Zoflöterer, quien en el año 2006 en la localidad de Obergrafendorf, Austria, puso en operación la primera planta de vórtice gravitacional con su empresa

Zotlöterer. Esta planta cuenta con una cabeza de 1.5 m, caudal de 0.9 m<sup>3</sup>/s, potencia eléctrica de 8,3 kW y con una eficiencia del 80%. En la actualidad se tienen registro de aproximadamente once plantas en funcionamiento en el continente europeo [4]. En América Latina, más precisamente la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) de Ecuador, se realizaron investigaciones del sistema y puesta en marcha de un prototipo con ensayo en ambiente controlado, generando energía a partir de un vórtice gravitacional, en la que lograron almacenar con éxito 200 W de energía en una batería de 12 V [5]. En Colombia actualmente no existe registro de la implementación de dicho sistema, según respuesta del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas no Interconectadas (IPSE) [6].

Las patentes originadas a partir de la invención del sistema de vórtice gravitacional hacen referencia en la tabla 1.

TABLA 1. PATENTES OTORGADAS DEL SISTEMA DE VÓRTICE GRAVITACIONAL [7]

Patente	Fecha	Inventor	Reclamación
WO2004061295A2	2003/01/03	Franz Zotlöterer	La invención de un sistema de generación de energía eléctrica, que utiliza la energía cinética del agua a través de una estructura civil que se compone de un canal de entrada (6), conectado de manera radial a un tanque de circulación (1) y generando un remolino artificial para dar movimiento a una turbina (8), retornando al cauce del río por medio de un orificio de descarga, ver figura 1.
WO2008141349A2	2007/05/14	Franz Zotlöterer	La creación de una cuña (6) de flujo reduciendo el ancho del canal de manera gradual al tanque de circulación, permitiendo que su ingreso se haga de manera tangencial minimizando la sección de flujo de entrada y acelerando la velocidad del agua, lo cual mejora la eficiencia de manera representativa ver figura 2.
WO2011051421A2	2009/11/02	Franz Zotlöterer	La creación de una turbina en particular para el sistema de generación, con un rodillo-rueda (7) que tiene una pluralidad de cuchillas uniformemente distribuidos circunferencialmente, ver figura 3.

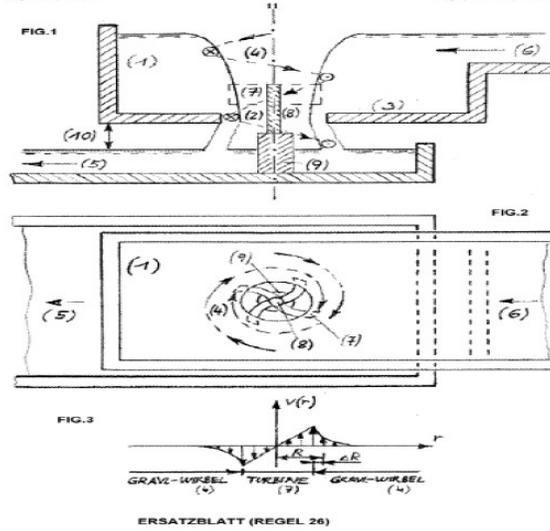


FIGURA 1. DIAGRAMA PATENTE WO2004061295A2 [7]

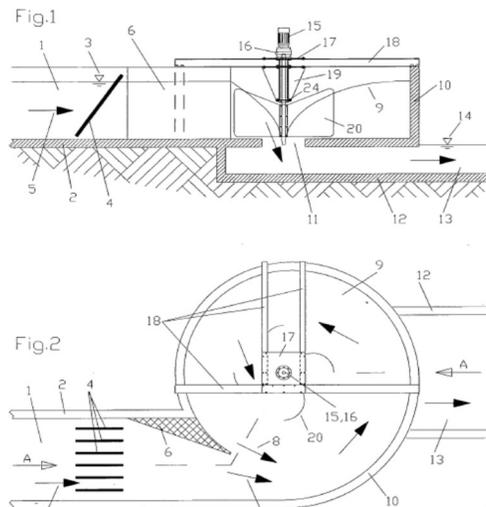


FIGURA 2. DIAGRAMA PATENTE WO2008141349A2 [7]

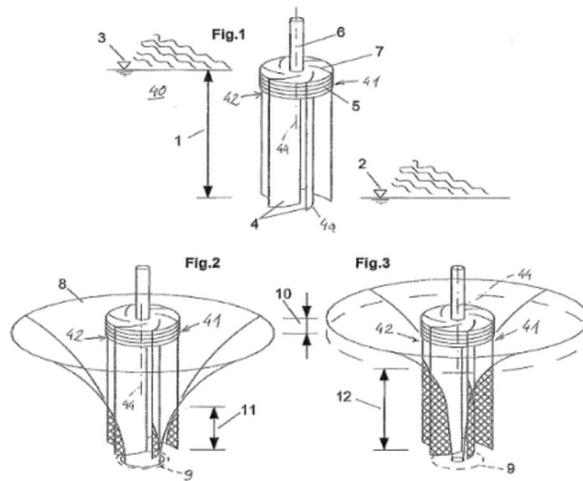


FIGURA 3. DIAGRAMA PATENTE WO2011051421A2 [7]

La velocidad nominal de la turbina Zötlöterer depende de las dimensiones de su estructura y está entre 15 a 40 RPM, siendo esta una velocidad baja con relación a las turbinas convencionales, con una cabeza de entre 0.5 m y 2 m de altura y con una potencia de entre 0.2 kW y 40 kW. En la Figura 1 se muestra la curva de eficiencia para las condiciones anteriormente mencionadas [4].

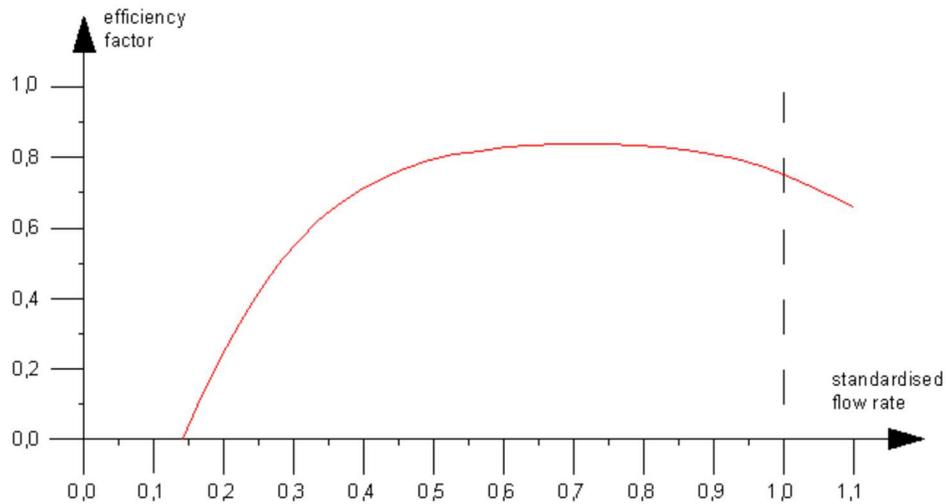


FIGURA 4. EFICIENCIA TURBINA ZÖTLÖTERER [4]

Durante la construcción del prototipo del sistema de vórtice gravitacional desarrollado en la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), se construyeron cinco turbinas experimentales, donde la turbina número cuatro fue la de mayor eficiencia, donde a un caudal de 0.050 m<sup>3</sup>/s, se obtuvo 279 W a régimen de giro de 80 RPM (Figura 5). Las medidas expuestas en la Tabla 3 corresponden a las dimensiones de las turbinas usadas. En las pruebas experimentales se modificaron las alturas de instalación de la turbina con respecto al fondo del tanque, las alturas empleadas fueron 0.30 m, 0.60 m y 0.90 m, siendo en la altura de los 0.30 m donde presentaron mejor comportamiento. De igual forma, se realizaron ensayos a diferentes caudales 0.015 m<sup>3</sup>/s, 0.025 m<sup>3</sup>/s, 0.040 m<sup>3</sup>/s y 0.050 m<sup>3</sup>/s [8]. Estos datos se describen en la Tabla 3.

TABLA 3. MEDIDAS TURBINA EXPERIMENTAL CUATRO [8]

Descripción	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3	Turbina 4	Turbina 5	Unidad
Longitud de turbina	0,315	0,335	0,42	0,335	0,32	m
Altura turbina	0,10	0,35	0,466	0,25	0,40	m
Diámetro de rodete	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	m
Altura de rodete	0,10	0,35	0,466	0,25	0,40	m
Angulo de separación entre alabes	60	90	60	60	22.5	°
Longitud del alabe	0,14	0,15	0,20	0,15	0,10	m
Altura alabes	0,10	0,30	0,30	0,20	0,30	m
Espesor de alabes	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	m

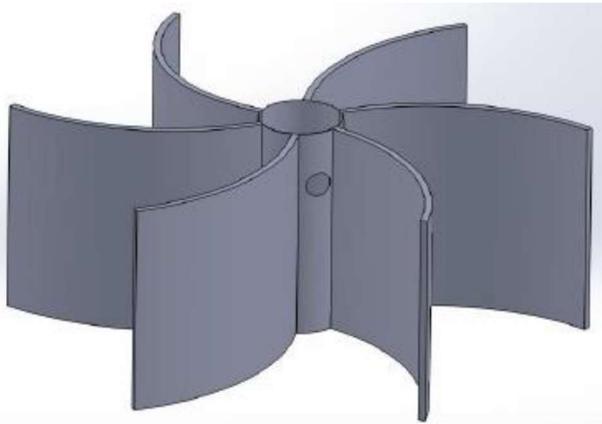


FIGURA 5. TURBINA EXPERIMENTAL UNO [8]

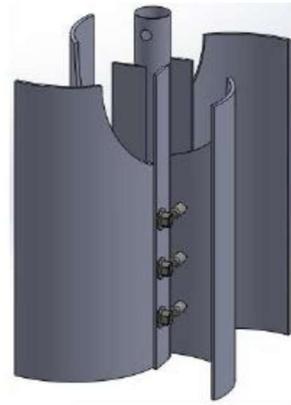


FIGURA 6. TURBINA EXPERIMENTAL DOS [8]

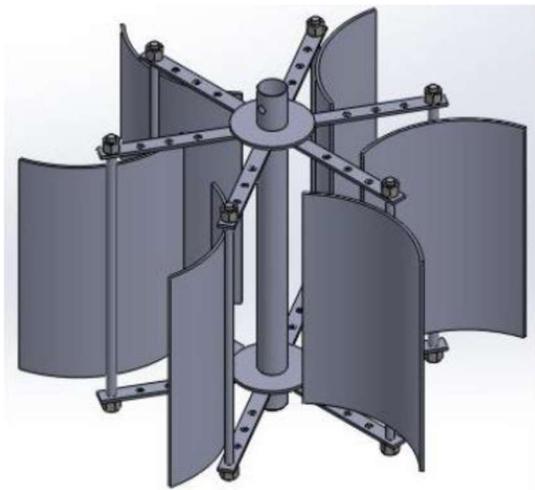


FIGURA 7. TURBINA EXPERIMENTAL TRES [8]

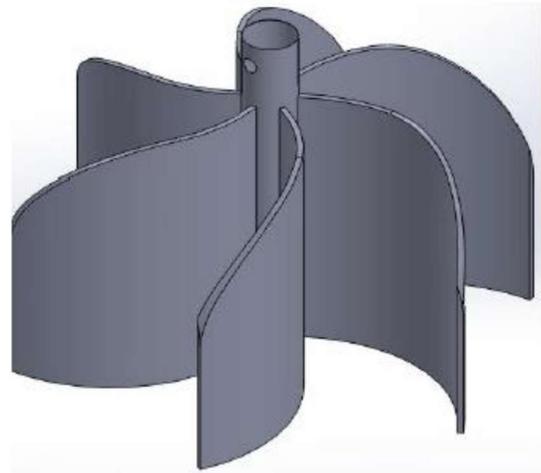


FIGURA 8. TURBINA EXPERIMENTAL CUATRO [8]

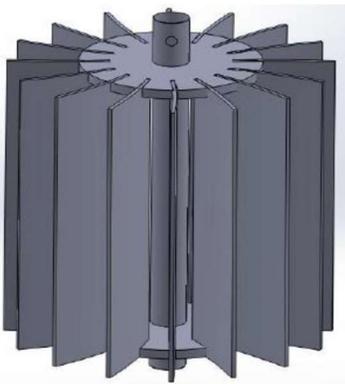


FIGURA 9. TURBINA EXPERIMENTAL CINCO [8]

Según el ábaco para selección de turbinas, para cabezas altas y caudales relativamente bajos se aplican turbinas tipo Pelton y para cabezas medias y caudales relativamente altos se selecciona la turbina tipo Francis, mientras que para cabezas extremadamente bajas y grandes caudales las turbinas Kaplan, siendo estos tres los tipos de turbinas más representativos [9]. En lo que respecta a turbinas de vórtice gravitacional, éstas convergen para alturas entre 0,5 y 5 m, y para caudales entre 0,1 y 4 m<sup>3</sup>/s; lo que indica que es posible tener potencias instaladas que oscilan entre 1 y 180 kW (Figura 7).

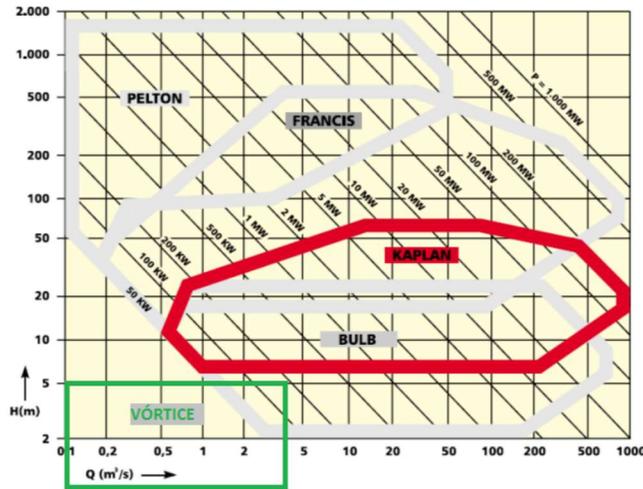


FIGURA 10. ÁBACO PARA SELECCIÓN DE TURBINAS [9]

## 2. Marco Teórico

En centrales hidroeléctricas convencionales de sistemas presurizados, la potencia eléctrica resultante es el producto entre la diferencia de alturas entre la captación y la casa de máquinas y el caudal transportado, despreciando la energía potencial dinámica del agua. Una represa destruye el potencial de energía natural por lo que el agua pasa de un estado dinámico flujo a un estado estático.

La hidrodinámica de sistemas de generación mediante vórtice gravitacional es posible analizarlo desde el punto de vista hidrodinámico partiendo de elementos y postulados de la dinámica de fluidos de régimen de flujo turbulento.

En 2009, se instaló una planta de vórtice gravitacional en Schöftland en el cantón de Argovia, Suiza. Con un diámetro de 6,5 m. y una tubería forzada de 1,5 m., esta central produce entre 10 y 15 kW, según el nivel del agua. Ello corresponde a una producción anual de entre 80.000 y 130.000 kWh, lo cual es suficiente para cubrir la demanda anual de electricidad de entre 20 y 25 hogares suizos, o sea, el equivalente a las necesidades de entre 50 y 60 personas [4].

La parte central de un vórtice inducido presenta velocidades altas cuando está formado por un fluido real, este se comporta en su parte central como un cuerpo sólido, constituyéndose en un vórtice forzado en su interior y al exterior un vórtice libre (Figura 8) [10].

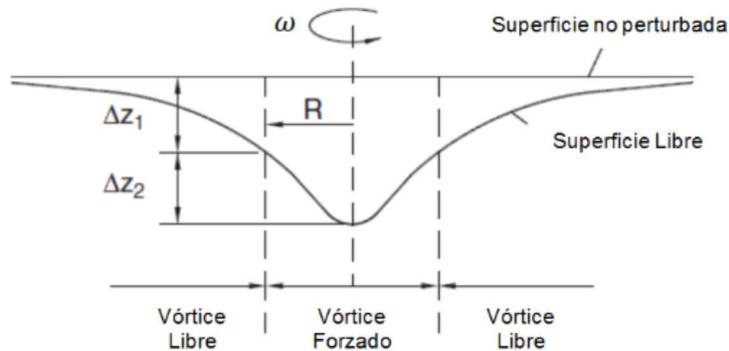


FIGURA 11. MODELO TEÓRICO PARA UN VÓRTICE COMPUESTO [10]

El vórtice libre presenta disminución de la presión y aumenta significativamente su velocidad tangencial. Este aumento de velocidad es resultado de la disminución del radio de descarga de manera gradual. Las fuerzas que actúan en la conformación del vórtice forzado corresponden a la fuerza de Coriolis, la asociada a la variación temporal de la aceleración angular y la fuerza centrífuga, si se considera que el vórtice forzado inducido se forma en un líquido con superficie libre, es decir a presión atmosférica este será constante, ver (1) [10].

$$z - z_0 = \left( \frac{\omega^2 * r^2}{2g} \right) \quad (1)$$

Dónde Z y Z0 son alturas final e inicial del vórtice, respectivamente,  $\omega$  es la velocidad angular del fluido, r es el radio libre del vórtice y g la aceleración de la gravedad.

El aprovechamiento de la mayor eficiencia del vórtice inducido artificialmente en el canal de transición, considera la importancia del buen diseño éste canal, el cual antecede al tanque de circulación del sistema vórtice gravitacional. La conductividad de una sección de canal incrementa al aumentar la magnitud del radio hidráulico o al disminuir el perímetro mojado, lo que es equivalente a que la sección con menor perímetro hidráulico, para un área determinada, contiene la máxima conductividad, esta sección es conocida como sección hidráulica óptima, la cual está ligada a la geometría del canal y que para el caso del vórtice gravitacional corresponde a un rectángulo medio cuadrado (Tabla 4) [11].

TABLA 4. SECCIÓN HIDRÁULICA ÓPTIMA [11].

Sección transversal	Área (A)	Perímetro mojado (P)	Radio Hidráulico (R)	Ancho superficial (T)	Profundidad hidráulica (D)	Factor de sección (Z)
Rectángulo Medio Cuadrado	$2y^2$	$4y$	$\frac{1}{2}y$	$2y$	$y$	$2y^{2.5}$

El aprovechamiento óptimo del vórtice gravitacional artificial esta soportado en diferentes estudios realizados al respecto, apoyados en postulados de la dinámica de fluidos, en simulaciones de dinámica de fluidos computacionales (CFD) y en gran parte en ensayos de laboratorio con prototipos desarrollados. Estos estudios dicen que la máxima eficiencia en la formación del vórtice inducido ocurre con la razón del 14% y 18% para bajas y altas diferencias de carga, entre el diámetro del orificio de salida y el diámetro tanque de circulación [12]. Al tener un fondo cónico en este último se mejora representativamente la velocidad del vórtice, lo cual a su vez facilita la descarga del agua, y se puede evitar la recirculación del flujo por efecto de la capa Ekman [10]. En cuanto a la velocidad angular para el vórtice gravitacional se presenta a la razón de 0.52 entre la base de entrada al tanque de circulación / diámetro del orificio de salida [10].

Los diseños de la estructura que componen el sistema de vórtice gravitacional realizados recientemente, se basan en análisis adimensional de los componentes, para luego construir prototipos a escala apoyados en el modelo construido por el ingeniero Zotlöterer. En la Universidad Técnica Particular de Loja en Ecuador, realizaron un diseño para hacer ensayos en ambiente controlado, utilizando una escala de 1:5 en sus componentes estructurales, apoyados en las formulaciones postuladas para los cálculos del sistema. Las velocidades del fluido de las pruebas de ensayo oscilaron entre 0.16 m/s y 0.18 m/s y un caudal entre 4.71 m<sup>3</sup>/s y 13.55 m<sup>3</sup>/s. Los objetivos establecidos eran los identificar los tiempos de formación del vórtice, aceleración del flujo y potencia generada. En cuanto al tiempo de formación del vórtice construyeron dos conos de descarga con diferente diámetro en su parte superior, tomando registros de tiempo desde el instante de ingreso del líquido al tanque de circulación hasta la formación total del vórtice forzado. Pudieron encontrar que al disminuir el diámetro superior del cono de descarga se aumenta el tiempo de formación del vórtice, y al aumentar el diámetro superior del cono de descarga aumenta la velocidad angular del mismo. En cuanto a la aceleración del flujo se tomaron registro de velocidad en el canal de transición y en la parte central del vórtice. Los registros mostraron que las velocidades con un caudal 13.55 m<sup>3</sup>/s para el ingreso al canal de transición fue de 0.18 m/s y de 1.67 m/s para la parte central del vórtice, dando una relación entre la velocidad de salida y la velocidad de entrada de 9.28. Para la potencia generada se utilizó un generador asíncrono monofásico, para lo cual se calculó la potencia teórica del sistema de vórtice gravitacional mediante la ecuación (2) [12].

$$P = Zv * g * \rho * Q \quad (2)$$

Los resultados no fueron satisfactorios ya que no se pudo llegar a la velocidad nominal del generador afectando la eficiencia, la velocidad máxima que se pudo alcanzar fue de 180 RPM y la nominal del generador de 430 RPM [12].

TABLA 5. EFICIENCIA DEL SISTEMA [12]

Caudal Q (l/s)	Potencia teórica (Watt)	Potencia medida (Watt)	Eficiencia (%)
13.55	20.78	5.57	26.66



La Universidad Técnica Particular de Loja en Ecuador, es quien más ha profundizado en la investigación del sistema de generación de energía por vórtices gravitacionales, además de la construcción del prototipo, realizó simulaciones utilizando dinámica de fluidos computacionales, más precisamente el software ANSYS CFX. Analizando a través de simulaciones computacionales CFD el flujo de un sistema de vórtice gravitacional. El dominio para la simulación realizada se conformó por el canal de transición y el tanque de circulación con el cono de descarga respectivo. La construcción del mallado finito requirió de 31225 nodos. El análisis transitorio les permitió observar las fluctuaciones propias del vórtice y sus características propias hasta estabilizarse. El tiempo mínimo para las simulaciones fue de 2 minutos, tiempo de estabilización del vórtice y optaron por un paso de tiempo de 0.02 segundos que les permitiera resolver las ecuaciones.

Los resultados de las simulaciones fueron coherentes con los ensayos de laboratorio, se logró formar un vórtice uniforme con líneas de corrientes libres entre sí, logrando demostrar que la estructura es apta para el funcionamiento del sistema. También pudieron evidenciar que la reducción de la sección transversal al ingreso del tanque de circulación, permite que las líneas de corriente ingresen sin generar perturbaciones considerables sobre la circulación rotacional de las líneas de corriente que existen dentro del tanque. La implementación del cono de descarga es adecuada ya que no permite el estancamiento del fluido dentro del tanque de circulación y permite acelerar la salida de manera óptima. Las velocidades en la parte inicial del canal de transición y las del vórtice en su parte central, coincidieron de manera muy aproximada a las medidas de los ensayos experimentales. Dentro de las recomendaciones realizadas por el autor para futuras simulaciones están implementar un mallado más fino, y que en las regiones curvas donde se generan las irregularidades se mallen independientemente de todo el dominio; considerar un factor de fricción para dar más fiabilidad a los resultados, e incluir en las simulaciones el análisis de diseño de la turbina para evaluar el comportamiento integral del sistema [13].

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1 Simulación

La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite realizar análisis de sistemas que involucren flujos de fluidos, transferencia de calor, masa, entre otros. Es una herramienta útil que permite modelar diferentes comportamientos de fluidos en un entorno computacional, sin ella sería imposible encontrar soluciones analíticas a diferentes ecuaciones con un porcentaje de error permisible.

Para modelar el comportamiento de un vórtice gravitacional se utilizan las ecuaciones diferenciales parciales de Navier – Stokes (N-S), las cuales no tienen solución analítica conocida. Por lo tanto, se utilizará el solucionador CFX del software ANSYS, el cual contiene los modelos de N-S y  $k - \epsilon$  para el estudio de flujos turbulentos definidos por el número de Reynolds [15].

Al tratarse de un flujo con simetría axial las ecuaciones de N-S se deberán representar en coordenadas cilíndricas, tal como se describe en (3), (4), (5) y (6):

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0 \quad (3)$$

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} - \frac{V_r V_\theta}{r} = V \left( \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial V_\theta}{r \partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V^2}{r} + \frac{\partial \rho}{\rho \partial r} = V \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial V_r}{r \partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\rho \partial z} = g + V \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial V_z}{r \partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Dónde  $V_\theta$ ,  $V_r$  y  $V_z$  son componentes tangenciales, radiales y axiales de la velocidad, respectivamente,  $\rho$  es la densidad del fluido y  $g$  es la aceleración de la gravedad [16].

Con el propósito de modelar el comportamiento del flujo, se realizó un dibujo asistido por computador (CAD) de la estructura diseñada mediante el software Solid Edge. Este fue guardado con extensión IGES y luego importado en el software ANSYS para su posterior mallado, configuración y solución de las ecuaciones (2), (3) y (4) en modo transitorio.

El equipo de cómputo utilizado junto con el software ANSYS tienen las siguientes características:

TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DE EQUIPO DE CÓMPUTO

Dispositivo	Característica
Ordenador	HP Elite Desk
Procesador	Intel Core I7
Número de núcleos	8
Memoria RAM	16 GB

TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

Dispositivo	Característica
Interfaz	Workbench
Software	ANSYS
Versión	17.0
Licencia	Académica
Solucionador	CFX

### 3.1.1 Volumen de control

El dominio computacional o volumen de control, para efectos de simulación está conformado por el cuerpo de la estructura de vórtice; Canal de entrada, canal de transición, tanque de circulación y orificio de descarga. Éstos tres últimos serán los puntos de mayor interés, al desarrollarse en ellos los fenómenos a estudiar.

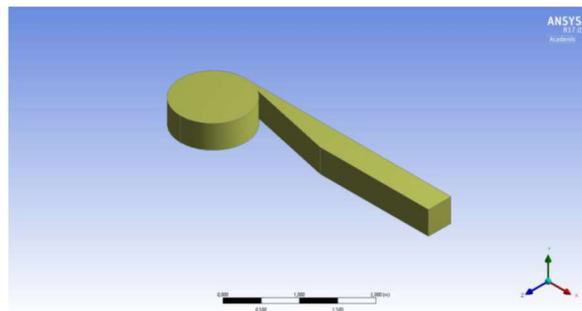


FIGURA 12. VOLUMEN DE CONTROL

### 3.1.2 Mallado

Una vez creada la geometría del modelo y definido el dominio de convergencia, será necesario representarlo para poder usar el método numérico, éste trabaja en base a una malla de elementos finitos.

El mallado se generará automáticamente en el volumen de control utilizando el módulo Meshing de ANSYS CFX, la geometría de los elementos a utilizar será tetraédrico, ya que con éstos el número de elementos por nodo será mayor, se tendrá una malla más simétrica y por lo tanto una resolución interna más precisa [16].

La preferencia física por defecto fue basada en CFD, mediante el solucionador de referencia CFX, la relevancia será de 0, lo cual indica una malla más fina para elementos de 0,25 mm de longitud.

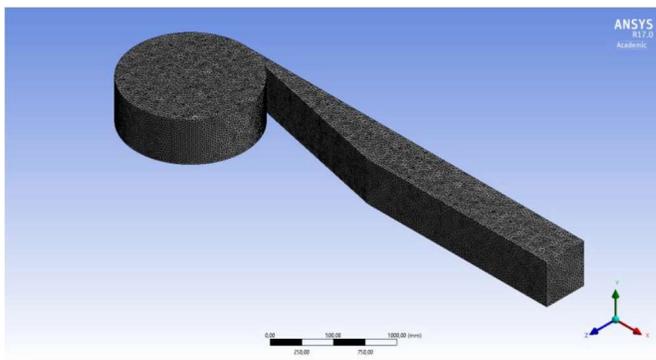


FIGURA 13. MALLADO DEL VOLUMEN DE CONTROL

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA

Descripción	Cantidad
Nodos	136471
Elementos	746344
Métrica	skewness

### 3.1.3 Configuración de la simulación

El tipo de análisis a realizar es de carácter transitorio, el cual permite observar las fluctuaciones en el campo de flujo del vórtice gravitacional, desde el inicio de la formación del movimiento Coriolis hasta la estabilidad del mismo [15].

Se tomarán 10 minutos de simulación para cada escenario de caudal (15, 25, 40 y 60 l/s), a un paso de tiempo de 0.001 s, lo cual proporcionará resultados más precisos y con mayor resolución. El criterio de convergencia de la simulación está definido en  $1 \times 10^{-5}$  del valor de la variable.

Con el propósito de establecer las condiciones de frontera se dividirá el volumen de control en tres secciones principales; Entrada (Intlet), superior (Opening), Salida (Outlet) y paredes (Wall), ver Figuras 11, 12, 13 y 14, respectivamente). Las condiciones de simulación son las siguientes:

TABLA 9. DETALLES DEL ANÁLISIS

Descripción	Correspondencia
Tipo de análisis	Transitorio
Tiempo de simulación	10 Segundos
Paso de simulación	0.001 Segundos
Tiempo inicial	0 Segundos
Tipo de fluido	Agua
Presión de referencia	1 atm
Gravedad	$9.81 \text{ m/s}^2$
Temperatura de referencia	25 °C
C. de tensión superficial	0.072 N/m
Superficie	Continua

La velocidad definida, para cada una de las condiciones de caudal se almacenará en la variable "Velocidad" y tendrá valores de 0.0872, 0.1453, 0.2326 y 0.3488 m/s, respectivamente. Se definirán condiciones de frontera y variables para cada sección del volumen de control:

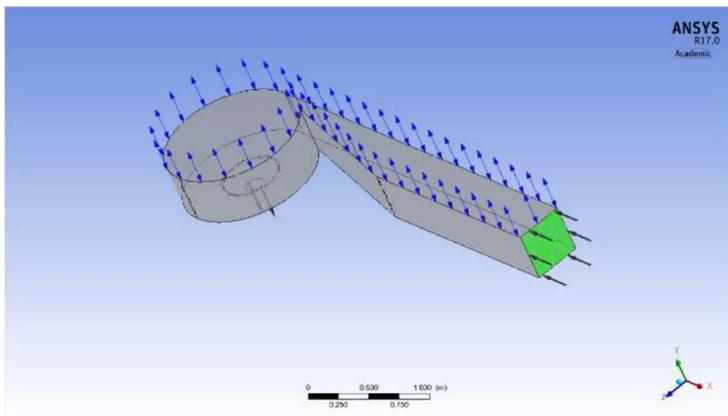


FIGURA 14. SECCIÓN DE ENTRADA (INTLET)

TABLA 10. DETALLES DE INTLET

Descripción	Correspondencia
Régimen de flujo	Subsónico
Velocidad nominal	"Velocidad"
Turbulencia	5%
Agua	100%
Aire	0%

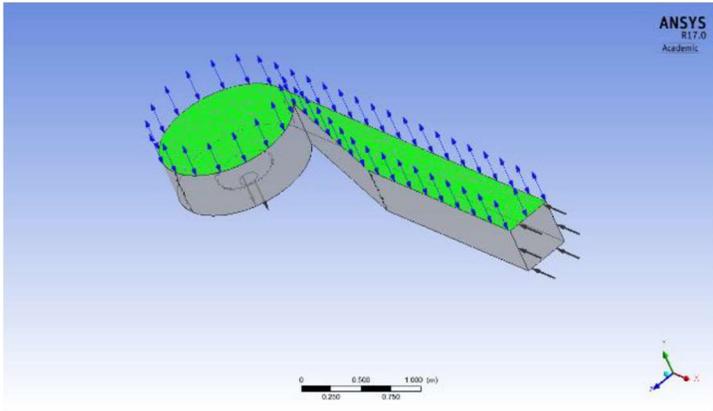


FIGURA 15. SECCIÓN SUPERIOR (OPENING)

TABLA 11. DETALLES DE OPENING

Descripción	Correspondencia
<i>Régimen de flujo</i>	<i>Subsónico</i>
<i>Presión relativa</i>	<i>0 Pa</i>
<i>Turbulencia</i>	<i>5%</i>
<i>Agua</i>	<i>0%</i>
<i>Aire</i>	<i>100%</i>

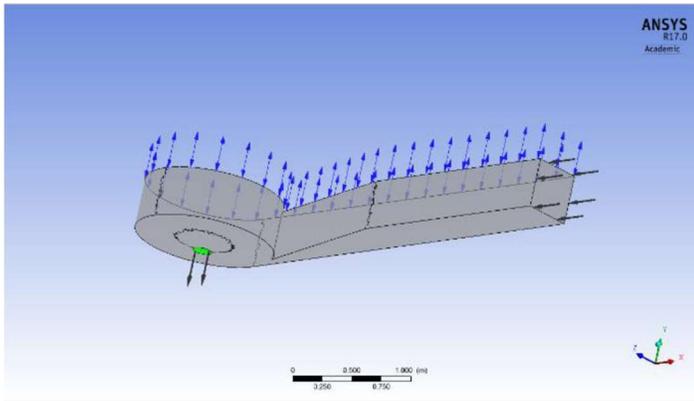


FIGURA 16. SECCIÓN DE SALIDA (OUTLET)

TABLA 12. DETALLES DE OUTLET

Descripción	Correspondencia
<i>Régimen de flujo</i>	<i>Subsónico</i>
<i>P. Estática media</i>	<i>0 Pa</i>
<i>C. Presión perfil</i>	<i>0.05</i>
<i>Presión media</i>	<i>Promedio sobre la salida de todo</i>

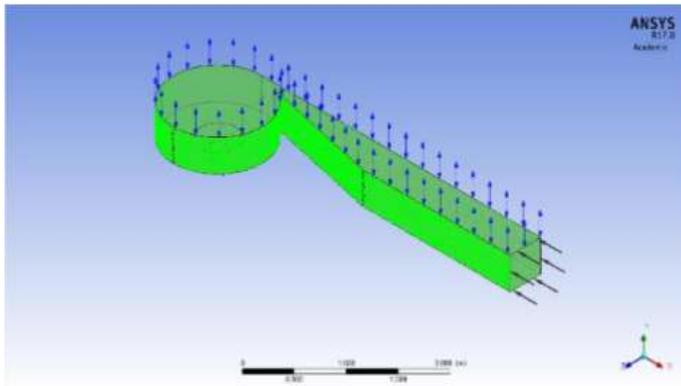


FIGURA 17. PAREDES DEL VOLUMEN DE CONTROL (WALL)

TABLA 13. DETALLES DE WALLS

Descripción	Correspondencia
<i>Masa y momento</i>	<i>Sin muro de deslizamiento</i>
<i>Rugosidad</i>	<i>Pared lisa</i>
<i>Pares de fluido</i>	<i>Agua   Aire</i>

### 3.2 Diseño

El diseño de un sistema de generación de energía vórtice gravitacional, está ligado a las condiciones de caudal y velocidad del agua. Para el caso del modelo a desarrollar también fue necesario considerar las dimensiones geométricas donde se desarrollarán los ensayos. Se utilizará el túnel de agua disponible en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Las condiciones de este túnel se referencian en la Tabla 1.

TABLA 14. CARACTERÍSTICAS TÚNEL DE AGUA UNIVERSIDAD NACIONAL

Variable	Magnitud	Unidad
Caudal Máximo	60	l/s
Velocidad Máximo	0.37	m/s
Ancho del canal	0.41	m
Alto del canal	0.60	m

Para poder tener en cuenta los resultados y conclusiones obtenidas por Zotlöterer y UTPL se debe elaborar un análisis dimensional para asegurar la similitud dinámica y geométrica. La hidrodinámica de la generación de energía por vórtice gravitacional, se caracteriza por presentar un comportamiento de régimen turbulento, debido a la presencia del vórtice inducido, esta característica encuentra en el número de Froude (Ecuación 6) un parámetro determinante para realizar la semejanza dinámica del sistema, ya que la gravedad es un factor de mucha influencia en el movimiento del fluido representado en el vórtice inducido.

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \times L}} \quad (6)$$

En cuanto a la semejanza geométrica está ligada a las relaciones entre las dimensiones del prototipo del ingeniero Zotlöterer, con respecto a las dimensiones del modelo en construcción.

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad (7)$$

El sistema de generación por vórtice gravitacional en su composición estructural, consta de un canal de entrada, un canal de transición, un tanque de circulación y un cono de descarga. Para el diseño del modelo, se realiza una relación de semejanza geométrica y dinámica por medio de iteraciones que permitieran establecer, las condiciones del modelo ajustados a las limitantes del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional -sede Medellín (Tabla 15), se trabajó con un modelo escala de 1:4,58 con respecto al prototipo construido por el Ingeniero Franz Zotlöterer, la escala se establece gracias a los resultados de la iteración que relaciona límites dinámicos y geométricos para el modelo Tabla 16.

TABLA 15. LÍMITES DE LA ITERACIÓN

Variable	Magnitud	Unidad
Caudal prototipo (Qp)	1	m <sup>3</sup> /s
Diámetro prototipo (Dp)	5.5	m
Caudal máximo modelo (Qm)	0.06	m <sup>3</sup> /s
Diámetro máximo modelo (Dm)	1.2	m

TABLA 16. RESULTADOS ITERACIONES MODELO

$D_m$	$\frac{D_p}{D_m} = \lambda$	$\lambda^5$	$Q_m = \frac{Q_p}{\lambda^5}$
0.8	6.87	123.93	0.008
0.9	6.11	92.32	0.011
1	5.5	70.94	0.014
1.1	5.00	55.90	0.018
1.2	4.58	44.97	0.022
1.3	4.23	36.81	0.027
1.4	3.92	30.59	0.033
1.5	3.66	25.74	0.039

### 3.2.1 Diseño del tanque de circulación y cono de descarga

Para la obtención del diámetro del tanque de circulación, diámetro superior cono de descarga y altura cono de descarga, se realiza una relación de semejanza geométrica con relación al tanque del prototipo del ingeniero Zotlöterer utilizando la ecuación (8), y en relación a la escala establecida gracias a las iteraciones de semejanza geométrica y dinámica realizadas con anterioridad.

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad (8)$$

$$\text{Diámetro tanque circulación} = \frac{5.5 \text{ m}}{4.58} = 1.20 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro superior cono descarga} = \frac{2.2 \text{ m}}{4.58} = 0.48 \text{ m}$$

$$\text{Altura cono descarga} = \frac{0.40 \text{ m}}{4.58} = 0.087 \text{ m}$$

Para determinar el diámetro del orificio de descarga se obtiene bajo la relación del diámetro del orificio del cono de descarga ( $d$ ) y el diámetro del tanque de circulación ( $D$ ), relación del 14% y 18% para bajas y altas diferencias de carga [12] ver (9).

$$d = D * 0.14 \quad (9)$$
$$d = 1.20 \text{ m} * 0.14 = 0.168 \text{ m}$$

Si se realiza una relación de semejanza geométrica apoyados en la ecuación (8) se puede evidenciar que efectivamente los resultados son acordes, con relación al orificio de descargo del prototipo del ingeniero Zotlöterer.

$$d = \frac{0.77 \text{ m}}{4.58} = 0.168 \text{ m}$$
 e de circulación y según ensayos realizados con anterioridad, los mayores valores de velocidad angular azón de la base de entrada del tanque de circulación / diámetro de orificio de salida ( $be/d$ ) de 0,52 [10]

$$be = 0.52 * d \quad (10)$$
$$be = 0.52 * 0.168 \text{ m} = 0.087 \text{ m}$$

### 3.2.2 Diseño del canal de entrada

Para la obtención la longitud del canal de entrada se realiza una relación de semejanza geométrica con relación al canal del prototipo del ingeniero Zotlöterer utilizando la ecuación (8), y en relación a la escala establecida gracias a las iteraciones de semejanza geométrica y dinámica realizadas con anterioridad.

$$\text{Longitud canal entrada} = \frac{5.5 \text{ m}}{4.58} = 1.20 \text{ m}$$

### 3.2.3 Diseño del canal de transición

Para obtener la longitud del canal de transición, se hace necesario conocer primero la base del canal de entrada y la base de entrada del tanque de circulación, además que el ángulo máximo entre el eje del canal y una línea que une los dos lados de transición a la entrada y a la salida no exceda 12. 5°, para este cambio entre la base del canal de entrada y la base del tanque de circulación, la transición debe hacerse de forma gradual de tal forma que las pérdidas de carga sean mínimas y evitar el desprendimiento de la capa límite [11]. Para poder encontrar el base del canal de entrada se utilizó la ecuación de la continuidad (11), ya que es requerida el área transversal del canal para encontrar la base del mismo según la teoría de canales abiertos (12) [11];

$$Q = A * V \quad (11)$$

$$A = 2 * y^2 \quad (12)$$

$$y = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (13)$$

Con base en la ecuación (14) donde el número de Froude es un parámetro determinante para realizar la semejanza dinámica del sistema, dada la importancia de la gravedad en el mismo; se halló la velocidad del fluido por semejanza dinámica con respecto al prototipo construido por Zotlöterer, de esta manera tener la información requerida para hallar el área transversal del canal y por consiguiente el tirante o perímetro mojado.

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \times L}} \quad (14)$$

$$F = \frac{v_m}{\sqrt{L_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{L_p}} \quad (15)$$

$$\frac{v_p^2}{v_m^2} = \frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad (16)$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\lambda} \quad (17)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{v_p^2}{\lambda}} = \sqrt{\frac{(0.9 \text{ m/s})^2}{4.58}} = 0.42 \text{ m/s}$$

Ya definida la velocidad del modelo bajo semejanza dinámica es posible encontrar el área transversal bajo la ecuación de la continuidad.

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0.060 \text{ m}^3/\text{s}}{0.42 \text{ m/s}} = 0.14 \text{ m}^2$$

Por consiguiente, se realiza el cálculo del tirante o perímetro mojado dentro del canal (18) [11]

$$y = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (18)$$

$$y = \sqrt{\frac{0.14 \text{ m}^2}{2}} = 0.26 \text{ m}$$

Con el área transversal definida y al igual que el perímetro mojado se tiene el material necesario para hallar el base del canal de entrada, esta medida de igual forma corresponde a la altura del canal [11].

$$b = \frac{A}{y} \quad (19)$$

$$b = \frac{0.14 \text{ m}^2}{0.26 \text{ m}} = 0.53 \text{ m}$$

Con el criterio de los 12.5° [11] se pudo determinar la longitud del canal de transición, utilizando la ecuación (20):

$$L = \frac{T - be}{\tan 12.5^\circ} \quad (20)$$

$$L = \frac{0.53 \text{ m} - 0.087 \text{ m}}{\tan 12.5^\circ} = 1.99 \text{ m}$$

### 1.1.4 Cálculo de la potencia

El cálculo teórico de la potencia para un sistema de generación por vórtice gravitacional esta dado para la ecuación (21), esta formulación tiene asociada la densidad del fluido, la gravedad, el caudal y la altura del vórtice. Esta última variable y considerando que el vórtice forzado es producido en un líquido con superficie libre, en donde la presión es atmosférica, siendo esta constante se puede concluir [10].

$$P = Z_v * g * \rho * Q \quad (21)$$

$$Z_v = \left( \frac{V_z^2}{2g} \right) \quad (22)$$

## 4. Resultados

Los resultados del diseño descrito en el numeral 3.2 se muestran en planos anexos a este artículo. En lo que respecta a la simulación en modo transitorio, se obtuvieron resultados para el escenario de caudal 1; 15 l/s, donde se destaca la correcta formación del vórtice y aumento sustancial de la velocidad en el canal de transición (Figura 18), lo que indica un correcto diseño de la estructura.

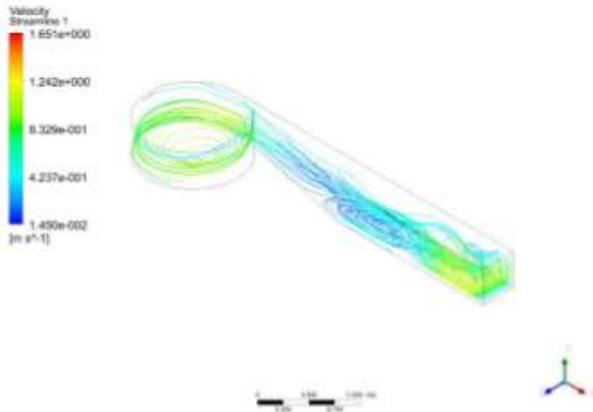


FIGURA 18. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN A CAUDAL 15 L/S.

Las simulaciones realizadas convergen dentro de los parámetros preestablecidos, una muestra de ello son los residuos de la simulación (ver Figura 19), los cuales no superan el criterio de convergencia ( $1 \times 10^{-5}$  del valor de la variable), defino de esa manera en la configuración de la simulación.

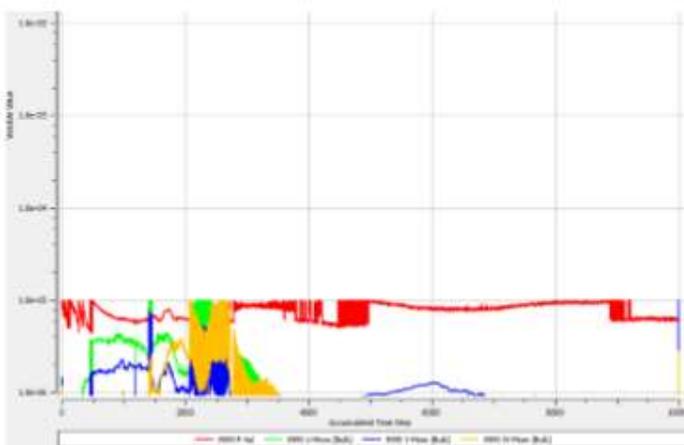


FIGURA 19. RESIDUOS DE LA SIMULACIÓN.

Al realizar análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de las cinco turbinas utilizadas en la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), se obtuvieron hallazgos importantes que difieren los resultados iniciales. Mediante un análisis adimensional entre potencia y torque en relación con la geometría de la turbina, se obtuvo como resultado que la turbina denominada como número uno a 0.050 m<sup>3</sup>/s presenta la mejor eficiencia en relación a su geometría. en la Figura 20 se puede evidenciar el comportamiento de las turbinas; según las conclusiones de grupo de investigadores de la UTPL la turbina denominada como cuatro es para ellos la de mejor comportamiento.

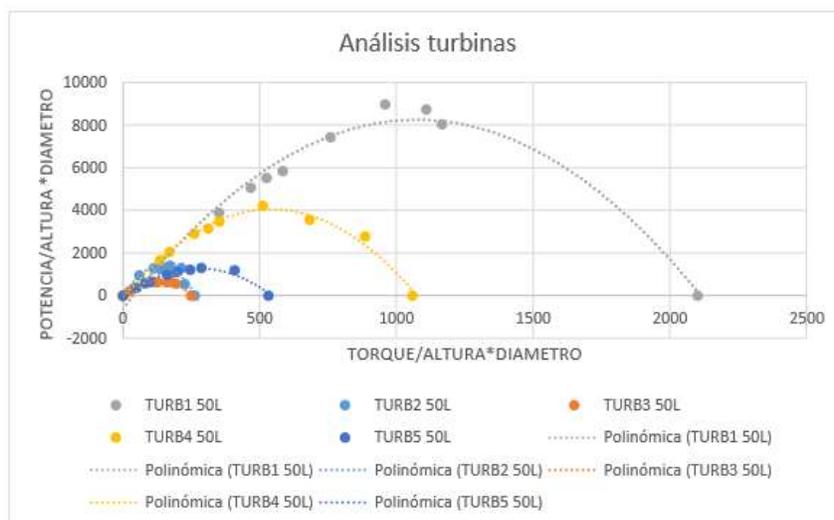


FIGURA 20. ANÁLISIS ADIMENSIONAL TURBINAS FUENTE: AUTORES

## 5. Conclusiones

Durante la investigación y diseño del modelo para generación de energía por vórtice gravitacional, en lo que respecta a turbinas de vórtice gravitacional, éstas convergen para alturas entre 0,5 y 5 m, y para caudales entre 0,1 y 4 m<sup>3</sup>/s; lo que indica que es posible tener potencias instaladas que oscilan entre 1 y 180 kW, estas condiciones permiten explorar niveles dentro del ábaco de turbinas hidráulicas no utilizadas tradicionalmente (Figura 10), lo que permite aprovechar un potencial energético importante teniendo en consideración la riqueza hídrica del país.

Desde el punto de vista de las turbinas para vórtice gravitacional ya que no son de uso extendido existen altas carencias de estudios y técnicas, que permitan instruir sobre las metodologías y técnicas para su construcción.

Los niveles de potencia para este tipo de tecnología son relativamente bajos sin embargo tienen un amplio potencial, ya que utiliza zonas que los sistemas hidroeléctricos tradicionales no usan.

Las investigaciones recientes soportan los resultados dimensionales de gran parte de la estructura en teorías de modelado, realizando construcciones a tipo escala lo que refleja un gran potencial de investigación y un vacío importante que incentiva a buscar fundamentos científicos que den fidelidad al sistema.

En Colombia existe un muy amplio potencial hídrico que converge dentro de las condiciones de operación del sistema de generación de energía por vórtice gravitacional, lo que permite y además incentiva en profundizar más en las investigaciones de esta tecnología así promoverla y suplir las carencias energéticas actuales en las zonas no Interconectadas del país.

## 6. Bibliografía

- [1] D. G. Callejas, «Acceso a electricidad y calidad de vida,» Acceso a electricidad y calidad de vida, 16 03 2016.
- [2] U. d. P. M. E. -. UPME, «Atlas Potencial Hidroenergético de -colombia,» Bogotá, Colombia, 2015.
- [3] J. Hasslberger, «hasslberger,» hasslberger, [En línea]. Available: [http://www.hasslberger.com/tecno/tecno\\_10.htm](http://www.hasslberger.com/tecno/tecno_10.htm). [Último acceso: 13 02 2016].
- [4] ZOTLOETERER, «ZOTLOETERER,» [En línea]. Available: <http://www.zotloeterer.com/welcome/>. [Último acceso: 15 03 2016].
- [5] U. P. d. Loja, «UTPL,» 21 02 2014. [En línea]. Available: <http://www.utpl.edu.ec/comunicacion/nueva-forma-de-generar-energia-renovable/>. [Último acceso: 18 02 2016].

- [6] IPSE, «Atención a su solicitud 20151330039792,» Bogotá, Colombia, 2015.
- [7] G. Patents, «Google Patents,» Google Patents, 22 07 2004. [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/WO2004061295A2/en?q=vortex&q=gravitation>. [Último acceso: 23 08 2015].
- [8] J. C. Peña Salazar, «Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de hidrogenación,» Loja, Ecuador, 2013.
- [9] I. S. Monsalve, «Turbinas Hidráulicas,» UdeA, Medellín, Colombia, 2014.
- [10] G. A. T. Casiera, «Algunas características hidrodinámicas de un vórtice inducido en un cilindro por una corriente de agua,» Bogotá, Colombia, 2012.
- [11] V. T. Chow, Hidraulica de Canales Abiertos, McGraw - Hill Interamericana S.A., 1994.
- [12] P. H. S. Mulligan, «Desing and Optimisation Of a Water Vortex Hidropower Plant,» 2013.
- [13] H. V. R. Azuero, «Diseño de una Central Minihidráulica basada en Vórtice Gravitacional,» UTPL, Loja, Ecuador, 2014.
- [14] E. C. Patiño Armijos, «Estudio del comportamiento hidraulico a través de un sistema de vortice gravitacional utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional,» UTPL, Loja, Ecuador, 2014.
- [15] ANSYS, «ANSYS HELP».
- [16] A. B. T. R. D. D. F. T. R. B. H. P. P. N. A. A. M. N. Sagar Dhakal, «Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant,» ELSEVIER, vol. 48, p. 669, 2015.
- [17] J. M. C. Sánchez, «Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo aplicadas flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos compuacional (CFD),» Cartagena, España., 2014.

## Una Aproximación a la Fabricación de Capacitores Eléctricos Mediante el Compuesto LiNbO<sub>3</sub>

### An approximation to the manufacture of electrical capacitors by compound LiNbO<sub>3</sub>

Andrés Arias<sup>1\*</sup>, Viancy Isaza<sup>1</sup>, Sebastián Márquez<sup>1</sup>, Carlos Maya<sup>1</sup>, Bayron Alvarez<sup>1</sup>, J. Doria<sup>1</sup>, A. Gómez<sup>2</sup>, L.M Baena<sup>3</sup>, J.L. Izquierdo<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Institución Universitaria Pascual Bravo, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materialografía, Grupo GIEN, Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo de Materiales Cerámicos y Vítreos, Medellín, Colombia

<sup>3</sup>Instituto Tecnológico Metropolitano, Ciencias Económicas Y Administrativas, Grupo De Calidad, Metrología Y Producción, Línea Transformación Avanzada de Materiales, Medellín, Colombia

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Básica, Grupo de Materiales Cerámicos y Vítreos, Medellín, Colombia

Institución Universitaria Pascual Bravo

E-mail: [jorge.izquierdo@pascualbravo.edu.co](mailto:jorge.izquierdo@pascualbravo.edu.co); [andr.arias@pascualbravo.edu.co](mailto:andr.arias@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

En este trabajo, muestras policristalinas de los compuestos LiNbO<sub>3</sub> (LN) fueron obtenidas por el método de reacción en estado sólido a partir de precursores de alta pureza [Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (99.8%), Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (99.98%)]. Se realizó un estudio experimental sobre las propiedades morfológicas, estructurales, ferroeléctricas y dieléctricas a temperatura ambiente (300° K) de dichos sistemas.

Para un análisis más detallado de las propiedades de estos compuestos, se realizaron medidas dieléctricas implementando la técnica de espectroscopia de impedancia compleja (CIS) en un rango de baja frecuencia (5 mHz – 200 kHz) a una temperatura de 300 °K, éste se realizó usando el analizador de impedancia HIOKI 3532-50 empleando una configuración de dos electrodos de plata y una celda para control de atmosfera. Para garantizar la cristalinidad de las muestras se hizo el estudio de las propiedades estructurales por medio de difracción de rayos X (DRX) obteniéndose un compuesto monofásico dentro del límite de resolución de esta técnica. En el análisis por refinamiento Rietveld mediante el software Maud permitió caracterizar la estructura cristalina ortorrómbica.

A su vez, la medida de transporte eléctrico señala un comportamiento semiconductor en el rango de temperatura medido, con valores del orden aproximado de los giga-ohm (10<sup>9</sup> Ω), cuyo valor es deseado en sistemas para aplicaciones tecnológicas en materiales

dieléctricos, comúnmente utilizados para almacenamiento de energía eléctrica. Las curvas de polarización eléctricas revelan el carácter ferroeléctrico a temperatura ambiente.

**Palabras claves:** piezoelectricidad, ferroelasticidad, grupo espacial.

## Abstract

In this work, polycrystalline samples of LiNbO<sub>3</sub> (LN) compounds were obtained by the reaction method in solid state from precursors of high purity [Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (99.8%), Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (99.98%)]. An experimental study on morphological, structural properties, ferroelectric and dielectric at room temperature (300 K) of such systems.

For a more detailed analysis of the properties of these compounds, dielectric measurements were implemented (CIS) complex impedance spectroscopy technique in a low frequency range (5 mHz - 200 kHz) at a temperature of 300 ° K, this was carried out using the Analyzer's impedance HIOKI-3532-50 using a configuration of two electrodes of silver and a cell to control atmosphere.

To ensure the crystallinity of them samples is made the study of them properties structural by means of diffraction of rays X (XRD) obtaining is a composite single phase within the limit of resolution of this technical. Analysis by Rietveld refinement the Maud software allowed to characterize the Orthorhombic crystal structure.

At the same time, electrical transport measurement designates a semiconductor behavior in the measured temperature range, with values of the approximate order of the giga-ohm (10<sup>9</sup> Ω), whose value is desired in systems for technological applications in dielectric materials, commonly used for storage of electrical energy. Electric polarization curves reveal the room temperature ferroelectric character.

**Keywords:** Piezoelectricity, ferroelectricity, space group.

## 1. Introducción

El tema ambiental ha sido una preocupación no solo de los ecologistas, sino también de los investigadores. La principal preocupación es acerca de la eliminación de equipos electrónicos que presentan en su composición cerámicos a base de metales pesados, como es el caso del titanato zirconato de plomo. La búsqueda de una solución de este problema tiene fomentado el descubrimiento de cerámica sin plomo. Un material que ha sustituido con éxito este tipo de cerámicos son los niobatos alcalinos. El niobio tiene propiedades específicas que lo hacen atractivo en muchas aplicaciones, además de causar un bajo impacto ambiental.

Los niobatos tienen propiedades ferroeléctricas, dieléctricas y piezoeléctricas y una estructura cristalina llamada estructura perovskita (ANbO<sub>3</sub>). El LiNbO<sub>3</sub> (Niobato de Litio) ha sido estudiado debido a sus sucesivas transiciones de fases en la estructura perovskita.

A pesar de estas prometedoras propiedades, pocos estudios hasta ahora han sido reportados sobre la síntesis y sinterización de los compuestos Niobato de Litio y Potasio policristalino. La investigación que se quiere desarrollar en este trabajo para la obtención de LiNbO<sub>3</sub> en forma policristalinas puede ser relevante desde las propiedades eléctricas y ópticas de dieléctricos cerámicos dependiendo fuertemente de su microestructura, lo cual es principalmente influenciado por el método de síntesis de los polvos y los procesos de sinterización.

El proceso de síntesis para la obtención de las muestras se realizará mediante el método de reacción en estado sólido.

## 2. Propiedades Estructurales

Las muestras de los compuestos cerámicos de LiNbO<sub>3</sub> tratadas térmicamente, se caracterizaron estructuralmente por medio de la técnica de difracción de rayos X con el objetivo de comprobar que se estaba obteniendo con el proceso de síntesis una fase única propia de estos materiales.

### Difracción de Rayos X

Los datos de difracción de rayos X del compuesto cerámico LiNbO<sub>3</sub> fue obtenido a partir de la mezcla estequiométrica de los reactivos (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), con tratamiento térmico y pesado con la cantidad estequiométrica hallada anteriormente, los difractogramas resultantes por este método fueron obtenidos a temperatura ambiente con un difractómetro Panalytical X'Pert Powder antes mencionado.

Los difractogramas fueron tomados en una geometría Bragg-Brentano en configuración  $\theta$ - $2\theta$  con radiación Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=0.15406$  nm). Aquí,  $2\theta$  corresponde al ángulo entre la radiación incidente y el detector siendo  $\theta$  correspondiente al ángulo de Bragg. Los difractogramas fueron tomados en un rango comprendido entre 15-80° con paso de 0.013°. En este tipo de medición, el detector se mueve con un paso que es el doble de la muestra.

En el DRX se observó que no hay fases secundarias que puedan alterar la estructura cristalina, se observan los picos correspondientes a la estructura buscada. Inicialmente apunta a que se pueden tener las propiedades deseadas. Para corroborar los resultados del ensayo DRX posteriormente se realizó el refinamiento Rietveld comparando la fase obtenida experimentalmente con espectros teóricos encontrados en bases de datos. Los picos predominantes son los correspondientes a los planos (012), (104), (110), (113), (024), (116) y (211) (ver figura 1).

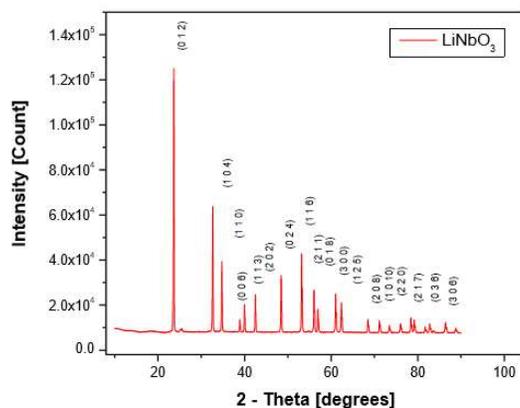


Figura 1. Espectro DRX del compuesto LiNbO3

### Refinamiento Rietveld

El refinamiento y análisis del patrón de difracción del compuesto cerámico LiNbO3 se obtuvo mediante el uso del software MAUD (Material Analysis Using Diffraction) el cual permite calcular el patrón de difracción de rayos X teóricos descargados de la base de datos de ICSD, mediante los valores de los parámetros de red cristalina y grupo espacial calculados con el MAUD, y compararlo con los conseguidos experimentalmente, obteniendo de este modo que la estructuras se ajustan a la cristalización de dichas perovskitas. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Es importante anotar que al comparar los difractogramas teóricos con los experimentales en el software MAUD se observa una pequeña diferencia de fase, debida a que los parámetros de red teóricos son aproximados (no iguales) a los obtenidos experimentalmente mediante la técnica de difracción de rayos X. Sin embargo, esta diferencia de fase se soluciona ajustando estos parámetros mediante el programa MAUD, hasta que se observa una mayor similitud.

Los resultados de este procedimiento indican que la muestra cerámica sinterizada, usando el proceso de reacción en estado sólido, poseen una estructura cristalina ortorrómbica con un grupo espacial P222 y con parámetros de red  $a= 5.1544995 \text{ \AA}$ ,  $b= 5.1544995 \text{ \AA}$ ,  $c= 13.868181 \text{ \AA}$  los cuales son muy cercanos a los parámetros de red reportados en la literatura.

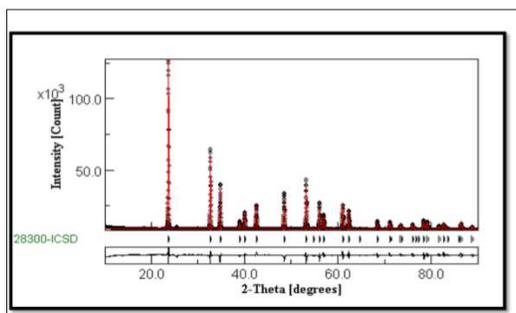


Figura 2. Refinamiento Rietveld del compuesto LiNbO3

### 3. Referencias

- [1] D. Fu, T. Arioka, H. Taniguchi, T. Taniyama, M. Itoh, Appl. Phys. Lett. 99 (2011) 012904
- [2] M. Aballe, J. López Ruiz, J.M. Badía y P. Adeva, Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X, CSIC, España (1996).
- [3] Seidel, P. B. omas, H. and Hoffmann, W., Temperature dependence of the birefringence at the phase transition of NaNbO3 P- NaNbO3 No. Ferroelectrics, 1978, 18, 243.
- [4] Nitta, T., Properties of sodium-lithium niobate solid solution ceramics with small lithium concentrations. J. Am. Ceram. Soc., 1968, 51 (11), 626.
- [5] Hardiman, B., Henson, R. M., Reeves, C. P. and Zeyfang, R. R., Hot pressing of sodium lithium niobate ceramics with perovskite-type structures. Ferroelectrics, 1976, 12, 157.
- [6] Henson, R. M., Zeyfang, R. R. and Kiehl, K. V., Dielectric and electromechanical properties of (Li, Na) NbO3 ceramics. J. Am. Ceram. Soc., 1977, 60 (1-2), 15.

# Ubicación y Operación Eficiente de Almacenadores de Energía en Micro-Redes en Presencia de Generación Distribuida

## Optimal Location and Operation of Energy Storage Devices in Microgrids in Presence of Distributed Generation

O. D. Montoya<sup>1</sup>, A. Grajales<sup>2</sup>, L. F. Grisales<sup>3</sup> y C. A. Castro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

<sup>2</sup>XM Compañía de Expertos en Mercados S.A.E.S.P, Medellín, Colombia.

<sup>3</sup>Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

<sup>4</sup>Universidad Estatal de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

E-mail: [o.d.montoyagiraldo@ieee.org](mailto:o.d.montoyagiraldo@ieee.org), [luisgrisales@itm.edu.co](mailto:luisgrisales@itm.edu.co), [agrajales@xm.com.co](mailto:agrajales@xm.com.co) y [ccastro@ieee.org](mailto:ccastro@ieee.org)

### Resumen

En este trabajo se propone una metodología eficiente para la localización y operación óptima de almacenadores de energía (AE) en micro-redes (MR) a través de un modelo de programación lineal entera mixta (MPLEM). El modelo matemático desarrollado corresponde a un modelo de despacho económico para micro-redes (DEMR) con presencia de generación distribuida (GD) a partir de recursos energéticos renovables. Como función objetivo se considera la minimización de los costos de compra de energía en la bolsa por parte del agente operador de red teniendo en cuenta dos escenarios de operación; el primer escenario considera con precio de energía fijo y el segundo con precios variables en el nodo que conecta la MR al sistema de potencia para un horizonte operativo de 24 horas. Como restricciones se consideran los flujos de potencia por la línea a través de un modelo de flujo en redes, las capacidades de almacenamiento de los AE y las capacidades horarias de generación de potencia en los GD. Para solucionar el MPLEM propuesto es empleado el paquete de optimización comercial GAMS empleando el solver CPLEX. La metodología propuesta permite localizar, dimensionar y operar los AE considerando como horizonte de operación un día típico laboral en Colombia, adicionalmente se tienen en cuenta diferentes consignas operativas en la operación de los AE según los estándares existentes. Con el fin de conocer las variables de estado de la MR, es empleado un flujo de potencia del tipo barrido iterativo para evaluar las respuestas obtenidas por el MPLEM, esta evaluación permite hallar los costos operativos reales de la MR. Para validar el modelo matemático propuesto es empleado un sistema de prueba de la literatura especializada de 7 nodos con presencia de dos GD's, uno de ellos fotovoltaico y el otro eólico. Los resultados obtenidos muestran la eficiencia del modelo matemático desarrollado, su facilidad de implementación y la capacidad de adaptación para sistemas de mayor tamaño.

**Palabras claves:** Almacenadores de energía, despacho económico, flujo de potencia, generación distribuida, micro-redes, programación lineal entera.

### Acrónimos

A continuación, se presentan las abreviaciones empleadas en la redacción de este documento.

AE	:	Almacenadores/almacenamiento	de
		energía.	
DE	:	Despacho económico	
DEMR	:	Despacho económico en micro-redes.	
GAMS	:	Sistema de modelado algebraico general	
		que incluye el <i>solver</i> CPLEX.	
GC	:	Generación convencional.	
GD	:	Generación distribuida.	
MR	:	Micro-redes	
MPLEM	:	Modelo de programación lineal entera	
		mixta.	
OR	:	Operador de red.	
RED	:	Recursos energéticos distribuidos.	

## Nomenclatura

A continuación, se presenta la nomenclatura empleada en los modelos matemáticos presentados en este trabajo.

### Conjuntos:

- $\Omega_B$  : Conjunto que contiene todos los tipos de AE disponibles.
- $\Omega_G$  : Subconjunto que contiene todos los nodos que tienen una fuente de generación distribuida o convencional.
- $\Omega_L$  : Conjunto que contiene todos los tramos de red.
- $\Omega_N$  : Conjunto que contiene todos los nodos de la red.
- $\Omega_T$  : Conjunto que contiene todos los intervalos de tiempo del período de estudio.

### Índices:

- $b$  : Índice asociado a los AE.
- $i$  : Índice asociado a los nodos de la red.
- $ij$  : Índice asociado a los tramos de red.
- $i$  : Índice asociado a los nodos de la red.
- $t$  : Índice asociado a los períodos de estudio.

### Parámetros:

- $CC(b)$  : Costo de compra de un AE tipo  $b$  [\\$].
- $CI_B^{\max}$  : Límite máximo de inversión en AE [\\$].
- $C_{gc}(t,i)$  : Costo de compra de energía en bolsa para el generador convencional conectado al nodo  $i$  en el período  $t$  [\$/kWh]
- $EB_{\max}(b)$  : Límite máximo de almacenamiento de energía de un AE tipo  $b$  [kWh].
- $EB_{\min}(b)$  : Límite mínimo de almacenamiento de energía de un AE tipo  $b$  [kWh].
- $P_d(t,i)$  : Potencia activa demanda en el nodo  $i$  en el período  $t$  [kW].
- $F_{\max}(ij)$  : Límite máximo de flujo de potencia activa entre los nodos  $i$  y  $j$  [kW].
- $P_{gc}^{\max}(i)$  : Límite máximo de generación de potencia activa de un generador convencional conectado al nodo  $i$  [kW].
- $P_{gc}^{\min}(i)$  : Límite mínimo de generación de potencia activa de un generador convencional conectado al nodo  $i$  [kW].
- $P_{gd}^{\max}(i)$  : Límite máximo de generación de potencia activa de un generador distribuido conectado al nodo  $i$  [kW].
- $P_{gd}^{\min}(i)$  : Límite mínimo de generación de potencia activa de un generador distribuido conectado al nodo  $i$  [kW].
- $SoC_F(b,i)$  : Estado final de carga de un almacenador de energía tipo  $b$  conectado al nodo  $i$  [%].

$TC(b)$	: Tiempo de carga del AE tipo $b$ [h].
$TD(b)$	: Tiempo de descarga del AE tipo $b$ [h].
$\Delta_T$	: Longitud de los periodos de tiempo considerados [h].
$\varphi(b)$	: Coeficiente de eficiencia asociado la carga/descarga de un AE tipo $b$ [%].
<i>Variables continuas:</i>	
$P_{gc}(t,i)$	: Potencia activa generada por un generador convencional conectado al nodo $i$ en el periodo $t$ [kW].
$P_{gd}(t,i)$	: Potencia activa generada por un generador distribuido conectado al nodo $i$ en el periodo $t$ [kW].
$P(t,b,i)$	: Potencia activa generada/consumida por un AE tipo $b$ conectado al nodo $i$ en el periodo $t$ [kW].
$SoC(t,b,i)$	: Estado de carga de un AE tipo $b$ conectado al nodo $i$ en el periodo $t$ [%].
<i>Variables binarias:</i>	
$x(b,i)$	: Variable de decisión que toma el valor de uno (1) si un AE tipo $b$ es conectado al nodo $i$ . En caso contrario toma el valor de cero (0).

## 1. Introducción

El desarrollo tecnológico ha sido el pilar fundamental de la evolución de la sociedad en el siglo XXI y en este sentido, los sistemas eléctricos se convierten en la base de todo el sistema económico y político que sustenta el crecimiento de la población mundial en la llamada era tecnológica. Sin embargo, existe a nivel mundial una preocupación creciente por el impacto que está dejando la globalización de la economía y la expansión de los mercados en el medio ambiente en todo el orbe [1]. Esta preocupación se refleja en el tratado firmado en París en diciembre de 2015, cuando líderes políticos de más de 190 países firmaron un acuerdo guía para reducir los efectos del calentamiento global producido por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera [2-3]

En este sentido, y aunque el principal contaminador del medio ambiente corresponde al sistema de transporte convencional, el sistema eléctrico mediante su parque térmico es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global [4-5]. Razón por la cual, uno de los objetivos propuestos es llevar las matrices energéticas de los países dependientes de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) hacia un sistema compatible con el medio ambiente, como lo son las energías renovables, destacándose principalmente la generación solar térmica, solar fotovoltaica y eólica [1].

Dada la creciente necesidad de desplazar los energéticos convencionales, por sistemas energéticos sostenibles y compatibles con el medio ambiente; en los últimos años se han venido desarrollando redes eléctricas menos dependientes de la generación térmica clásica [6], las cuales incluyen GD, sistemas de AE y gestión eficiente de la demanda [7-13]. Por lo anterior, los sistemas eléctricos actuales se encuentran en el paradigma de las redes inteligentes [14].

Las redes inteligentes, se conciben como sistemas que tienen la capacidad de auto-controlarse, tal que se maximiza la calidad y confiabilidad del servicio para los usuarios finales, al tiempo que se reducen las pérdidas de energía [14]. Dentro de este nuevo paradigma emergen las micro-redes (MR), como sistemas de pequeña escala auto-controlables que permiten la integración de las redes eléctricas convencionales y las fuentes de generación de energía y los sistemas de AE, tal que se logra una gestión eficiente de la demanda de manera localizada [15-16]. En otras palabras, una red eléctrica inteligente está compuesta por un conjunto de MR conectadas de tal forma que pueden operar de forma autónoma o de manera coordinada [17-18].

La evolución de la electrónica de estado sólido y la reducción de costos en su proceso de producción, ha hecho posible la construcción real de MR en diferentes partes del mundo [19-21], mostrando así, su potencial beneficio para la reducción del cambio climático y la gestión eficiente de la demanda de manera localizada [14], sin la necesidad de construir nuevos sistemas de transmisión de alto costo y grandes efectos sobre la vida silvestre o la inundación de grandes terrenos, para la construcción de nuevas centrales hidráulicas que aunque no son causantes de emisiones de gases de efecto invernadero [6], son causantes de desplazamiento forzado de comunidades, reducción de terrenos cultivables y desaparición de especies únicas de flora y fauna.

Por lo anterior, es posible encontrar en la literatura especializada, gran cantidad de trabajos relacionales con el diseño, la operación y el control de MG, tal que se pueda maximizar la utilización de los recursos energéticos distribuidos, al tiempo que se mejoran los indicadores calidad y confiabilidad en la prestación del servicio [17-18]. En este sentido, se encuentran propuestas relacionadas con la planeación del sistema en el mediano y largo plazo, por lo cual se proponen metodologías de ubicación de generadores distribuidos y sistemas de almacenamiento de energía en forma simultánea, cuyas funciones objetivo clásicas son la minimización de los costos de operación, o los costos de compra de energía [8-13]. Estos modelos son resueltos con diversas técnicas de optimización, entre las que sobresalen las técnicas metaheurísticas y los modelos de programación lineal y no lineal. También se encuentran trabajos relacionados con la operación del sistema, dentro de las que se destacan estrategias como el DEMR y el flujo de potencia óptimo [17-18].

Por último, se encuentran propuestas de control, para MR que involucran el desarrollo de metodologías de control en los niveles primario [22-23], secundario [24] y terciario [25], los cuales dependiente básicamente de las condiciones operativas de la MR y la red de potencia a la que se interconecta, para lograr estas estrategias de control, son empleadas estrategias de control clásica como la técnica PID y la realimentación de variables de estado, con estrategias inteligentes como el control predictivo y los modelos de control no lineal [14], [26-27].

A diferencia de los trabajos anteriores, en este artículo se propone una metodología eficiente para la localización y operación óptima de AE en sistemas de distribución con presencia de generación distribuida, para minimizar los costos de compra de energía en bolsa, que de manera indirecta están relacionados con la generación térmica convencional. Para lo anterior se propone un modelo de programación lineal, que garantiza solución única en tiempos de cómputo susceptibles de aplicación en la toma de decisiones operativas en tiempo real. El modelo propuesto, puede ser enmarcado dentro de las herramientas de control terciario ya que se propone modelo de DE para su implementación.

## 2. Despacho económico en micro-redes

Para entender la importancia del DE en la operación eficiente de MR, considérese una red eléctrica como la presentada en la Fig. 1, donde se puede observar la interconexión de recursos energéticos convencionales y recursos energéticos distribuidos [28].

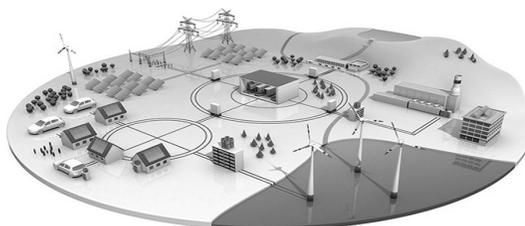


FIGURA 1. ESQUEMA TÍPICO DE UNA MR [28]

Para realizar el DEMR como la presentada en la Fig. 1, es necesario conocer los perfiles de demanda y generación para cada intervalo del período de estudio; así pues, no es posible pensar en intervalos de tiempo en el rango de días o semanas, dado que los patrones climáticos son de característica estocástica y por tanto su predicción a largo plazo es prácticamente inviable [8-10]. Es entonces necesario contar con herramientas que permitan hacer proyecciones de operación en intervalos de tiempo de horas minutos, por lo cual el modelo de DE que se propone para efectos de ubicación y operación óptima de AE, está discretizada en periodos de tiempo de 24 horas, los cuales corresponden día típico de consumo [11-14].

En razón a lo anterior, el problema de DEMR, es básicamente una extrapolación del problema de DE aplicado a los sistemas hidrotérmicos convencionales [17-18]. En este sentido, el objetivo fundamental del problema, consiste en minimizar el costo de compra de energía por parte del operador de red en la bolsa de energía, que es equivalente a minimizar el costo de generación de las centrales térmicas. Por otro lado, se busca aprovechar la capacidad de generación renovable, que a su vez corresponde a la maximización de la generación hidráulica. Por último, se considera la utilización de sistemas de almacenamiento de energía como una forma de emular la capacidad que tienen las centrales hidráulicas de almacenar energía mediante el embalse [29-30].

En la literatura especializada, es común encontrar modelos de DEMR en los cuales se tienen en cuenta los costos de compra de energía en bolsa [17-18], costos de generación con centrales diésel o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, aprovechamiento eficiente de energías renovables y operación eficiente considerando sistemas de AE [8-14].

Los modelos de DE mencionados, normalmente consideran que la red ya está diseñada y no proponen la ubicación de ninguna tecnología en conjunto con un modelo de DE eficiente, lo cual impacta de manera directa el esquema de operación obtenido, debido a que no existe posibilidad de seleccionar los mejores puntos de localización de los recursos energéticos distribuidos para beneficio de la red [17-18], [29-30]. En este sentido, los puntos de ubicación de los recursos energéticos distribuidos son definidos en función del conocimiento experto de los operadores de red, que siendo de suma importancia para el funcionamiento adecuado del sistema eléctrico, pueden causar sobrecostos de inversión, ya que, al ser una solución heurística de buena calidad, no corresponde a la mejor solución técnico-económica que se pueda encontrar.

Así pues, el modelo que se propone para la localización óptima de AE integrada con un modelo de DEMR tiene la capacidad de operar como un modelo estático o dinámico (ver sección 3), es decir, sirve para planear la ubicación de sistemas de AE y/o para definir el mejor esquema de operación en función de la disponibilidad de recursos energéticos renovables y los costos de compra de energía en bolsa, lo cual le da la capacidad al operador de red de maximizar la relación beneficio/costo de la red, al tiempo que recibe incentivos económico por parte del agente regulador del mercado, gracias a la sustitución de recursos energéticos de origen fósil por recursos energéticos alternativos.

### 3. Formulación matemática

Para formular el problema de DEMR con presencia de generación distribuida y almacenamiento de energía se emplea un MPLEM mono-objetivo, el cual consiste en minimizar los costos de compra de energía en bolsa en los que incurre el operador de la red, por medio del aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos renovables, con la inclusión de sistema de almacenamiento de energía que permitan almacenar energía en horas de alta generación y baja demanda, para suministrarla a los usuarios en horas de baja generación renovable y alta demanda [17-18]. Como restricciones del problema son consideradas las capacidades máximas de los generadores distribuidos, límites de almacenamiento de energía, costos de inversión y una representación de la red, mediante un modelo de flujo DC. El modelo matemático desarrollado se presenta de (1) a (9).

Función objetivo:

$$\min z = \left\{ \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{i \in \Omega_G} C_{gc}(t,i) \cdot P_{gc}(t,i) \cdot \Delta_T \right\} \quad (1)$$

s.a.

$$\begin{aligned} P_{gc}(t,i) + P_{gd}(t,i) + \sum_{b \in \Omega_B} P(t,b,i) \\ = \sum_{ij \in \Omega_L, j \neq i} f(t,ij) + P_d(t,i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\{\forall t \in \Omega_T - \forall i \in \Omega_N - \forall ij \in \Omega_L\}$$

$$\begin{aligned} SoC(t,b,i) + \varphi(b) \cdot P_b(t,b,i) \\ = x(b,i) \cdot SoC_b(t-1,b,i) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\{\forall t \in \Omega_T - \forall i \in \Omega_N - \forall b \in \Omega_B\}$$

$$\begin{aligned} SoC(t,b,i) = x(b,i) \cdot SoC_I(b,i) \\ \{[t=1] - \forall i \in \Omega_N - \forall b \in \Omega_B\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$SoC(t,b,i) = x(b,i) \cdot SoC_F(b,i)$$

$$\{[t=24] - \forall i \in \Omega_N - \forall b \in \Omega_B\}$$

$$P_{gc}^{\min}(i) \leq P_{gc}(t,i) \leq P_{gc}^{\max}(i)$$

$$P_{gd}^{\min}(i) \leq P_{gd}(t,i) \leq P_{gd}^{\max}(i) \quad (5)$$

$$-F_{\max}(ij) \leq f(t,ij) \leq F_{\max}(ij)$$

$$\{\forall b \in \Omega_B - \forall i \in \Omega_N - \forall ij \in \Omega_L\}$$

$$SoC_{\min}(b) \leq SoC(t, b, i) \leq SoC_{\max}(b)$$

$$P(t, b, i) \geq x(b, i) \cdot EB_{\min}(b) / \Delta_T \quad (6)$$

$$P(t, b, i) \leq x(b, i) \cdot EB_{\max}(b) / \Delta_T$$

$$\{\forall b \in \Omega_B - \forall i \in \Omega_N - \forall b \in \Omega_B\}$$

$$\sum_{b \in \Omega_B} x(b, i) \leq 1 \quad \{\forall i \in \Omega_N\} \quad (7)$$

$$x(b, i) \in (0, 1) \quad \{\forall i \in \Omega_N - \forall b \in \Omega_B\} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \Omega_N} \sum_{b \in \Omega_B} CC(b) \cdot x(b, i) \leq CI_B^{\max} \quad (9)$$

En el modelo matemático presentado ha sido desarrollado con base en el modelo matemático presentado en [17]. Así pues, la expresión (1) define la función objetivo del problema y corresponde a la minimización de los costos de compra de energía en bolsa por parte del operador, y sólo corresponde al valor ofertado por las centrales térmicas, lo cual sólo refiere al costo de la energía generada por las fuentes convencionales. Por otro lado, la expresión (2) modela el balance de potencia activa en todas las barras del sistema; mientras que en (3) se determina el nivel de carga de cada AE, como función de la potencia que entrega/consume de la red y la eficiencia de la batería. En (4) se muestra la forma de asignar un valor de carga inicial al AE, y de ser necesario, definir una meta final de almacenamiento para el período de operación previsto. Por su parte, la expresión (5) muestra los límites de capacidad de generación de potencia activa de la generación convencional y la generación distribuida, así como los límites de capacidad de las líneas que interconectan el sistema de potencia. En la ecuación (6) se muestra que, para cada AE sólo puede almacenar energía entre un valor mínimo de capacidad y su valor nominal; adicionalmente se muestra que la potencia activa que un AE puede entregar, está limitada por la capacidad máxima de diseño y es diferente de cero, sólo cual se decide su instalación en el sistema. En la expresión (7) se garantiza que por cada nodo sólo pueda existir un AE. En (8) se presenta la naturaleza binaria de las variables de decisión, respectivamente. Por último, la ecuación (9) define el máximo nivel de inversión disponible para compra de AE.

Es tener en cuenta que el modelo matemático presentado corresponde al MPLEM que se propone resolver mediante el paquete de optimización comercial GAMS y el solver CPLEX. Sin embargo, para evaluar las condiciones operativas reales del sistema de distribución, es necesario plantear un flujo de potencia del tipo barrido iterativo como el presentado en [31]. Es necesario aclarar que el DE obtenido en la etapa de ubicación óptima, corresponde los datos de entrada del flujo de potencia para cada intervalo de tiempo contenido en el periodo de estudio.

#### 4. Sistema de prueba

Para verificar el modelo matemático propuesto, se considera un sistema de prueba de 8 nodos que se presenta en la Fig. 2, que ha sido tomado de [17].

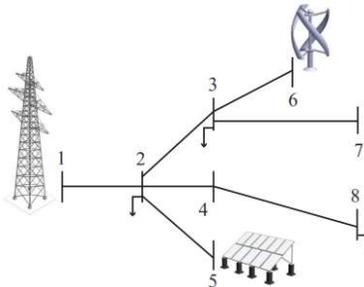


FIGURA 2. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL [17]

Este sistema tiene un comportamiento típico de un sistema eléctrico colombiano, ya que la demanda corresponde a una curva de demanda típica para un día ordinario y los niveles de capacidad de generación eólica y fotovoltaica corresponden a una zona con niveles de radiación y viento similares a los que se presentan en las zonas ecuatoriales. A este sistema se le asocia un nivel de tensión de 2kV y se asume que todos los conductores son uniformes y con un valor de impedancia igual a  $0.8763+j0.4133\Omega$ .

Para este sistema, los datos de generación y demanda se presentan en la Tabla 1, teniendo en cuenta que para el nodo 2 se asigna el 30% de la demanda, para el nodo 3 el 25% y para el nodo 8 el 45% restante.

TABLA 1. DATOS DE GENERACIÓN Y DEMANDA

Hora	$C_{gc}(t,i)$ [\$/kWh]	$P_{PV}^{max}(i)$ [kW]	$P_{WT}^{max}(i)$ [kW]	$P_d(i)$ [kW]	$Q_d(i)$ [kVA]
1	0,77	10	80	120	59
2	0,71	10	80	108	44
3	0,69	20	70	102	37
4	0,70	20	50	100	32
5	0,72	20	100	101	30
6	0,80	10	110	107	30
7	0,84	20	100	112	19
8	0,87	20	95	128	28
9	0,91	40	80	154	46
10	0,88	100	85	171	61
11	0,91	180	110	188	75
12	0,91	250	130	196	87
13	0,91	150	180	200	92
14	0,90	60	210	190	93
15	0,89	30	200	195	90
16	0,90	20	160	197	85
17	0,95	20	150	197	83
18	0,94	20	130	192	85
19	0,91	20	120	189	108
20	0,90	20	112	210	126
21	0,85	20	100	205	127
22	0,80	20	90	190	113
23	0,71	20	85	166	89
24	0,66	20	70	142	69

Para este sistema de prueba se considera que existe la posibilidad de ubicar sistemas de AE en todos los nodos, considerando que sólo se puede ubicar uno por cada nodo. Los datos de costo, capacidad y eficiencia de carga de los AE se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AE

Tipo de AE	$CC(b)$ [\\$]	$EB_{max}(b)$ [kW]	$EB_{min}(b)$ [kW]	$\phi(b)$ [%]	$TC(b)$ [h]	$TD(b)$ [h]
1	20000	62,5	50	0,4	4	5
2	25000	50	40	0,5	4	5
3	30000	40	40	0,5	5	5

## 5. Aplicación y resultados

Para evaluar el desempeño del modelo matemático propuesto se consideran tres escenarios de simulación sobre el sistema de prueba. El primer escenario se evalúa el caso base considerando la presencia de los generadores distribuidos, además de costos fijos y costos variables en el nodo de red. En el segundo escenario se considera que existe una restricción económica en la cual la máxima inversión en AE por parte del operador de red es \$100.000 y se evalúa el problema considerando los costos fijos y los costos variables en el nodo de red.

Es de tener en cuenta que para cada uno de los escenarios propuestos se calcula la solución matemática del problema empleando el paquete de optimización comercial GAMS con el solver CPLEX, y posteriormente se evalúa el flujo de potencia del tipo barrido iterativo programado en el software MATLAB.

### 5.1. Escenario 1

En este escenario se evalúa el caso base del sistema prueba, considerando que el costo variable de energía el nodo correspondiente al equivalente de red iguales a los presentados en la columna 2 de la Tabla 1. Para los costos fijos se asume como valor constante el valor promedio de los costos variables. Adicionalmente, se realiza un DE para la red considerando que el nodo *slack* no puede vender

energía al sistema de potencia. En la Tabla 3 se presentan los resultados del caso base para el MPLEM formulado en GAMS y su equivalente no lineal en MATLAB cuando es evaluada la solución obtenida por el proceso de optimización.

**TABLA 3. RESULTADOS DEL CASO BASE**

Función objetivo con costos fijos [\$]		Función objetivo con costos variables [\$]	
GAMS	MATLAB	GAMS	MATLAB
660,024	694,610	671,910	689,137

## 5.2. Escenario 2

En este escenario se considera que existe una restricción económica en la red, tal que sólo es posible invertir en almacenadores energía hasta un máximo de \$100.000, lo cual implica que la cantidad de AE que pueden ser ubicados está entre 3 y 5.

TABLA 4. SOLUCIÓN ÓPTIMA PARA UN LÍMITE DE INVERSIÓN EN AE EQUIVALENTE A UNA INVERSIÓN DE \$100.000

Tipo de costos	Número de AE	Tipo	Costo AE [\$]	Ubicación (Nodos)	Función objetivo [\$]	
					GAMS	MATLAB
Fijos	3	1	90.000	1, 2, 3	284,882	530,930
Variables	3	1	90.000	1, 2, 3	236,159	677,860

## 5.3. Análisis comparativo

Al analizar los resultados obtenidos para el sistema de prueba considerando el caso base (ver Tabla 3), es decir, red sin presencia de AE, se observa que el MPLEM tiene en cuenta un despacho económico, que, al ser evaluado en flujo de potencia convencional, presenta costos operativos muy similares. Estas diferencias entre MATLAB y GAMS se explican, básicamente porque el MPLEM no considera el flujo de potencia reactiva por la red, es decir, desprecia las pérdidas de energía causadas por el flujo de corriente reactiva; mientras que en modelo de flujo de potencia evaluado en MATLAB las pérdidas son asumidas por el nodo fuente, lo cual naturalmente incrementa sus costos de operación.

Por otro lado, al considerar la ubicación óptima de AE considerando costos de inversión y con una limitante de inversión en términos de adquisición de sistemas de AE, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 4. En este sentido se encuentra que las soluciones propuestas para el MPLEM encuentran que con tres (3) AE es posible cumplir la restricción de inversión al tiempo que se minimizan los costos de operación del sistema. Sin embargo, al evaluar la solución propuesta el MPLEM en MATLAB, se encuentra que la solución considerando costos fijos de compra de energía mejora la respuesta presentada para el caso base en un valor de \$163.680. Lo cual implica que se requiere de un periodo de operación continua de aproximadamente 1.5 años para recuperar la inversión. Adicionalmente, al analizar el caso de la ubicación de AE considerando costos variables, el resultado de ubicar tres (3) AE mejora ligeramente los costos operativos, en relación con el caso base. Esta mejora diaria corresponde a \$11.277; lo cual implica que bajo este escenario de prueba se requiere de 21.86 años para recuperar la inversión realizada. Lo anterior quiere decir, que la solución obtenida desde el punto de vista técnico no es viable para un sistema con precio de energía variable, debido a que el tiempo en el que se recuperaría la inversión. Esto debido a que los tiempos de planeamiento para sistemas de distribución están entre 10 y 20 años, lo cual es claramente superado por la respuesta alcanzada.

Es de notarse entonces, que el MPLEM para el caso de costos variables en el nodo *slack* presenta una solución evidentemente atractiva para el operador de red; sin embargo, esta solución implica que los AE se cargan de la energía excedente de la GD y de la red, cuando existe poca demanda y el costo de compra de energía en el nodo *slack*. No obstante, al evaluar este escenario en el flujo de potencia de la red, se encuentra que esta compra de energía puede incrementar significativamente el valor de las pérdidas técnicas, por lo cual el beneficio obtenido por la atención de la demanda con la GD y el AE se cancela con el costo que asume la red para suplir las pérdidas técnicas.

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta que permite la ubicación óptima de almacenadores de energía en sistemas de distribución para reducir el costo de compra de energía en la bolsa, por medio de un modelo de despacho económico para micro-redes que considera la presencia de generación distribuida a base de energías renovables.

El modelo matemático propuesto, sirve como un indicador de sensibilidad para la selección óptima de sistemas de AE en redes de distribución; sin embargo, es necesario considerar el impacto que tienen las simplificaciones realizadas este, como es el hecho de no considerar la potencia reactiva dentro del MPLEM o suponer que las tensiones en todos los nodos del sistema son planos.

Para evaluar el desempeño de metodologías asociadas a la ubicaciones de sistemas de AE, se requiere de herramientas adicionales que permitan conocer el impacto real de la inclusión de este tipo de elementos en la red eléctrica; debido a que se necesita conocer el estado real de las variables de estado del sistema para todas las condiciones operativas, haciéndose indispensable la utilización de

modelos de flujo de potencia aplicables a redes radiales, con lo cual se pueda comparar la solución ideal obtenida con el MPLEM y el modelo real de flujo de potencia.

La ubicación de sistemas de AE de energía a la luz de los resultados obtenidos, corresponde a una solución atractiva para el sistema de distribución, siempre que existan excedentes de generación en los generadores distribuidos; puesto que esta energía puede ser almacenada en horas de alta generación renovable y poca demanda, para luego ser suministrada a los usuarios del servicio en horas de alta demanda y baja generación distribuida.

No es aconsejable, permitir que los sistemas de AE se carguen empleado como fuente de energía el nodo de la red en horas de bajo costo de energía, para luego ser deliberada en horas de alto consumo, debido a que el proceso de carga, aumenta considerablemente el nivel de pérdidas técnicas, lo cual de manera inevitable aumenta los costos de operación del sistema anulando el beneficio obtenido por la implementación de sistemas de AE.

Se recomienda incluir en la formulación del MPLEM, términos asociados a los efectos causados por la potencia reactiva en términos de pérdidas técnicas y considerar un modelo el impacto de la impedancia de las ramas de distribución a través de una formulación que considere algunas características del flujo DC.

## 7. Agradecimientos

Al programa de Becas Doctorados Nacionales del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS), según convocatoria 727 de 2015 y al trabajo conjunto de los investigadores del grupo investigación DINOP de la Universidad Tecnológica de Pereira y del grupo de investigación MATyER del Instituto Tecnológico Metropolitano

## 8. Referencias

- [1] United Nations, "Adoption of the Paris Agreement," framework convention of climate change, pp. 1-32, Dec. 2015.
- [2] R. Mahabir and R. M. Shrestha, "Climate change and forest management: Adaptation of geospatial technologies," *Agro-Geoinformatics (Agro-geoinformatics)*, 2015 Fourth International Conference on, Istanbul, 2015, pp. 209-214. Doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2015.7248108
- [3] A. M. Hasna, "Climate Change, Technology, and Sustainability," in *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 29, no. 4, pp. 30-36, winter 2010. doi: 10.1109/MTS.2010.939226
- [4] V. Azad and R. Khoie, "Mitigating carbon dioxide emission with gradual implementation of distributed generation in Northern California," *North American Power Symposium (NAPS)*, 2013, Manhattan, KS, 2013, pp. 1-6. Doi: 10.1109/NAPS.2013.6666898
- [5] A. M. Hernandez and H. L. Reyes, "Behavior of Fuels Supply Variable Costs in Electrical Energy Generation using Gas and Coal," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2915-2921, Sept. 2015. Doi: 10.1109/TLA.2015.7350039
- [6] H. W. Whittington and S. W. Gundry, "Global climate change and hydroelectric resources," in *Engineering Science and Education Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 29-34, Feb 1998. Doi: 10.1049/esej:19980107
- [7] M. J. Hossain, T. K. Saha and N. Mithulananthan, "Impacts of wind and solar integrations on the dynamic operations of distribution systems," *Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2011 21st Australasian, Brisbane, QLD, 2011, pp. 1-6.
- [8] A. De Souza et al., "Microgrids operation with micro dispersed generators and renewables," *Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop*, Lisbon, 2012, pp. 1-4. Doi: 10.1049/cp.2012.0866
- [9] C. Abbey and G. Joos, "Coordination of Distributed Storage with Wind Energy in a Rural Distribution System," *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, New Orleans, LA, 2007, pp. 1087-1092. Doi: 10.1109/07IAS.2007.169
- [10] Z. Wang, C. Gu, F. Li, P. Bale and H. Sun, "Active Demand Response Using Shared Energy Storage for Household Energy Management," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1888-1897, Dec. 2013. Doi: 10.1109/TSG.2013.2258046
- [11] S. I. Kampezidou, E. Polymeneas and S. Meliopoulos, "The economic effect of storage in systems with high penetration of renewable sources," *North American Power Symposium (NAPS)*, 2015, Charlotte, NC, 2015, pp. 1-6. Doi: 10.1109/NAPS.2015.7335207
- [12] M. Martinez, M. G. Molina and P. E. Mercado, "Optimal Storage Technology Selection and Sizing for Providing Reserve to Power Systems with High Penetration of Wind Generation," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2983-2990, Sept. 2015. Doi: 10.1109/TLA.2015.7350049
- [13] G. Carpinelli, G. Celli, S. Mocci, F. Mottola, F. Pilo and D. Proto, "Optimal Integration of Distributed Energy Storage Devices in Smart Grids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 985-995, June 2013. Doi: 10.1109/TSG.2012.2231100
- [14] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," in *IEEE Access*, vol. 3, no. , pp. 890-925, 2015. Doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119
- [15] S. Park, J. Lee, S. Bae, G. Hwang and J. K. Choi, "Contribution-Based Energy-Trading Mechanism in Microgrids for Future Smart Grid: A Game Theoretic Approach," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 7, pp. 4255-4265, July 2016. Doi: 10.1109/TIE.2016.2532842
- [16] N. Nikmehr and S. Najafi Ravadanegh, "Optimal Power Dispatch of Multi-Microgrids at Future Smart Distribution Grids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1648-1657, July 2015. Doi: 10.1109/TSG.2015.2396992

- [17] O. D. Montoya, A. Garcés and C. A. Castro, "Operación eficiente de micro-redes en presencia de generadores distribuidos y almacenadores de energía," in SBSE2016, VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, RN, Brasil, CA, 2016, pp. 1-6.
- [18] A. C. Luna, N. L. Diaz, F. Andrade, M. Graells, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "Economic power dispatch of distributed generators in a grid-connected microgrid," 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, 2015, pp. 1161-1168. Doi: 10.1109/ICPE.2015.7167927
- [19] S. Bracco, F. Delfino, M. Rossi and M. Robba, "A multi-objective optimization tool for the daily management of sustainable smart microgrids: Case Study: the savona campus SPM and SEB facilities," 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, 2016, pp. 683-688. Doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7526018
- [20] M. F. Z. Souza, "On rural microgrids design – a case study in Brazil," Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES, Montevideo, 2015, pp. 160-164. Doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381146
- [21] F. Guo and C. Wen, "Distributed control subject to constraints on control inputs: A case study on secondary control of droop-controlled inverter-based microgrids," 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Hangzhou, 2014, pp. 1119-1124. Doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931333
- [22] S. M. Ashabani and Y. A. R. I. Mohamed, "A Flexible Control Strategy for Grid-Connected and Islanded Microgrids With Enhanced Stability Using Nonlinear Microgrid Stabilizer," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1291-1301, Sept. 2012. Doi: 10.1109/TSG.2012.2202131
- [23] E. Unamuno and J. A. Barrena, "Equivalence of primary control strategies for AC and DC microgrids," 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 2016, pp. 1-5. Doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555729
- [24] A. Toliyat and A. Kwasinski, "Energy storage sizing for effective primary and secondary control of low-inertia microgrids," 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aachen, 2015, pp. 1-7. Doi: 10.1109/PEDG.2015.7223077
- [25] E. R. Sanseverino et al., "Energy Management Systems and tertiary regulation in hierarchical control architectures for islanded microgrids," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on, Rome, 2015, pp. 144-149. Doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165525
- [26] F. Salem and M. I. Mosaad, "A comparison between MPC and optimal PID controllers: Case studies," Michael Faraday IET International Summit 2015, Kolkata, 2015, pp. 59-65. Doi: 10.1049/cp.2015.1607
- [27] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis and J. M. Guerrero, "Distributed Cooperative Secondary Control of Microgrids Using Feedback Linearization," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3462-3470, Aug. 2013. Doi: 10.1109/TPWRS.2013.2247071
- [28] 3M science applied to life, "Smart Grid Connected, Efficient and Sustainable Energy" available in: [http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_EU/SmartGrid/EU-Smart-Grid/](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_EU/SmartGrid/EU-Smart-Grid/)
- [29] N. Yan, Z. X. Xing, W. Li and B. Zhang, "Economic Dispatch Application of Power System With Energy Storage Systems," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 7, pp. 1-5, Oct. 2016. Doi: 10.1109/TASC.2016.2598963
- [30] S. S. Haroon and T. N. Malik, "Environmental economic dispatch of hydrothermal energy system using stud differential evolution," 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 2016, pp. 1-5. Doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555630
- [31] D. Shirmohammadi, H. Hong, A. Semlyen and G. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 3, pp. 753-762. May, 1988. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/59.192932.

## Propiedades Estructurales y Eléctricas del Material $\text{Na}_0.9\text{Li}_0.1\text{NbO}_3$ : una opción para aplicaciones termoeléctricas

### Structural and electrical properties of $\text{Na}_0.9\text{Li}_0.1\text{NbO}_3$ compound: an option for thermoelectric applications

Viancy Isaza<sup>1</sup> \*, Andrés Arias<sup>1</sup>, Sebastián Márquez<sup>1</sup>, Carlos Maya<sup>1</sup>, Wilson Martínez<sup>1</sup>, Nancy Montes<sup>1</sup>, Alfonso Agudelo<sup>1</sup>, Bayron Alvarez<sup>1</sup>, A. Gómez<sup>2</sup>, J.L. Izquierdo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institución Universitaria Pascal Bravo, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materialografía, Grupo GIEN, Medellín, Colombia

2 Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo de Investigación Materiales Cerámicos y Vítreos, Medellín, Colombia

3 Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación Materiales Cerámicos y Vítreos, Medellín, Colombia

\*Autor correspondiente: [v.isaza@pascualbravo.edu.co](mailto:v.isaza@pascualbravo.edu.co)

## Resumen

Muestras policristalinas del material dieléctrico con propiedades ferroeléctricas  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$ , fueron obtenidas por el método de reacción en estado sólido estándar utilizando diferentes programas de temperatura. Sus propiedades estructurales y eléctricas fueron estudiadas por medio de difracción de Rayos X y medidas de polarización eléctrica, respectivamente. Por medio de refinamiento Rietveld se encontró una estructura cristalina ortorrómbica (grupo espacial  $\text{Pbma:bca}$ ) con parámetros de red  $a=5,5655(93)$  Å,  $b=15,5131(35)$  Å,  $c=5,5039(76)$  Å, muy cercanos a los reportados en la literatura para muestras obtenidas mediante otros métodos de síntesis con control de la dimensionalidad del tamaño de grano. Las medidas de polarización eléctrica detectaron un comportamiento ferroeléctrico a temperatura ambiente, característico de un compuesto no polar  $\text{NaNbO}_3$  a un compuesto polar  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$ .

**Palabras claves:** materiales dieléctricos, propiedades ferroeléctricas, materiales termoeléctricos.

## Abstract

Polycrystalline samples of dielectric  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$  with ferroelectric properties compounds were synthesized by standard solid state reaction method with different temperature programs. Their structural and electrical properties were characterized by means of X Ray diffraction and electric polarization measurements, respectively. Rietveld refinement shows an orthorhombic ( $\text{Pbma:bca}$ ) crystal structure with lattice constants  $a=5,5655(93)$  Å,  $b=15,5131(35)$  Å and  $c=5,5039(76)$  Å, very close to ones reported and obtained by other process with grain size dimensionality control. Electric polarization measurements detect a behavior like ferroelectric at room temperature it which is characteristic of a nonpolar  $\text{NaNbO}_3$  at polar  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$  material.

**Keywords:** dielectric materials, ferroelectric properties, thermoelectric materials.

## 1. Introducción

A causa de lo perjudicial que es el elemento plomo (Pb) para la salud y el medio ambiente, en 2003 la Unión Europea incluyó el PZT ( $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$ ) como sustancia peligrosa y por ello debe ser progresivamente retirado. Debido al gran rango de aplicaciones que posee el PZT, para ser substituido se requiere el desarrollo de nuevos materiales piezoeléctricos sin plomo, respetuosos con el medio ambiente y con propiedades comparables o superiores al PZT y sus derivados.

En este trabajo de investigación se realizó un estudio experimental del sistema  $\text{NaNbO}_3$  (Niobato de Sodio) y  $\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x\text{NbO}_3$  (Niobato de Sodio Litio) sobre las propiedades eléctricas a temperatura ambiente: antiferroelectricidad y ferroelectricidad, y ferroelectricidad inducida por campo. Los resultados obtenidos prometen propiedades de estos sistemas para aplicaciones tecnológicas por la capacidad de almacenar energía eléctrica.

## 2. Experimental

Las muestras Policristalinas  $\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x\text{NbO}_3$  ( $x = 0, 0.10$ ), fueron preparadas mediante el método de reacción en estado sólido a partir de una mezcla de precursores de ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) de alta purea en polvo a través de un mortero de ágata. Se realizaron una serie de tratamientos térmicos a la mezcla estequiometrica  $\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x\text{NbO}_3$  ( $x = 0, 0.10$ ), en un horno tubular programable NABERTHERM RHTC 80-230/15 que se encuentra en el laboratorio de Materialografía de la Institución Universitaria Pascual Bravo en atmósfera de aire. Se realizó un primer tratamiento térmico del compuesto sin dopar. Seguidamente se hace el dopaje con Li y se somete el polvo resultante nuevamente a un tratamiento térmico con el fin de hacer una inclusión de estos iones en la estructura cristalina. Una vez terminado el procedimiento de sinterización el horno alcanzó la temperatura ambiente. Terminado el primer tratamiento térmico para las muestras obtenidas en polvo se realizó un ensayo mediante la técnica de difracción de rayos X para encontrar el sistema monofásico (dentro del límite de resolución de esta técnica) posteriormente pastillas de  $\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x\text{NbO}_3$  fueron obtenidas para medidas de ferroelectricidad en un polarímetro.

### 3. Propiedades estructurales de $\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x\text{NbO}_3$ ( $x = 0, 0.10$ )

El estudio de las propiedades de estructuras tipo perovskitas ferroeléctricas ha despertado en los últimos años el esfuerzo realizado para diseñar nuevos materiales libres del compuesto plomo. Así, la perovskita  $\text{ABO}_3$  derivada de  $\text{NaNbO}_3$  es un material prototipo elegido para este propósito. La influencia de defectos puntuales en las transiciones de fase en perovskitas con propiedades ferroeléctricas es objeto de numerosas investigaciones, observando el efecto de la inclusión de impurezas (dopantes) sustituyendo a los iones en las posiciones A o B de la estructura. Estas sustituciones producen cambios en la secuencia y carácter de las transiciones de fase presentes en estos compuestos que son interesantes desde el punto de vista básico y aplicado. En la actualidad, la mayor parte de los estudios efectuados sobre  $\text{NaNbO}_3$  han tenido lugar en los materiales dopados, ya que los procesos de dopaje pueden suponer una mejora notable en las propiedades funcionales aplicables en dispositivos.

Las transiciones ferro-paraeléctrica a temperatura relativamente alta, las interesantes propiedades piezoeléctricas y el descubrimiento de comportamiento ferroeléctrico-relaxor en disoluciones sólidas derivadas del  $\text{NaNbO}_3$ , ha dado un fuerte impulso al estudio de nuevas composiciones basadas en Niobato de Sodio. Este compuesto presenta gran interés por mostrar una variedad de transiciones de fase estructurales, asociadas a un cambio desde una fase no polar a otra antiferroeléctrica y finalmente a una ferroeléctrica. Aunque  $\text{NaNbO}_3$  es antiferroeléctrico a temperatura ambiente ( $T_c = 366\text{ K}$ ) [2], es transformable en ferroeléctrico estable por polarización en caliente y mediante la formación de disoluciones sólidas. Entre ellas las del tipo  $\text{NaNbO}_3\text{-ABO}_3$  ( $\text{ABO}_3 = \text{LiNbO}_3$ ) inducen la estabilización de la fase ferroeléctrica con actividad piezoeléctrica, interesante para el desarrollo de dispositivos piezoeléctricos de alta temperatura.

La síntesis de estos óxidos cerámicos es difícil de obtener buscando las mejores composiciones químicas a nivel microscópico y un mejor grado de homogeneidad química.

Muchas cerámicas piezoeléctricas y ferroeléctricas muestran una estructura tipo perovskita de fórmula general  $\text{ABX}_3$ , donde A y B son cationes y X aniones como se muestra en la figura 1.

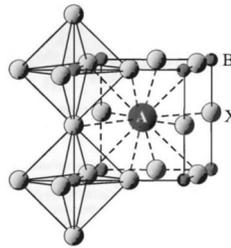


Figura 1. Celda unidad de la perovskita  $\text{ABX}_3$ .

La estructura cristalina ideal de la perovskita  $\text{ABX}_3$  es cúbica. Su esqueleto está formado por octaedros  $\text{BX}_6$ , unidos entre sí por los vértices; la unión de ocho de ellos forma en su interior huecos cubo-octaédricos que son ocupados por el catión A (de mayor tamaño que B).

Sin embargo, no todas las perovskitas se ajustan al modelo ideal, algunas sufren distorsiones las cuales las dotan de ciertas propiedades que las hacen tan interesantes de estudiar. Existen perovskitas aislantes ( $\text{SrTiO}_3$ ), ferroeléctricas ( $\text{BaTiO}_3$ ), ferromagnéticas ( $\text{BiFeO}_3$ ), antiferromagnéticas ( $\text{CaMnO}_3$ ), superconductoras ( $\text{YBa}_2\text{CuO}_{7-\delta}$ ), entre otros.

Muy frecuentemente, en las perovskitas se producen desplazamientos atómicos que pueden ser de distinta clase representado en la figura 2:

- Alargamiento de los octaedros de oxígeno, que se sitúan alrededor del catión B, pudiendo llegar a ser una bipirámide de base cuadrada.
- Movimiento del catión B que, situado en el centro del octaedro, puede desplazarse de dicha posición.
- Giros de los octaedros  $\text{BX}_6$ , modificando así la cavidad ocupada por el catión A.

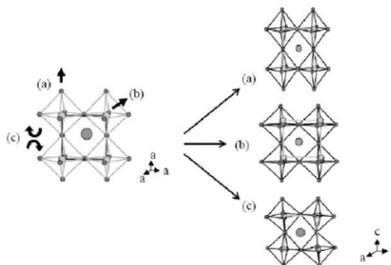


Figura 2. Tipos de desplazamientos atómicos en las perovskitas: (a) alargamiento de los octaedros; (b) movimiento del catión B y (c) giro de los octaedros.

La estructura cristalina tipo perovskita del compuesto  $\text{NaNbO}_3$  fue estudiada por medio de difracción de rayos X convencional. En base a difractogramas obtenidos por la técnica DRX se realizó una simulación estructural por medio del software Maud a través de un espectro teórico encontrado en la base de datos ICSD [3]. Los resultados de este procedimiento indican que las muestras cerámicas sinterizadas usando el proceso descrito previamente, poseen estructura cristalina ortorrómbica (grupo espacial  $\text{Pbma:bca}$ ) con parámetros de red  $a=5,5683403 \text{ \AA}$ ,  $b=15,553115 \text{ \AA}$   $c=5,510123 \text{ \AA}$ , [4] muy cercanos a los reportados en la literatura [5].

Se realizó el refinamiento Rietveld al compuesto dopado en base al espectro teórico. Resultados de este refinamiento son observados en la figura 3.

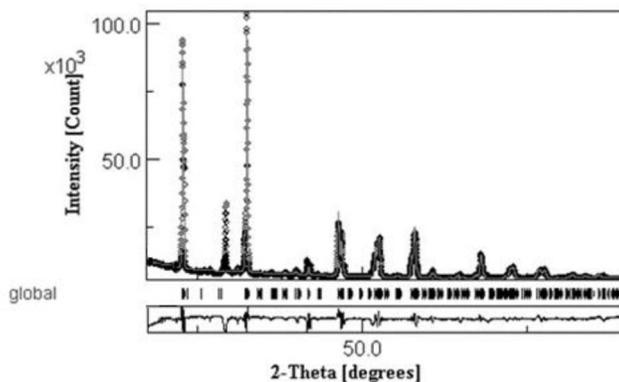


Figura 3. Refinamiento Rietveld  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$ .

Los resultados de este procedimiento indican que las muestras cerámicas sinterizadas usando el proceso descrito previamente, poseen estructura cristalina ortorrómbica (grupo espacial  $\text{Pbma:bca}$ ) con parámetros de red disminuidos,  $a=5,5655(93) \text{ \AA}$ ,  $b=15,5131(35) \text{ \AA}$ ,  $c=5,5039(76) \text{ \AA}$ , los resultados indican la incorporación de los iones de Li en la estructura del compuesto  $\text{NaNbO}_3$  reemplazando parcialmente iones de Na. Como consecuencia se contrae la estructura del compuesto dopado comparado con la muestra no dopada debido a la diferencia de radio iónico  $r(\text{Na})=1,18 \text{ \AA}$  y  $r(\text{Li})=1,08 \text{ \AA}$ .

#### 4. Propiedades eléctricas de $\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x\text{NbO}_3$ ( $x = 0, 0.10$ )

Los materiales ferroeléctricos son aquellos que poseen una estructura cristalina no centrosimétrica y presentan una polarización efectiva espontánea, cuyo sentido se puede invertir mediante la aplicación de un campo eléctrico. Las propiedades de la polarización de estos compuestos vienen descritas por los ciclos de histéresis ferroeléctrica (Figura 4), donde se muestra la dependencia de la polarización respecto a un campo eléctrico externo aplicado. [6]

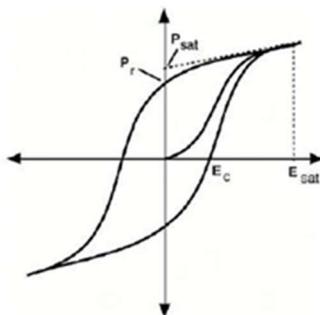
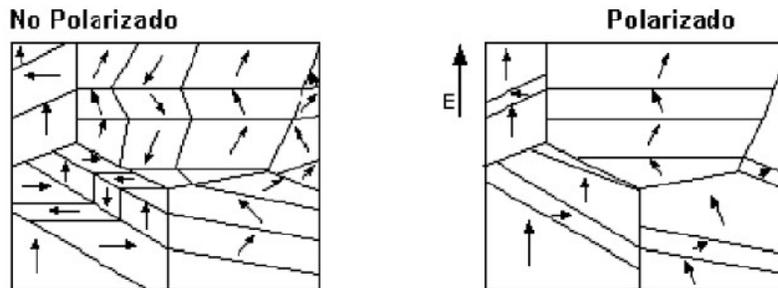


Figura 4. Ciclo de histéresis ferroelectrica

En este ciclo puede observarse que a medida que aumenta el campo eléctrico aplicado también aumenta la polarización, hasta la obtención de un máximo denominado polarización de saturación ( $P_{\text{sat}}$ ), o lo que es lo mismo, es el punto correspondiente en el que todos los dipolos eléctricos se encuentran orientados en un mismo sentido. Otros puntos característicos que presenta el ciclo son la polarización remanente ( $P_r$ ) que corresponde a la polarización existente en el material cuando no hay ningún campo eléctrico aplicado y el campo coercitivo ( $E_c$ ) que es el campo eléctrico inverso, necesario para conseguir una polarización nula.

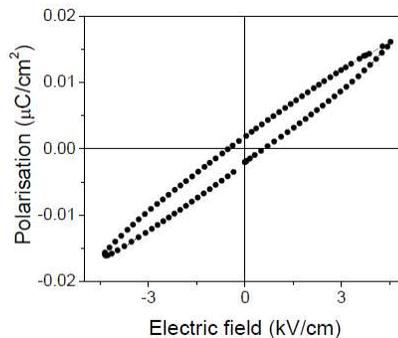
Como característica principal, un material ferroeléctrico es capaz de orientar sus dominios en la dirección del campo aplicado al polarizarse (Figura 5).



**Figura 5.** Polarización de los dominios de un material ferroeléctrico tras la aplicación de un campo eléctrico.

Es conocido que el compuesto  $\text{NaNbO}_3$  presenta propiedades antiferroeléctricas a temperatura ambiente [7], el compuesto dieléctrico-ferroeléctrico  $\text{LiNbO}_3$  el cual es ferroeléctrico a temperatura ambiente [8], cuya característica es deseada para sistemas para aplicaciones tecnológicas. Esto permitió buscar un acople de esta propiedad ferroeléctrica en el sistema  $\text{NaNbO}_3$  por la alta constante dieléctrica que posee  $\text{NaNbO}_3$ . Muestras de  $\text{NaNbO}_3$  fueron dopadas con Li en un porcentaje del 10% (reemplazando iones de Na por iones de Li) [9].

Cabe resaltar que finalmente se dieron las fases y condiciones ferroeléctricas a temperatura ambiente, ya que con el dopaje se configuró la estructura inicial para cambiar sus propiedades como muestra la figura 6.



**Figura 6.** Curva histéresis  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$

Se observa la curva de histéresis ferroeléctrica del compuesto  $\text{Na}_{0.9}\text{Li}_{0.1}\text{NbO}_3$ , constatando la absorción de energía por organización de los dipolos eléctricos y la inducción del campo eléctrico.

## 5. Agradecimientos

- A. Gómez and J.L. Izquierdo agradecen al Dr. O. Morán de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por las medidas de polarización realizadas en el Laboratorio de Materiales Cerámicos y Vítreos.

## 6. Referencias

- [1] Beato Merino, Beatriz. Síntesis dirigida a la mejora de las propiedades del  $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$ .
- [2] M.A.L Nobre, E. Longo, E.R. Leite, J.A. Varela. *Material Letter* 28 (1996) 215-220.
- [3] Sakowski-Cowley, Lukaszewicz K, Megaw H D. *Acta Crystallographica, Section B. The structure of sodium niobate at room temperature, and the problem of reliability in pseudosymmetric structures.*
- [4] Hong Pan, Gui-sheng Zhu, Xiao-lian Chao. Properties of  $\text{NaNbO}_3$  powders and ceramics prepared by hydrothermal reaction. *Materials Chemistry and Physics*. Vol 126. March 2011. Pag 183-187
- [5] Takafumi Maeda, Norihito Takiguchi.  $(\text{K}, \text{Na}) \text{NbO}_3$  lead-free piezoelectric ceramics synthesized from hydrothermal powders. *Material Letters*. Vol 64. January 2010, pag. 125-128.
- [6] Isaza Zapata, Viancy. Estudio experimental de las propiedades estructurales y eléctricas del compuesto  $(\text{Na}, \text{Li}) \text{NbO}_3$
- [7] Y. Wang, J. Wu, D. Xiao, J. Zhu, P. Yu, L. Wu, X. Li, *J. Alloys Compd.* 462 (2008) 310.
- [8] A. Sadel, R. Von Der M'uhll, J. Ravez, P. Hagenm'uller, *Ferroelectrics* 47 (1983) 169.

# Madera, Bicicletas y Movilidad Sostenible: Una Aproximación al Diseño Concurrente Como Herramienta para la Innovación

## Wood, bicycles and sustainable mobility An approach to concurrent design as an innovation tool

Andrés Valencia Escobar<sup>1</sup>, Alejandro Alberto Zuleta Gil<sup>1</sup>, Laura María Marín Escudero<sup>2</sup>, Esteban Correa Bedoya<sup>2</sup>, Yuliana Andrea Areiza Rico<sup>2</sup>, William David Tibavija Merchan<sup>2</sup>, Sergio Soto Henao<sup>2</sup> y Laura Natalia Osorno Bonolis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación de Estudios en Diseño - GED, Facultad de Diseño Industrial  
Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Medellín, Circular 1 N° 70-01, Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Investigación Materiales para el Mobiliario - MATERMOB, Centro Tecnológico del Mobiliario - SENA. Calle 63  
N° 59B-03, Itagüí, Colombia.

Autor de correspondencia: [investigacionctm@sena.edu.co](mailto:investigacionctm@sena.edu.co)

### Resumen

La intermodalidad como estrategia de transporte urbano ha demostrado un aporte significativo a la movilidad sostenible. Este esquema ha propuesto el uso de la bicicleta como uno de sus componentes más importantes, vinculando, por ejemplo, rutas preferenciales para bicicletas y la posibilidad de llevar la bicicleta en los sistemas integrados de transporte. Así, el fortalecimiento de la cultura de la bicicleta y el respectivo aumento en su uso como medio de transporte urbano, representa una oportunidad para la generación de alternativas de diseño para este objeto, teniendo presente su funcionalidad y portabilidad como requerimiento principal, dada la oferta de bicicletas urbanas y la creciente tendencia en el uso de bicicletas plegables. Por lo anterior se plantea un proyecto de investigación y desarrollo que tiene como objetivo el diseño de un marco para bicicleta plegable de madera que pueda ser construido en Colombia utilizando materiales locales, a través de un modelo de diseño concurrente en el que confluyeran la ciencia de los materiales, el diseño estructural, las técnicas de manufactura digitales y el diseño industrial en un proceso sistemático para reposicionar la madera como material estructural de la bicicleta e innovar mediante su aplicación para el desarrollo de bicicletas plegables. De este modo, se presenta la metodología empleada para el diseño de una bicicleta plegable urbana con un marco de madera maciza, los criterios de selección del material y la definición del patrón estructural teniendo en cuenta el estado del arte y las aproximaciones en construcción y diseño de bicicletas en el área local, Medellín. Sin embargo, no se enfatizará en el diseño particular de la bicicleta, su proceso de manufactura ni su validación ya que son etapas posteriores del proyecto que enmarca la investigación.

**Palabras claves:** Bicicleta plegable, movilidad urbana, madera, diseño, patrón estructural.

### Abstract

The intermodality as strategy of urban transport has demonstrated a significant contribution to the sustainable mobility. This scheme propose the use of bicycle as one of its most important components linking, for instance, preferential bicycle routes and the possibility to bring the bicycle in integrated transport systems. Thus, strengthening of the bicycle culture and respectively increasing in their use as urban transportation represents an opportunity for the alternative generation of design for this purpose, considering its functionality and portability as a main requirement, given the supply of urban bicycles and the growing trend in the use of folding bikes. From the above, a research and development project is proposed which aims to design a folding wooden bicycle framework that can be built in Colombian using local materials by means of concurrent design model in which materials science and structural design and digital manufacturing techniques and industrial design meets in a systematic process to reposition wood as a structural material for bicycles and to innovate by its application for the development of folding bicycles. In this way, it is presented the methodology to the design of a folding wooden bicycle, the materials selection criteria and the definition of structural pattern considering the state of the art and the approximation about building and design of bicycles in Medellín as local area. However, there is not focused on the bicycle design, manufacture process nor its validation because they are later stages of the research project.

**Keyword:** Folding bicycle, Urban mobility, Wood, Design, Structural pattern.

## 1. Introducción

Actualmente, se sabe que el crecimiento y la densificación de la población en las diferentes ciudades generan, de forma proporcional, un aumento en el número de automóviles. Analizando el caso de Estados Unidos, según la Organización Internacional de Productores Automotrices (IOCA) y los censos de *United States Census Bureau*, en el año de 1900 la cantidad de vehículos por cada 1000 habitantes era de 0.11 con 76.2 millones de habitantes; en 1930 incrementó a 217.34, con 123.1 millones de habitantes y en 2009 ya alcanzaba los 828 vehículos por cada 1000p, un total de 245.5 millones de vehículos y 306.8 millones de habitantes. Casos como este, cada vez son más comunes y ocasionan situaciones graves de contaminación, congestión, accidentalidad, escasez de recursos y dependencia de fuentes energéticas no renovables. Debido a esto, los entes gubernamentales se han propuesto crear estrategias que procuren por sistemas de movilidad sostenibles en las ciudades emergiendo así la bicicleta como un medio de transporte sostenible para trayectos cortos y para viajes largos integrados con los sistemas de transporte público existentes. En Medellín, actualmente cerca de un millón de vehículos circulan por las vías según datos de la Secretaría de Movilidad; es así donde iniciativas como *ENCICLA* Sistema de bicicletas públicas del Valle de Aburrá, el colectivo *SiClas* y las *ciclovías* organizadas por el Instituto de Deporte y Recreación de Medellín *INDER* cobran un papel importante en el plan *EnCicla PURA VIDA*[1] y la optimización de la red vial de la ciudad en su búsqueda de una movilidad sustentable[2].

Analizando la creciente cultura de la bicicleta en la ciudad, las más utilizadas son las tradicionales de marco con estructura en dos triángulos tanto urbana como de montaña o ruta, en materiales como aluminio, acero y algunos casos aislados de alto rendimiento en fibra de carbono, además de algunos desarrollos académicos en Madera de triplex y pino por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana. Adicionalmente, se evidencia una tendencia en la masificación del uso de bicicletas plegables como lo estudió e investigó en su momento la Universidad EAFIT[3] y finalmente un gran potencial de Antioquia en la práctica de deportes a dos ruedas como bicigrós, ciclismo de ruta y BMX, lo cual vislumbra una oportunidad permanente de desarrollo e investigación en el tema de bicicletas.

Ahora, limitando nuestro objeto de estudio a las bicicletas plegables, se identifican muchas marcas y modelos comerciales, dentro de las cuales tres de ellas se reconocen como hitos históricos de su desarrollo: La primera de ellas es la bicicleta "*Le petit bi*" diseñada en 1939 por André Jules Marcelin, que aunque inicialmente no plegaba el marco si lo hacía con elementos como el manubrio y la caña del sillín[4]. El segundo hito surge en la década de los ochentas, donde Marc Sanders diseña la bicicleta *Strida*, rompiendo el esquema formal para las bicicletas plegables usando como estructura un solo triángulo. Y, el tercer hito se da con los desarrollos de las bicicletas *Brompton* por Andrew Ritchie en Inglaterra y paralelamente en Estados Unidos la *Dahon* patentada por David Hon.[5]

Por otro lado, a nivel científico o investigativo, la información relacionada con el tema de las bicicletas plegables es poca, y se limita a realizar propuestas conceptuales sin profundizar en procedimientos de experimentación que permitan validar funcionalmente las bicicletas obtenidas. Dentro de la información obtenida, sobresale en el diseño conceptual de la bicicleta plegable el uso de herramientas digitales[6], la evaluación de algunos aspectos ergonómicos[7] y la selección de los materiales[8]. Aunque no todas las investigaciones llegan a la construcción del prototipo ni al estudio de la resistencia mecánica del diseño.

Ambos antecedentes se vuelven valiosos puntos de partida para la construcción y el diseño del proyecto que enmarca el presente artículo, en el cual se plantea una alianza estratégica para su desarrollo entre el Grupo de Investigación de Estudios en Diseño (GED) de la Universidad Pontificia Bolivariana (U.P.B) y el Grupo de Materiales para el Mobiliario *MATERMOB* del Centro Tecnológico del Mobiliario (CTM) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) para el Diseño y construcción de un prototipo funcional de bicicleta plegable urbana cuyo marco sea en madera maciza. Así, el conocimiento propiciado por los estudios previos realizados por el GED en la construcción de marcos de bicicletas en madera de pino (Triplex) y su importante logro en la construcción, rediseño y validación mecánica de marcos de BMX (entre ellos el de la campeona olímpica Mariana Pajón [9] y [10]). Sumado al conocimiento de *MATERMOB* en caracterización y transformación de maderas con técnicas de manufactura tradicionales y digitales por control numérico computarizado.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer la metodología empleada para el diseño de una bicicleta plegable urbana con un marco de madera maciza, los criterios de selección del material y la definición del patrón estructural teniendo en cuenta la exploración del estado del arte y las aproximaciones en construcción y diseño de bicicletas en el área local, Medellín. Además, se describirán de manera general las condiciones del diseño particular de la bicicleta, sus métodos de manufactura y sus procesos de validación.

## 2. Metodología

Metodológicamente, el proyecto se desarrolla partir de cuatro fases que son: Información, Formalización, Conformación y Validación. En la fase de información se trabajó inicialmente con una investigación exploratoria basada en técnicas y herramientas de vigilancia tecnológica con el fin de definir el estado del arte de las bicicletas plegables en el mundo incluyendo aquellas fabricadas en madera. Con el estado del arte se desarrolló también un esquema de análisis comparativo entre al menos 20 tipos de bicicletas plegables de manera que pudieran extraerse tanto las características comunes a ellas como los aspectos diferenciadores que cada uno de los modelos presentaba.

Otro asunto importante con el análisis comparativo consistió en la definición del patrón geométrico de la bicicleta. El patrón geométrico hace referencia a la distribución espacial de los seis puntos constructivos más relevantes en la configuración geométrica de la bicicleta. Estos puntos son: el eje trasero, el eje de transmisión, el eje delantero, el punto en el que la caña del sillín se une con el marco y los

puntos inferior y superior del frente de dirección. El patrón geométrico define dos condiciones fundamentales para el diseño de una bicicleta: el ajuste ergonómico que la bicicleta tiene con respecto al usuario, específicamente relacionado con la antropometría y la biomecánica en el momento de uso y el ajuste que tendrá el marco con los diferentes componentes que se acoplarán a él. Con el patrón geométrico se definió el patrón estructural. Éste hace referencia a las líneas constructivas que unen los puntos referenciados en el patrón geométrico. En este patrón es importante resaltar que las líneas podrán ser rectas, curvas o superficies completas que a su vez podrán ser planas o curvas. El patrón estructural permite establecer la materialidad de la bicicleta en función de su resistencia, su rigidez y su estabilidad.

La fase de información incluyó además la realización de entrevistas con usuarios frecuentes y expertos de bicicletas plegables urbanas con el fin de reconocer aquellos requerimientos que desde el uso y la percepción deberían ser tenidos en cuenta dentro del desarrollo de la bicicleta. Se llevó a cabo también una investigación documental en torno al contexto de las bicicletas de madera en el mundo, buscado referenciar geometrías y tipos de maderas utilizadas para su construcción. La selección del material para el marco, fue ejecutada también en la fase de información. Para ello se hizo un análisis de las propiedades de las maderas que son utilizadas en el mundo para la fabricación de marcos de bicicletas y se compararon con las maderas disponibles para el proyecto, permitiendo la escogencia de un candidato que se acercaba lo mejor posible al perfil ideal de material necesario. Por último, la fase de información permitió la definición de un concepto de diseño y la selección de los referentes formales y estéticos para el diseño, así como también la selección y valoración de los requerimientos de diseño.

La fase formalización consistió en la experimentación formal a través de variaciones sobre el patrón estructural con base en un mismo patrón geométrico. Esta experimentación basó su trabajo en variables como la coherencia formal, el desempeño estructural, la plegabilidad y la viabilidad productiva. La base de la experimentación fue el concepto definido. Se usó un esquema de filtros a través de los cuales cada una de las propuestas desarrolladas por todos los miembros del equipo se evaluaban y con ello, se llegó al patrón estructural base para el inicio de la fase de conformación. Este patrón se desarrolló en detalle y se compilaron todas las variables definidas a la luz de la lista de requerimientos establecida.

La fase de conformación estableció como variables de trabajo a la selección y adaptación de la tecnología de fabricación y la fabricación de prototipos. Para la escogencia de las tecnologías de fabricación se tomaron en cuenta variables como la precisión dimensional, la libertad morfológica y el acceso local a los equipos y al conocimiento técnico especializado para su manejo. Una vez definida la tecnología de fabricación se ajustaron los detalles del diseño con base en los condicionantes de esta y se desarrollaron primero una serie de prototipos de validación dimensional, luego unos de validación estructural y por último unos de validación ergonómica. Estos prototipos fueron fabricados en una madera laminada de pino y luego en la madera seleccionada.

La fase de validación consiste en la valoración del desempeño estructural, funcional y ergonómico de la bicicleta. Para ello se utilizaron los protocolos de prueba desarrollados por Valencia-Escobar, Zuleta y Rodríguez [9] y [10] para marcos de bicicletas BMX. Lo anterior se hizo con base en el tamaño de los marcos y de las ruedas ya que para este tipo de bicicletas no se encontró referencia a ningún tipo de normativa experimental. En este momento el proyecto se encuentra en la fase de validación y los primeros resultados apuntan a que el patrón geométrico seleccionado y el patrón estructural definido se ajustan a los requerimientos.

### 3. Resultados y Discusión

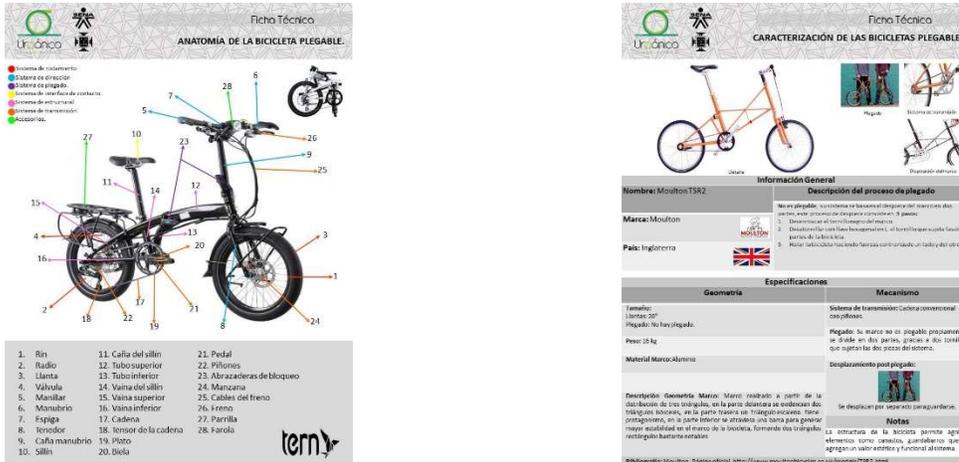
#### 3.1. Fase de información

De la fase de información se obtuvieron fichas técnicas de las veinte (20) bicicletas analizadas. Estas fichas dan cuenta de las características específicas de cada bicicleta, tanto en cuanto a las partes fundamentales como en aquellas partes accesorias que se incluyen con el fin de aumentar el nivel de utilidad y ajuste al contexto de ellas. La Figura 1a muestra un ejemplo de las fichas desarrolladas para un modelo de la marca Tern. Estas fichas dieron cuenta también de aspectos como el proceso de plegado en el cual se analizó el mecanismo, el tiempo y el volumen final de la bicicleta luego del proceso. La figura 1b muestra un ejemplo de esta parte de las fichas para un modelo de bicicleta de la marca Moulton.

Con los análisis pertinentes de los componentes y las dimensiones de las diferentes bicicletas plegables comerciales, se logró concretar las características diferenciadoras que definen este tipo de bicicletas. Las bicicletas plegables se caracterizan principalmente por su portabilidad, la capacidad de integración a otros sistemas públicos y privados de movilidad urbana y por su facilidad de almacenamiento en espacios reducidos.

Estas bicicletas deben tener un conjunto de componentes que garanticen la seguridad de quien la esté manejando, puesto que el contexto para el que está dirigida, la ciudad, posee un sinnúmero de riesgos, sin contar con las variaciones climáticas y las del territorio mismo. Estos elementos son entre ellos campanilla, gato, guardabarros y por supuesto luminarias para su uso en la noche en función de hacer al sistema bicicleta-usuario visible para otros actores de la movilidad y la visualización de variaciones del terreno, muy comunes en algunas ciudades colombianas.

Por otro lado, en cuanto a características dimensionales, se encontró que el tamaño de las llantas debe ser de veinte pulgadas para asegurar la compactabilidad de elemento una vez plegado y no generar mayor variación en el peso. Se definieron también dimensiones particulares como la distancia entre los ejes, la altura del manubrio con respecto al piso y la distancia entre el sillín y el manubrio. Estas medidas son importantes ya que de ellas depende la postura que adopta el cuerpo, que se espera que mantenga la espalda recta, permitiendo mayor rango de visibilidad en el camino.



Con respecto al uso de la madera para las bicicletas se encontró que este material ha estado presente en la fabricación de bicicletas desde los orígenes de la bicicleta en el siglo XVII. Si bien la madera fue relegada como material para la producción en serie de bicicletas por las aleaciones de acero, aluminio y la implementación de materiales compuestos, ha existido siempre una industria que ha dado a este material un valor agregado de personalización en el diseño de los marcos de las bicicletas. Dentro del esquema actual se presentan dos tipos de estrategias para el trabajo con este material: Una es la manufactura serializada y otra la manufactura especializada. Dentro de la primera es posible encontrar marcas que ofrecen bicicletas de ruta fabricadas en madera de manera serializada como Renovo (Figura 2a) y Axalko (Figura 2b), de montaña como Renovo (Figura 2c) y Connor (Figura 2d) y urbanas como Bough (Figura 2e) y Gaia (Figura 2f)), esta última, la única marca colombiana en el mercado serializado.

En cuanto a las bicicletas de manufactura especializada se encontró que son múltiples los artesanos, carpinteros y/o aficionados que elaboran bicicletas como elementos de personalización y exclusividad o incluso como elementos de formación o conceptualización ingenieril y de diseño. Uno de los ejemplos más representativos de este mercado, son las bicicletas del japonés Sueshino Sano (Figura 3), quien después de dedicarse por décadas a la construcción de barcos, decidió utilizar su talento en fabricar bicicletas totalmente de madera con manufactura manual de precisión, construyendo anualmente tan sólo 2 unidades 100% diferentes.



a



b



c



d



e



f

**Figura 2.** a. Bicicleta de ruta Renovo [11]. b. Bicicleta de ruta Axalko[12]. c. Bicicleta de montaña Renovo[11]. d. Bicicleta de montaña Connor[13]. e. Bicicleta urbana Bough [14] y f. Bicicleta urbana Gaia [15].



**Figura 3.** Bicicleta artesanal de Sueshino Sano [16]

Finalmente, aunque es claro que en el mundo existen una gran cantidad de modelos de bicicletas de madera, solo se han identificado dos aproximaciones a la tipología de bicicleta plegable. Una de ellas se basa en el mismo principio que tiene la bicicleta Strida construida originalmente en aluminio (Figura 4a) y se presenta como un proyecto del tipo "hágalo usted mismo" con materiales y componentes en su mayoría adaptados. El otro es un diseño desarrollado por una estudiante universitaria en Indonesia en el año 2013 que se ajusta al modelo de doble triángulo con un sistema de bisagras en la parte central del marco (Figura 4b). No obstante, ninguno de los dos proyectos presenta información relevante en cuanto a su proceso de diseño y análisis, lo que representa una oportunidad de desarrollo toda vez que aunque es posible identificar en el mercado más de diez marcas que ofrecen bicicletas con marcos fabricados en madera, ninguna de ellas ofrece comercialmente bicicletas plegables.



Figura 4. a. Bicicletas plegable de madera Monotriángulo [17]



b. Bicicleta plegable de madera doble triángulo [18].

Se encontró que las maderas usadas en la manufactura de bicicletas, son en su mayoría aquellas denominadas *hardwood* o maderas duras obtenidas de árboles cultivados. Las especies forestales maderables más utilizadas por los comercializadores de estas bicicletas, según sus páginas web, varían, entre: Arce (*maple*), Fresno (*Ash*), Nogal (*Walnut*), Satine (*Bloomwood*), haya (*Beech*), Wengue (*Wenge*) e incluso bambú (*bamboo*); todas ellas caracterizadas por su densidad semidura y por su alta disponibilidad en el mercado europeo.

donde tienen circulación estas bicicletas. Estas maderas son utilizadas macizas o en algunos casos como tableros contrachapados, cuya geometría es generada por mecanizado manual o por máquinas de control numérico computarizado conformando en este último caso, piezas huecas que optimizan la relación resistencia-peso y que después son unidas por medio de resinas generalmente epóxicas y sellados posteriormente con poliuretano.

La Tabla 1 muestra las propiedades generales de las maderas mencionadas. Sin embargo, se encontró que no existe en la literatura un criterio definido para la selección de dicha madera; salvo su dimensión estética, disponibilidad y trabajabilidad. Por tal razón, se propone utilizar el valor promedio de sus propiedades como referente para la definición de especificaciones que debe tener la madera para la fabricación de marcos de bicicleta. Así, a la hora de contemplar una producción en Colombia de este tipo de bicicletas, existen varios factores a tener en cuenta para potenciar la fabricación de bicicletas en madera como un producto sostenible para la producción nacional, tal como se muestra en la Tabla 2.

Especie	Densidad	Módulo de resistencia [Mpa]	Módulo de elasticidad [Gpa]	Relación de contracción T/R	Grado de amenaza
Arce	0,69	123	11,8	2,06	-
Bambú	0,69	122,3	19	-	-
Fresno	0,69	103,6	12,31	1,7	-
Haya	0,72	110,1	14,31	2	-
Nogal	0,64	111,5	10,81	1,4	Alto
Satine	1,05	174,4	20,78	1,5	-
Wengue	0,87	151,7	17,59	1,7	-
Promedio	0,76	128,09	15,23	1,73	-
Desviación	0,15	25,69	3,90	0,70	-

Tabla 1. Propiedades generales de las maderas comúnmente utilizadas en el mundo para la fabricación de marcos de bicicletas

Variable	Requerimiento	Observación
Densidad	500 kg/cm <sup>3</sup> a 700 kg/cm <sup>3</sup> media-alta	Paredes celulares gruesas y tamaños de poros estrechos.
Trabajabilidad	Facilidad en el maquinado	Maderas de densidad media que permitan la manipulación y maquinado en los procesos de manufactura convencionales.
Módulo de Ruptura	120MPa ± 10MPa	
Módulo de elasticidad	12 GPa ± 1GPa	
Grado de explotación	Maderas reforestadas sin peligro de extinción	Maderas sin ningún grado de amenaza según las Corporaciones autónomas regionales de Colombia

Tabla 2. Criterios de selección de la madera

De este modo, la selección de la madera apropiada para la construcción de la bicicleta plegable involucró el considerar el acceso a las maderas convencionales en esta industria y la disponibilidad de éstas sin restricciones.

Así, se hizo pertinente realizar un análisis de las especies forestales maderables disponibles Colombia [9] e identificar las especies cuya presentación comercial, disponibilidad y trabajabilidad permita mayor versatilidad en la conformación de estructuras complejas y geometrías no convencionales, en busca de su producción sostenible y una libertad total en la interacción entre el material, el diseño y los procesos de manufactura, teniendo en cuenta el grado de amenaza de la especie en Colombia. La tabla 3 muestra la comparación de las maderas colombianas que se ajustan en mayor medida a los requerimientos mencionados.

Especie	Densidad	Módulo de resistencia [Mpa]	Módulo de elasticidad [Gpa]	Relación de contracción T/R	Disponibilidad en el mercado colombiano
Valor promedio	0,76	128,09	15,23	1,73	

Eucalipto	0,73	118	14	1,16	Disponible
Guadua	0,65	117,75	13,2	-	Disponible
Teca	0,61	97,1	12,28	1,17	Disponible

Tabla 3. Comparación de las maderas colombianas que se ajustan en mayor medida a los requerimientos del proyecto.

De las maderas seleccionadas, sobresale la TECA como la madera colombiana cuyas propiedades se asemejan más a los valores promedio de las maderas europeas utilizadas en bicicletas, además, de sus propiedades estéticas, su compatibilidad para unirse con materiales metálicos típicos de refuerzos y componentes mecánicos y su excelente trabajabilidad tanto en seco como en verde gracias a la homogeneidad de su estructura interna. El eucalipto por su parte, presenta contracciones internas y dado que su crecimiento es helicoidal presenta una estructura interna no uniforme, por lo que en su dimensión estética no es muy deseado, por lo que fue descartado para el presente desarrollo, al igual que la guadua, cuyos procesos de transformación requieren un grado de complejidad superior al deseado.

Como resultado final de la fase de información se tienen los requerimientos de diseño. Estos hacen referencias a todas las cualidades físicas, mecánicas, estéticas y ergonómicas que debe tener la bicicleta plegable urbana de madera, para alcanzar su mayor aceptación en el mercado y para que al mismo tiempo ejecute de manera óptima sus funciones. Se definió que los requerimientos principales deben enfocarse en los conceptos de usabilidad, novedad formal, eficiencia, diseño para la manufactura y adaptabilidad al contexto y al usuario.

Con base en estos conceptos se definieron los condicionantes desde lo técnico, la relación hombre-objeto, la estética y la utilidad.

### 3.2. Fase de formalización

De la fase de formalización se logró desarrollar un patrón estructural que se ajustó a los requerimientos. La figura 5 muestra un esquema en el que se evidencia el resultado obtenido del análisis de los patrones geométrico y estructural para el proyecto. Se tomó la decisión de trabajar con una estructura central de base curva ya que las estructuras con arcos tienen mayor capacidad de resistencia que otras configuraciones estructurales. Los elementos del arco trabajan de manera eficiente a compresión, transmitiendo las fuerzas de manera más uniforme hacia los apoyos del sistema. La forma final del marco no puede ser divulgada aún ya que, por un lado, el proyecto no concluye todavía y es posible que se hagan cambios sobre ella, y por el otro, porque se espera que el resultado final pueda ser patentado, lo que limita la posibilidad de socialización antes de este proceso.

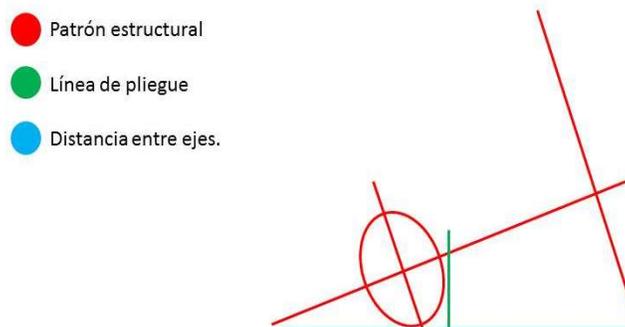


Figura 5. Esquema del patrón geométrico y estructural de la bicicleta plegable a desarrollar.

### 3.3. Fase de conformación

La materialización de las ideas desarrolladas en la fase de formalización combinó técnicas de manufactura avanzada asistidas por computador con técnicas de trabajo manuales. La complejidad formal del sistema limita el uso exclusivo de las técnicas de manufactura digital. Se validó el proceso de manufactura a través de la realización de prototipos en láminas de triplex de pino. Con ello fue posible establecer el nivel de precisión dimensional tanto en cada una de las piezas del sistema como en las interfases de contacto al momento del ensamble. Se definió también la necesidad de incluir dentro del diseño piezas fabricadas en acero estructural de manera que con ellas se refuercen las zonas en las cuales los niveles de esfuerzo y de deformación son mayores.

En este momento se está validando todo el procedimiento con el material definitivo que fue seleccionado.

### 3.4. Fase de validación

Sobre los prototipos desarrollados en triplex de pino se han desarrollado algunas pruebas estructurales. Esto se ha hecho buscando dos objetivos: adaptar los protocolos de prueba y los equipos disponibles para los marcos plegables, ya que se han usado solamente para la caracterización estructural de marcos rígidos y definir los puntos más críticos desde el comportamiento estructural del sistema. De esta validación primaria es posible decir que el modelo desarrollado cumple con el criterio de resistencia mecánica, ya que ante la aplicación de fuerzas de 400kg en dirección vertical sobre el eje centro no mostró signos de falla. También fue posible identificar que el criterio de rigidez, será el que demande mayor atención, ya que los valores de las deformaciones alcanzadas en las pruebas realizadas en los prototipos iniciales están muy cerca de los límites permisibles establecidos para este tipo de marcos.

### 4. Conclusiones

Como conclusión general se puede expresar que el desarrollo de una bicicleta es un proceso complejo que involucra variables de diversas naturalezas, lo que hace necesario y casi que imperativo la presencia de diferentes profesionales en el equipo de desarrollo. Si además de lo anterior, al proyecto se suma el hecho de estar trabajando con un material no tradicional para una aplicación de la cual se tienen pocos, por no decir, nulas referencias en el mundo, el proyecto adquiere un carácter experimental que lo enriquece en función de la generación de nuevo conocimiento para los integrantes del equipo.

La necesidad de conocer a priori el funcionamiento del sistema, antes de proceder con la materialización de los prototipos, no puede ser desarrollada a través del uso de modelos de predicción para el comportamiento mecánico de sistemas estructurales, como los elementos finitos, ya que, la anisotropía del material y la incertidumbre de las propiedades mecánicas del mismo, limita el nivel de ajuste de los modelos existentes, lo que implica que el diseño de una bicicleta plegable con marco de madera sea un ejercicio iterativo experimental en el que los modelos físicos se convierten en la principal fuente de información para la validación funcional.

### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Sistema de Investigación y Desarrollo tecnológico del SENA SENNOVA y al CIDI de la UPB por la financiación del proyecto *Diseño y construcción de un prototipo funcional de bicicleta plegable urbana de madera* a través de la convocatoria de investigación aplicada de 2016. Además, al personal técnico de planta en el Centro Tecnológico del Mobiliario y de la Universidad Pontificia Bolivariana por participar con empeño y dedicación en el desarrollo y construcción de los marcos para el ensayo de resistencia de materiales y en soldadura y maquinado de materiales metálicos respectivamente.

### 6. Referencias Bibliográficas

- [1] "Plan EnCicla Pura Vida," Área Metropolitana del valle de Aburrá. [Online]. Available: <http://www.metropol.gov.co/Movilidad/Pages/EnCicla.aspx>.
- [2] G. Ospina Zapata, "Medellín busca una movilidad sustentable," *El colombiano*, Medellín, 14-Jul-2016.
- [3] R. A. Mayo, "En el mundo de las bicicletas y los objetos plegables," *El eafitense*, vol. 102. Fondo Editorial Universitario EAFIT, Medellín, pp. 78–83, 2010.
- [4] M. a Maleque, M. S. Hossain, and S. Dyuti, "Material properties and design aspects of folding bicycle frame," *Adv. Mater. Res.*, vol. 264–265, no. 1, pp. 777–782, 2011.
- [5] To. Hadland, (Hans-Erhard Lessing), N. Clayton, and G. W. Sanderson, *Bicycle Design: An illustrated History*. The MIT Press, 2004.
- [6] M. Arunachalam, R. Arun Prakash, and R. Rajesh, "A Typical Approach in Conceptual and Embodiment Design of Foldable Bicycle" *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 87, no. 19, pp. 9–16, 2014.
- [7] E. Muslim, B. Nurtjahyo, and R. Ardi, "Ergonomic evaluation of a folding bike design using virtual environment modelling," *Int. J. Technol.*, no. 2, pp. 122–129, 2011.
- [8] S. Shishir, P. Manjunath, R. Pavanasadun, and R. Sathyajith, "Design and fabrication of foldable bicycle," *Int. J. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 6, pp. 6–12, 2015.
- [9] Valencia-Escobar, A., Zuleta, A. A. y Rodríguez C., "Caracterización estructural de marcos de bicicletas para bmx" *Proceedings CIIMCA 2015*, p. 46, 2015.
- [10] Zuleta, A. A. Valencia-Escobar, A., y Rodríguez C., "Análisis mecánico y micro-estructural del material de un marco de bicicleta de BMX", *Proceedings CIIMCA*, p. 45 2015.
- [11] SloCyclist, "Is Wood the New Carbon? Renovo Makes High-End Wooden Race Bikes". Disponible en <http://www.slocyclist.com/wood-new-carbon-renovo-makes-high-end-race-bikes/>
- [12] Suárez, David, "Axalko, bicicletas de madera". Disponible en <http://www.arueda.com/axalko-bicicletas-de-madera/>
- [13] Freshness, "Connor woody cruiser". Disponible en: <http://www.freshnessmag.com/2013/11/02/connor-woody-cruiser/>
- [14] Pinter, Dave. "World's First Electric Wooden Bike Debuts At NYCxDesign". Disponible en: <http://www.psfk.com/2014/05/wooden-electric-bike.html#%213utND>



- [15] El Tiempo. "Bicicletas ecológicas de madera, una forma de rodar que rompe esquemas". Disponible en: <http://www.eltiempo.com/bogota/bicicletas-ecologicas-en-bogota/15762716>
- [16] Oloiza, Jeff. "Impossibly Light, Totally Sleek Handmade Bikes Built by a Tokyo Shipwright". Disponible en: [http://www.nytimes.com/2013/10/23/t-magazine/handmade-bikes-built-by-a-tokyo-shipwright.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2013/10/23/t-magazine/handmade-bikes-built-by-a-tokyo-shipwright.html?_r=0)
- [17] Wooden Bikes. "Wooden Bikes: Fun Bikes that you can make yourself, from wood and metal". Disponible en: <http://woodenbikes.com/images/wood-bike.jpg>
- [18] S.A. Disponible en: <https://oopinarbainah.wordpress.com/2014/05/22/g-bike-from-melisa/>

## Diseño de un Brazo Robótico de Posicionamiento para Apoyo en Tareas Industriales

### Design of a robotic arm for positioning support industrial tasks

J. J. I. Navarro, J. L. Palacio, M. R. Fulla

Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Calle 73 No.73ª-226, Medellín, Colombia

[jino.fra@gmail.com](mailto:jino.fra@gmail.com) , [jlpalaci@pascualbravo.edu.co](mailto:jlpalaci@pascualbravo.edu.co), [marlonfulla@yahoo.com](mailto:marlonfulla@yahoo.com)

### Resumen

En la actualidad, existen diversos procesos en la industria que requieren ser automatizadas para efectos de optimización que permitan elevar los índices de productividad. Muchas de estos procesos están relacionadas con tareas de orientación y posicionamiento donde las cargas a manipular no superan los 40 kg las cuales podrían manipularse con brazos robóticos comerciales. Si bien ya existen equipos comerciales para realizar estas tareas, los elevados costos asociados limitan su adquisición e implementación en la industria local. Este hecho motiva la realización del presente trabajo donde se lleva a cabo un diseño de un brazo robótico de posicionamiento para apoyo en tareas industriales. El brazo se concibe con una configuración esférica inspirado en la anatomía del brazo humano donde inicialmente es posible realizar un posicionamiento de una carga en un plano. Para el movimiento de las articulaciones se utiliza una tecnología servomotriz operada mediante controladores comerciales estándares de la industria. Mediante un estudio de modelamiento computacional se estableció el tipo de material, dimensiones y características morfológicas de los eslabones que permitan soportar las cargas con las mejores características de portabilidad del brazo que se reflejen en su relación carga máxima - peso del brazo. Los detalles del estudio y la escogencia de los materiales mediante matrices de selección que permitan esclarecer sus propiedades mecánicas, son abordados en el presente trabajo.

**Palabras claves:** Posicionamiento y orientación, brazo robótico, servomotores.

### Abstract

Currently, there are many industrial processes that require automatization support in order to optimize them and increase the productivity rates. Many of these processes are related to orientation and positioning tasks where loads to be handled do not exceed 40 kg which could be manipulated with commercial robotic arms. While there are already commercial equipment to perform these tasks, the associated high costs limit their acquisition and implementation in the local industry. This fact motivates the realization of this work which is carried out a design of a robotic arm positioning to support industrial tasks. The arm is conceived with a spherical configuration inspired by the anatomy of the human arm which initially is possible positioning a load on a plane. For movement joints, a servo based technology operated by commercial drivers with industry standards is used. By means of a computational modeling study it was established the material type, size and morphological characteristics of the links that allow support loads with the best features of portability of the arm reflected on the maximum load-arm weight ratio. Details of the study and choice of materials through a matrix selection scheme that sheds light on their mechanical properties is addressed in this paper.

**Keywords:** Positioning and orientation, robotic arm, servomotors.

### 1. Introducción

El diseño y la implementación de brazos robóticos para tareas industriales [1]-[5], es una actividad de vital importancia toda vez que las metodologías y los montajes experimentales que se requieren, conllevan a manipular y cambiar continuamente de posición objetos

y equipos con gran precisión y velocidad. Algunos autores han desarrollado brazos robóticos de nueve grados de libertad para tareas muy especializadas [6] y otros autores han refinado este tipo de dispositivos vía control difuso [7].

Particularmente, en trabajos previos, se ha venido desarrollando un brazo robótico para posicionamiento de instrumentación científica para prospección de subsuelos, el cual permite posicionamiento de una fuente de excitación acústica a una altura específica sobre un terreno [4], [5]. No obstante, se ha pensado en la posibilidad de extrapolar este diseño e implementarlo en tareas de posicionamiento industrial. Por ende, el presente trabajo está motivado y orientado hacia el diseño e implementación de un brazo robótico para tareas industriales, con tres ejes de libertad. Dicho brazo se concibe con una configuración esférica [8]-[10], teniendo una similitud con la anatomía del brazo humano en el escalamiento de sus dimensiones, y haciendo uso de una tecnología servomotriz operada mediante controladores comerciales estándares de la industria.

## 2. Metodología

Este proyecto cuenta con tres fases para su diseño y fabricación. En primer lugar, es necesario realizar la selección del modelo de brazo robótico más apropiado en cuanto a consideraciones de diseño como, por ejemplo, funcionalidad, resistencia, seguridad, apariencia, costo, entre otras. En segundo lugar, se requiere la selección de los materiales de fabricación, el cálculo de la estructura, el cálculo de cada sistema y subsistema, es decir, los mecanismos de accionamiento, elementos estructurales, elementos de sujeción, etc. Finalmente, se realiza el diseño 3D, la simulación de la estructura por medio de herramientas de análisis computacional y seguidamente se procede a la fabricación del prototipo.

El dispositivo propuesto está compuesto por 6 sistemas principales que son: el carro, la mesa de giro, el hombro o base soporte, el brazo, el antebrazo y la muñeca o "Toolholder". Este brazo robot, debe realizar movimientos de elevación, descenso, traslación y giro a  $360^\circ$  de una carga de 150 N a una distancia horizontal promedio de 3.5 m.

Al final de la siguiente sección se presentan los resultados de un modelo geométrico para el posicionamiento de una carga genérica, inicialmente en un plano, dentro del rango de los 0 a los 150N.

## 3. Resultados

Una vez realizado el levantamiento de la información relacionada con los diferentes tipos de actuadores robóticos de tipo hidráulico y electromecánico disponibles en el mercado y que pueden ser candidatos para ser considerados dentro de la solución del problema de diseño, se clasificaron en una matriz de decisión en términos de sus características de potencia, control, peso y volumen, costo y mantenimiento, precisión y velocidad. En dicha matriz se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de los mecanismos de accionamiento motriz, obteniéndose que la tecnología basada en servomotores, es la que mejor se ajusta en comparación con los motores y cilindros neumáticos e hidráulicos de acuerdo a las necesidades técnicas descritas en [1]-[5]. Consecuentemente, se procedió a clasificar el tipo de material más óptimo en términos de su apariencia, anodizado, costo, comercialización, mecanizado, peso, rigidez y soldabilidad, encontrándose que una aleación 6061-T6 puede satisfacer las características técnicas que se requieren de un brazo robótico para posicionamiento y apoyo en tareas industriales [1]-[5]. Posteriormente, se seleccionó los mecanismos de accionamiento y elementos de sujeción cuyo detalle específico no se detallan aquí debido a reservas asociadas al proceso de vigilancia tecnológica del proyecto. Sin embargo, es posible mencionar algunos detalles de la metodología del sistema de posicionamiento, inicialmente en un plano. En la Fig. 1 se muestra el modelo geométrico desarrollado para el posicionamiento de una carga, la cual se encuentra a una altura  $h$  sobre la tierra y a una distancia  $d$  del extremo del motor que controla el movimiento del hombro.  $h$  y  $d$  son los parámetros geométricos introducidos por el usuario de acuerdo a sus requerimientos.

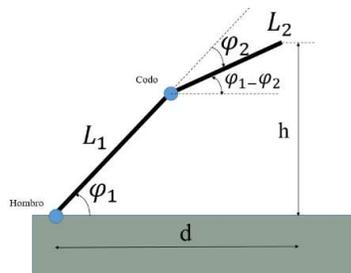


FIGURA 1. MODELO GEOMÉTRICO OBTENIDO PARA EL POSICIONAMIENTO DEL BRAZO ROBÓTICO.

El problema del posicionamiento con los motores consiste en definir las posiciones angulares y tales que con las longitudes del brazo y del antebrazo, permitan ubicar la carga a una altura  $h$  y a una distancia  $d$  del hombro. En el caso particular de tareas de prospección, el sistema de sujeción debe posicionar en un punto del espacio, una fuente de excitación acústica con forma cónica cuyo peso aproximado es de 15 Kg.

Después de realizar un análisis geométrico de la estructura, se concluye que las distancias  $h$  y  $d$ , se relacionan con los demás parámetros a través de las siguientes ecuaciones:

$$h = L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

$$d = L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2)$$

Las cuales permiten obtener relaciones trascendentales para  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  en términos de todos los demás parámetros.

Finalmente, después de realizar un análisis presupuestal se obtuvo que el diseño y construcción del brazo robótico es financieramente viable en el marco del proyecto y se dará inicio a la fase de construcción, los detalles es materia de otro trabajo futuro.

#### 4. Conclusión

Las matrices de decisión permitieron realizar una selección estratégica de materiales, sistemas motrices y mecanismos de sujeción, que permitieran definir las propiedades y características de un brazo robótico para el posicionamiento de cargas en el rango 0-150 N en tareas industriales. Finalmente se desarrolló un modelo geométrico de posicionamiento, inicialmente en un plano, de una carga genérica, donde los parámetros de entrada corresponden con la altura y la distancia del motor del brazo donde se desea ubicar la carga, y el sistema proporciona las posiciones angulares de los servomotores quienes controlan el movimiento de los eslabones.

#### 5. Referencias

- [1] A. Valente «Reconfigurable industrial robots: A stochastic programming approach for designing and assembling robotic arms» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 41, pp. 115–126, 2016.
- [2] T. Messay, R. Ordóñez, E. Marcil «Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 37, pp. 33–48, 2016.
- [3] Y. Wu, A. Klimchik, S. Caro, B. Furet, A. Pashkevich, «Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments», vol 35, pp. 151–168, 2015.
- [4] W. Scott, J. Martin y G. Larson, «Experimental Model for a Seismic Landmine Detection System,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, nº 6, pp. 1155-1164, 2001.
- [5] W. Zhao, E. Forte, G. Pipan y G. Tian, «Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archeological prospection,» *Journal of Applied Geophysics*, vol. 97, pp. 107-117, 2013.
- [6] Ankit Sharma, Mathew Mithra Noel, “Design of a low-cost five-finger anthropomorphic robotic arm with nine degrees of freedom”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.28, pp.551–558, Aug. 2012.
- [7] Zhi Liu, Ci Chen, Yun Zhang, C.L. Philip Chen, “Coordinated fuzzy control of robotic arms with actuator nonlinearities and motion constraints”, *Information Sciences*, vol. 296, pp. 1–13, 1 Mar. 2015.
- [8] Jing Zhao, Biyun Xie, Chunyu Song, “Generating human-like movements for robotic arms”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 81, pp. 107–128, Nov. 2014.
- [9] E Battistelli, A Bini, A Cisbani, M Cosi, P Falciani, G Preti, “Scientific instruments studied by Galileo Avionica for Mars surface exploration”, *Planetary and Space Science*, vol. 52, pp. 47–53, Mar. 2014.
- [10] M. Hernández, M. B. Ortiz, C. A. Calles y J. C. Rodríguez, *Robótica: Análisis, modelado, control e implementación*, Tamaulipas: OminaScience, 2015.

## Implementación de Sistema de Reconocimiento de Voz Empleando Software y Hardware Libre, Enfocado al Internet de las Cosas y la Automatización

### Characterization of a low cost electromyographic signal processing system used in the upper limb activation prosthesis

Carlos Alberto Valencia Hernández<sup>1</sup>, Jhon Alexander Ortiz Alcalde<sup>2</sup>, Carlos Julian Gallego Duque<sup>3</sup>

1 Institución Universitaria Pascual Bravo (Colombia), [carlos.valencia@pascualbravo.edu.co](mailto:carlos.valencia@pascualbravo.edu.co)

2 Universidad Autónoma Latinoamericana (Colombia), [jhon.ortizal@unaula.edu.co](mailto:jhon.ortizal@unaula.edu.co)

3 Universidad Autónoma Latinoamericana (Colombia), [cajugadu@yahoo.es](mailto:cajugadu@yahoo.es)

#### Resumen

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un dispositivo basado en Software y Hardware libre, que manipule elementos electrónicos propios de sistemas domóticos e inmóticos por medio de comandos de voz. Para ello se empleó el microcomputador Raspberry Pi 2, en

el cual se integró el software de reconocimiento de comandos de voz y el hardware de activación de dispositivos, obteniendo un sistema compacto y flexible. Como resultado se logró implementar un sistema basado en hardware y software libre que es capaz de reconocer una serie de comandos de voz simples y realizar acciones como respuesta a dichos comandos como: activación de actuadores on-off y ejecutar cualquier tipo de scripts que se programe.

**Palabras claves:** reconocimiento de voz, Raspberry Pi, Domótica, Inmótica.

## Abstract

This work aims to characterize an economical way for the acquisition and processing of electromyography signals to be used in handling a prosthetic hand, a commercial electromyographic module three leads V3 were use, the V3 module has four stages, the first amplification, the second correction, and the last two filtering. For characterization the V3 performance were tests in a laboratory environment, taking a biceps movement of a male 28-year-old. As results, a reactive behavior by the V3 for the muscle movements was find, a variation in the output voltage of 0.5V (with the muscle at rest) to 5V (with the contracted muscle) is appreciated, also the system is susceptible to faults generating supply voltages crimped in the output signal. it was established that it is possible to distinguish the level of intensity of the force on the muscle, allowing not only the on-off control of an actuator, also proportional control of an actuator, finally integrating systems embedded (Arduino, PICs, Raspberry PI) is possible without the signal strength is affected by the impedance from itself.

**Keywords:** Voice Recognition, Raspberry Pi, Home Automation, Building Automation

## 1. Introducción

Entendiendo el concepto de domótica como la automatización de necesidades del hogar empleando sensores que recopilen información y controladores locales o a distancia se puede decir que desde los años 70' se comienza a implementar los primeros dispositivos de este tipo aplicados a hogares y la industria, en países potencia como Estados Unidos, Alemania y Japón. Aunque del concepto de domótica es imposible precisar una fecha concreta de su nacimiento, pues no se trata de un hecho puntual, sino de todo un proceso evolutivo que se ha ido adaptando a las necesidades de los usuarios[1].

En la actualidad se cuentan en el mercado muchas soluciones o alternativas para controlar funciones básicas dentro del hogar. Un ejemplo de ello es manipular algunos electrodomésticos, a través de una aplicación ya sea en un dispositivo móvil u otros elementos tecnológicos[2].

Como toda tecnología nueva ingresa al mercado a altos costos, pretendiendo llegar a hogares de clase media y alta, pero en la práctica esta tecnología solo puede ser absorbida por clientes con alto poder adquisitivo. debido a esto han surgido soluciones basadas en software y hardware libre [3][4] las que además de ser económicas no están sujetas a temas de licencia ni a condiciones de uso dictadas por una casa matriz si no por los mismos usuarios , razón de ser de estos productos. Este trabajo muestra una de estas soluciones representada en un sistema de reconocimiento de vos empleando software y hardware libre orientada a la domótica y la automatización.

## 2. Configuración de elementos Software y Hardware

Para el desarrollo de este proyecto se dispuso de una serie de elementos de Hardware que se describen de forma detallada, la variación de las características de alguno de estos componentes, podría llegar a entorpecer la recreación del mismo.

### 2.1. Componentes Hardware

**2.1.1. Raspberry Pi 2 modelo B:** Es la segunda generación de Raspberry Pi, que reemplaza a la Raspberry Pi 1 modelo B+

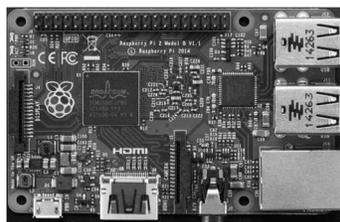


FIGURA 1. Raspberry Pi

**2.1.2. Memoria micro SD de mínimo 8GB clase 10:** El sistema operativo se lleva gran parte de la memoria, sin contar con el software de reconocimiento de voz. Cabe resaltar que la utilización de una memoria SD clase 10, optimiza el tiempo de ejecución de los procesos en la Raspberry.



FIGURA 2: Micro SD

**2.2.3. Tarjeta De Sonido USB 5.1.** – salida de audio y micrófono 3.5mm: este dispositivo es necesario, debido a que el modelo de Raspberry utilizado, no cuenta con su propia tarjeta de sonido, aunque en algunas fuentes sugieren en ausencia del primero, utilizar una webcam con micrófono incorporado o unos audífonos USB. Si se utiliza la tarjeta de sonido USB, se debe tener adicionalmente un micrófono, que para este caso se utilizó el micrófono de una diadema y un pequeño parlante para la salida de audio.



FIGURA 3: Tarjeta De Sonido USB 5.1. Audífonos Y Micrófono 3.5mm

**2.3.4. Wifi USB:** De igual manera es necesario este dispositivo, toda vez que la Raspberry no cuenta con esta tarjeta de red wifi incorporada.



FIGURA 4. Adaptador Wireless Nano USB Wifi Dwa-131 D-link

**2.1.5. Cable HDMI, Mouse, Teclado:** este cable y periféricos son necesarios para controlar la Raspberry, y poder hacer una configuración antes de usar el software Putty. Además de esto también se requiere una resistencia de 330 ohmios, un led y una protoboard: Estos elementos permitirán hacer pruebas de funcionamiento sobre el puerto GPIO, que será el punto de partida para conectar la Raspberry Pi a un Relé y switchear cualquier dispositivo de corriente alterna o directa.

## 2.2. Componentes Software:

**2.2.1. Win32 Disk Imager:** es empleado para instalar el Sistema operativo en la micro SD, al igual que para guardar imágenes de respaldo cuando ya se tenga configurado el sistema operativo en su totalidad.

**2.2.2. SD Formatter:** como su nombre lo indica, permite formatear la memoria SD para posteriormente instalar el sistema operativo, dado que el formateo que se realiza normalmente en Windows no es funcional cuando se desea instalar el sistema operativo Raspbian (basado en Linux).

**2.2.3. Putty:** permite controlar la Raspberry desde una terminal externa, para este caso se probó en Windows 7 y 10 con óptimos resultados. Esto fue necesario pues, aunque todos los comandos se pueden ingresar directamente a la Raspberry, las largas líneas y la inclusión de caracteres especiales en las mismas dificultan en gran medida su implementación de forma directa.

**2.2.4. Raspbian Jessie:** Existen muchos sistemas operativos para la Raspberry, pero Raspbian fue elegido por su interface amigable y su alta compatibilidad con periféricos.

### 3. Puesta en marcha

Para el montaje del sistema operativo Raspbian se emplearon los softwares para formatear la tarjeta SD y e Win32 Disk Imager para transferir la imagen del sistema operativo.



FIGURA 5. Software SD Formatter y Win32 Disk

Una vez hecho esto, el sistema operativo de la Raspberry iniciara automáticamente. Posteriormente se verificó la detección de los periféricos entre ellos el adaptador Wifi, lo que se puede constatar en la esquina superior derecha del escritorio, en el icono de redes. Para verificar la dirección de IP se utiliza la consola de comandos del Raspbian empleando el comando ifconfig, dicha IP se empleó para la configuración del software de monitoreo remoto Putty.

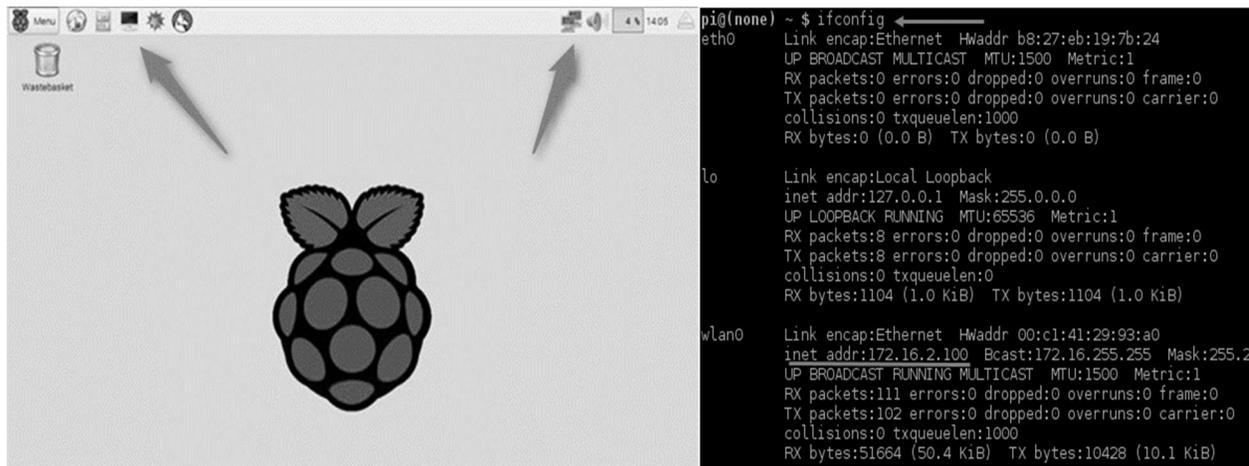


FIGURA 6. Sistema operativo Raspbin y consola de comandos

Para la manipulación de los puertos GPIO se creó un script en lenguaje Python el cual responde a los string 'encender' activando el puerto GPIO 7 o 'apagar' desactivando el GPO 7.

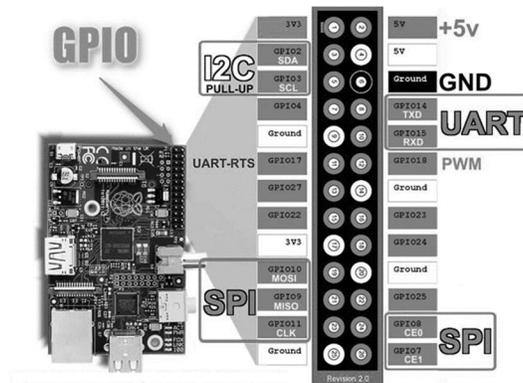


FIGURA 7. Ubicación del GPIO dentro de la Raspberry y función de cada Pin

Para enlazar el scrip de manipulación de puertos GPIO con la librería de lectura de comandos de voz (Voice Command V3) primero se realizó una comprobación de la compatibilidad del adaptador de audio USB con la Raspberry Pi. Para ello se ingresó a la interfaz gráfica del driver correspondiente de dicho adaptador

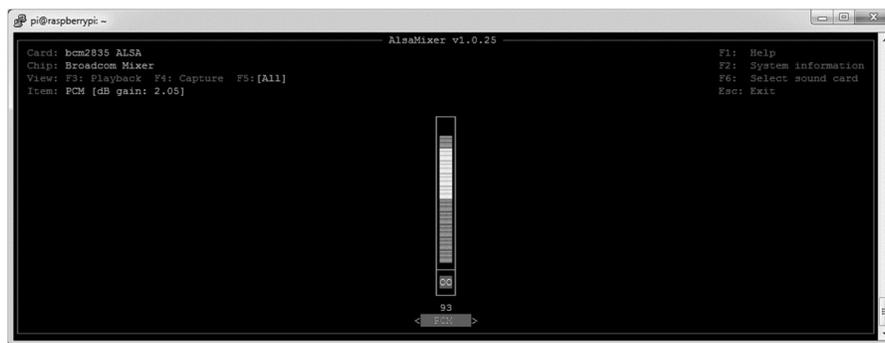


FIGURA 8. Interface gráfica de adaptador de sonido USB

Esta interface muestra si el micrófono está activo variando un ecualizador digital de acuerdo a la intensidad del sonido, confirmando la disponibilidad del periférico.

Por último, se instaló el software Voice Command V3: Este es un software liberado por Steven Hickson, basado en API's no oficiales de Google y programado en C++, que permite a través de la Raspberry, reconocer un comando de voz y ejecutar una acción previamente configurada, en este caso ejecuta el scrip de manipulación de puertos GPIO con los cuales se pueden intervenir periféricos alimentados con DC o AC con la ayuda de una interfaz de potencia.

### 3. Resultados

Se logró implementar un sistema basado en hardware y software libre que es capaz de reconocer una serie de comandos de voz simples ('encender', 'apagar') y realizar acciones como respuesta a dichos comandos como: activación de actuadores on-off con ayuda de interfaces de potencia como relevos mecánicos o elementos de estado sólido.

### 4. Conclusiones

Voicecommand es una de las tantas soluciones que se han planteado para el reconocimiento de voz usando la Raspberry, contando grandes fortalezas como su configuración y rápido procesamiento de la voz para la entrega del comando que se ejecutará.

Para que el sistema funcione eficiente mente su puesta en funcionamiento debe hacerse en un lugar libre de contaminación auditiva pues esta interferencia afecta la interpretación de los comandos de voz por parte del Voicecommand

Los comandos de voz que se elijan para la activación de los puertos GPIO deben ser cortos y de fácil pronunciación, pues esto facilita el reconocimiento de los mismos por el sistema.

La elección del adaptador de sonido es crucial para el buen funcionamiento del sistema pues de este depende no solo la agilidad en la configuración de los elementos mediadores entre el sistema operativo de la Raspberry Pi y el software de reconocimiento de comandos de voz sino también la calidad de dicho reconocimiento.

Como trabajo futuro se propone ahondar en la posibilidad de integrar la tecnología del Arduino, para desarrollar receptores esclavos que reciban un comando de la Raspberry a través de señales inalámbricas o cableadas, para gobernar cualquier dispositivo que se desee controlar.

## 5. Referencias

- [1] "Raspberry Pi," 2014. [Online]. Available: <http://www.raspberrypi.org/>. [Accessed: 20-Oct-2014].
- [2] R. Tarca, L. Csokmai, T. Vesselenyi, I. Tarca, and F. P. Vladicescu, "Technological Developments in Education and Automation," 2010.
- [3] M. S. Bin Bahrudin, R. A. Kassim, and N. Buniyamin, "Development of Fire alarm system using Raspberry Pi and Arduino Uno," *2013 Int. Conf. Electr. Electron. Syst. Eng.*, pp. 43–48, Dec. 2013.
- [4] A. C. D. Bonganay, J. C. Magno, A. G. Marcellana, J. M. E. Morante, and N. G. Perez, "Automated electric meter reading and monitoring system using ZigBee-integrated raspberry Pi single board computer via Modbus," *2014 IEEE Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci.*, pp. 1–6, Mar. 2014.

## Diseño y simulación de un "Amplificador Instrumental Operacional" como apoyo en la lectura y transmisión de señales mioeléctricas por un solo canal con bajo ruido

Design and simulation of an amplifier "Instrumental Operational" to support reading and transmission of myoelectric signals over a single channel with low noise

*Aguirre Mesa, Elkin Darío*  
Corporación Universitaria Americana  
[eaquirre@americana.edu.co](mailto:eaquirre@americana.edu.co)  
*García Arango, David Alberto*  
Corporación Universitaria Americana  
[daqarcia@coruniamericana.edu.co](mailto:daqarcia@coruniamericana.edu.co)  
*Henao Villa, César Felipe*  
Corporación Universitaria Americana  
[chenao@coruniamericana.edu.co](mailto:chenao@coruniamericana.edu.co)

## Resumen

La importancia de diseñar un AIO, es la necesidad de un desarrollo y producción de elementos electrónicos que ayuden a la interface mioeléctrica, en la que, sin depender de fuentes de poder o energía altas, se pueda controlar dispositivos con los movimientos básicos del ser humano, a través de alguno de sus miembros articulados, para esto se requiere que tenga incorporado un amplificador operacional - instrumental. La más utilizada a la fecha son los de dos etapas, compuesta por un diferencial de entrada y un inversor de salida, estas, aun no cuentan con etapas de limpieza, filtro, frecuencia y longitud de la señal para ser tipificada para ciertas operaciones y acciones básicas con especial atención a los aspectos de diseño que minimizan el ruido y la tensión del amplificador.

La investigación inicia con un modelado y diseño de los componentes de filtros y reducción de ruidos con AIO, que capturan la señal por un canal, para poder ir escalando en complejidad y operabilidad, todo esto apoyado en un análisis experimental y soportado por el marco CDIO (Concepción, Diseño, Implementación y Operatividad). Se desarrolla un primer modelo lógico de un prototipo manipulado con algún músculo, este sirve de plataforma para el movimiento de un servomotor y controlar como mínimo 2 posibles movimientos, en trabajos futuros serán documentados y gestionados a través de un software que valide la reducción significativa de ruido. Se deberá adquirir una mayor comprensión y conocimiento del ruido, la Interferencia electromagnética o EMI y sus causas ya que puede ayudar en el paso posterior de la cadena de procesado, que es su eliminación o disipación, por ello se tiene previsto asignar un tiempo al mejor conocimiento del ruido y al estudio de los sistemas de adquisición orientados a su reducción.

**Palabras claves:** Amplificador Operacional Instrumental, Señales Mioeléctricas, Ruido Electromagnético, Mono canal



## Abstract

The importance of designing an AIO, is the need for development and production of electronic elements that help mioelectriaca interface, which without relying on sources of power or high power, you can control devices with the basic movements of human beings, through one of its articulated members, for this is required to have built an operational amplifier - instrumental. The most commonly used to date are two stages, comprising a differential input and an inverter output, they even do not have cleaning steps, filter, frequency and length of the signal to be criminalized for certain operations and actions basic with focus on design aspects that minimize noise and voltage amplifier.

The investigation started with a modeling and design of components filters and noise reduction with AIO, capturing the signal on a channel, to go climbing in complexity and operability, all supported by an experimental analysis and supported by the frame CDIO (conception, design, implementation and operation). a first logical model of a manipulated with some muscle prototype is developed, this provides a platform for the movement of a servomotor and controlling at least 2 possible moves, in future work they will be documented and managed through a software that validates the significant reduction noise. It must acquire a greater understanding and knowledge of noise, electromagnetic interference, or EMI and its causes as it can help in the later stage of the processing chain, which is the removal or dissipation, so it plans to allocate time to better noise knowledge and study of procurement systems aimed at their reduction.

**Keywords:** Operational Amplifier Instrumental, myoelectric signals, electromagnetic noise, Monocanal

## 1. Introducción

Hoy en día el desarrollo de Amplificadores Operacionales Instrumentales – AIO va en ascenso, pero son de muy alto costo, difícil desarrollo e implementación, ya que para su elaboración y construcción se está utiliza tecnología cerrada o patentada y su uso ya no solo se basa específicamente en el desarrollo de aplicaciones terapéuticas y de rehabilitación, milicia, industria y demás.

Este trabajo presenta el diseño y construcción de un sistema para la adquisición de señales electromiográficas provenientes de los músculos bíceps y tríceps, así como la metodología seguida para obtener los resultados obtenidos. La finalidad del trabajo consiste en plantear la primera etapa para la construcción de un sistema de lectura y transmisión de señales mioeléctricas que pueda reconocer los potenciales de acción generados por los músculos y mediante un algoritmo de aprendizaje como el de las redes neuronales o un software de toma de decisiones finita TDF, y el cual sea capaz de reconocer los potenciales de disparo de Electromiografía y catalogarlos como alguno de los movimientos del brazo o articulación involucrada.

Una de las topologías más utilizadas para la implementación de amplificadores operacionales CMOS es la de dos etapas, compuesta por un diferencial de entrada y un inversor de salida. Usualmente se emplea un capacitor de Miller para efectuar la compensación en frecuencia, razón por la que el circuito es referido como operacional de Miller.

El mismo presenta, cuando es adecuadamente diseñado, un desempeño similar a topologías más modernas. Adicionalmente puede utilizarse para manejar cargas resistivas mediante el agregado de una etapa buffer de salida, lo anterior es tratado en el documento de los autores Laker, K and Sansen, W. Teniendo presente que se debe tratar varios filtros que participen en la reducción de ruido electromagnético y por ende incorporar etapas de pre y posfiltrado al amplificador Operacional Instrumental.

Se aborda en este trabajo el desarrollo y simulación de un amplificador operacional de Miller, con especial atención a los aspectos de diseño que minimizan el ruido y la tensión de offset del amplificador, en función de futuras aplicaciones en instrumentación.

## 2. Metodología

Para la etapa de diseño del AIO se propone un diagrama de flujo DDF básico para la toma y lectura de las señales mioeléctricas, iniciando con un solo canal, tomando el siguiente DDF mostrado en la Fig.1.

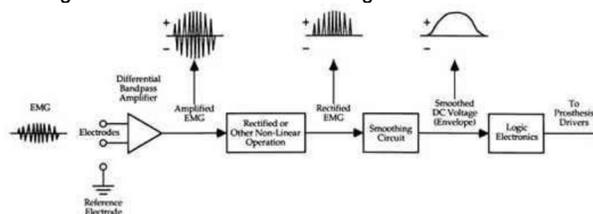


FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA LECTURA Y CAPTURA DE SEÑALES MIOELECTRICAS

Con el DDF, se determinó sus distintos componentes a modelar e implementar en desarrollos a futuro, como son la etapa de preamplificación, amplificación, rectificación, filtrado y demás, las cuales deben ser controladas, diagnosticadas y visualizadas con apoyo en un software. El modelo desarrollado genera 3 subetapas en la trazabilidad del trabajo realizado a la señal mioeléctrica que se manifiesta en la Fig.2.

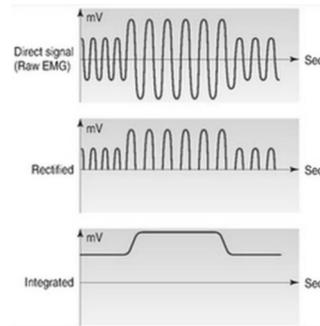


FIGURA 2. TRASABILIDAD DE LA DEPURACION DE SEÑAL MIOELECTRICA

Para el diseño y desarrollo del componente encargado de adquirir una señal a través de un sensor, se seleccionó el sensor HMC1501 el cual se ajustó a través de un divisor de tensión y un operacional en configuración seguidor resistencia variable que cambia al aplicarle distintos valores en U se puede obtener voltajes que varían entre 0V y 2V y los cuales pueden ser adquiridos por un conversor ADC para su digitalización. Su diseño esquemático se observa en la Fig.3.

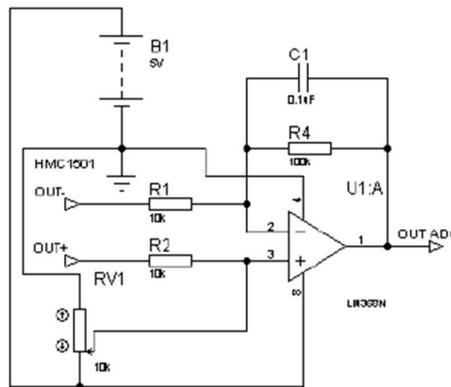


FIGURA 3. CIRCUITO CON FUNCIÓN DE SENSOR HMC1501

Ya determinado el sensor a ser utilizado en el diseño, se incorporó a continuación los sensores de fuerzas resistivos (FSR) las cuales tienen en su diagrama esquemático una resistencia variable que está en relación directa a la presión aplicada y se rige por el principio piezoresistivo. La sensibilidad al ruido/vibración no es alterada significativamente, los FSR trabajan con menor margen de error en superficies planas, fijas, estables y que estén lisas, su rango de sensibilidad de fuerza esta entre los 100 g hasta 10 Kg, y el rango de sensibilidad de presión obtenido esta entre los 1.5 psi hasta 150 psi. En la Fig.4. se observa el diagrama esquemático de un Circuito de señal tipo FSR

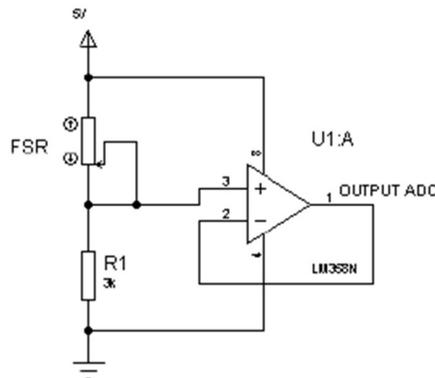


FIGURA 4. CIRCUITO SEÑAL FSR

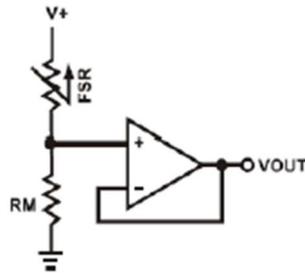


FIGURA 5. SENSOR DE FUERZA RESISTIVO FSR

Los elementos diferenciadores en el desarrollo del AOI es el de los filtros pre y pos amplificación,

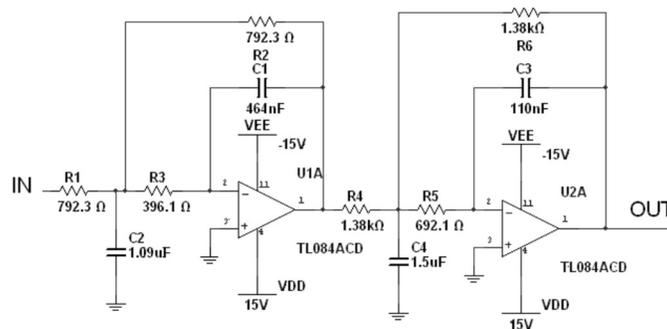


FIGURA 6. CIRCUITO FILTRO PASO BAJO

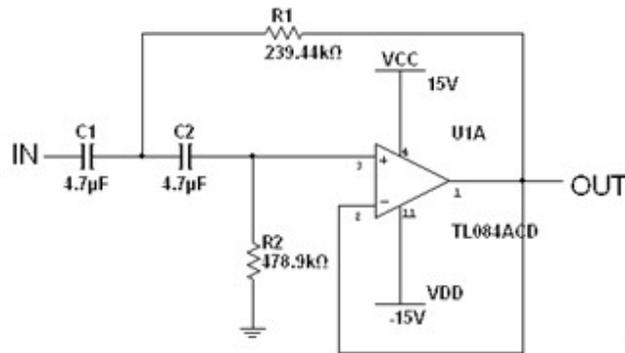


FIGURA 7. CIRCUITO FILTRO PASO ALTO

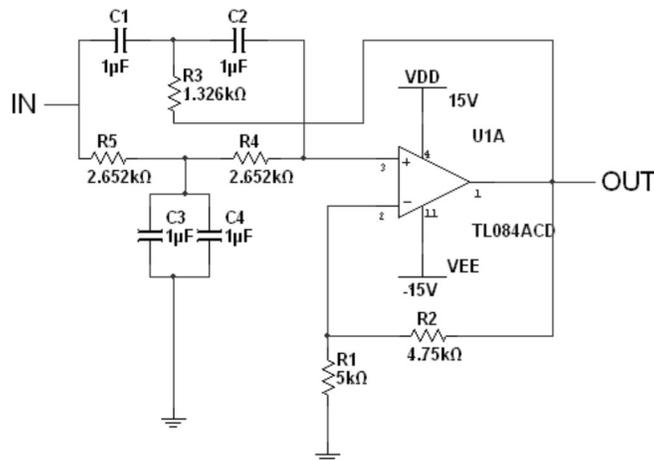


FIGURA 7. Circuito Filtro NOTCH

El estudio del amplificador que integre finalmente los elementos descritos con anterioridad se enfoca en dos modelos distintos, uno es, el amplificador tradicional basado en transistores, y el segundo modelo es el amplificador instrumental basado en el integrado TL084. Se estudian ambos amplificadores en paralelo para la elección de aquel que genera mayor beneficio en relación al control de ruido, filtro y ganancia de las señales mioeléctricas.

La Fig. 8. Muestra el esquema del segundo Amplificador

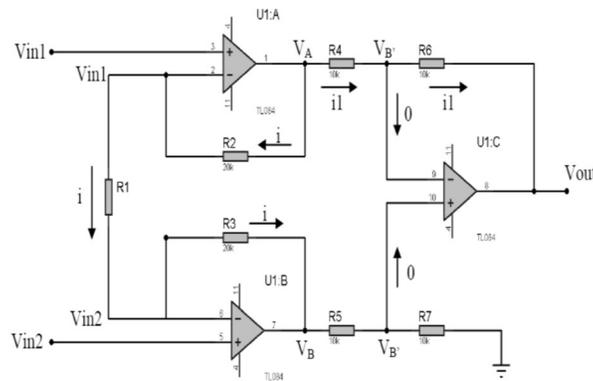


FIGURA 8. AMPLIFICADOR INSTRUMENTAL BASADO EN TL084

Se propone en un inicio seguir trabajando con una arquitectura tradicional de modelado del amplificador basado en transistores, el cual posee dos etapas que se observan en la Fig.9. Los transistores definidos como M1, M2, M3, M4 Y M5 son los que hacen parte de un amplificador diferencial de entrada considerando que los transistores definidos como M6 y M7 hacen parte de un amplificador inversor de salida. El valor de compensación en frecuencia se logra mediante el valor obtenido en los transistores M8 y Cc. El M9, M10 y el M11 establecen la polarización de los transistores M5 y el M7.

Debido a que el ruido del amplificador es dominado por el ruido 1/f (flicker), se adopta una etapa de entrada PMOS por presentar menos ruido 1/f que los NMOS presentados por primera vez en la obra “Analog Integrated Circuit Design” por los autores Johns, D and Martín, K., lo que reduce y afecta negativamente otras características, entre ellas a la ganancia.

Gray, P and Meyer, R estudiaron el ruido y lo analizan por separado, tanto el ruido 1/f y el ruido denominado como ruido blanco, proponiendo lineamientos generales para la minimización de los mismos. La estrategia aplicada en el trabajo para la reducción del ruido 1/f consiste en disminuir la contribución de las cargas activas del diferencial de entrada se tiene, la que se logra adoptando longitudes de canal mayor para los transistores M3 y M4 respecto de las longitudes de los transistores M1 y M2.

El control y lectura de señales mioeléctricas es probablemente el esquema de control más popular. Se basa en el concepto de que siempre que un músculo en el cuerpo se contrae o se flexiona, se produce una pequeña señal eléctrica (EMG) que es creada por la interacción química en el cuerpo. Esta señal es muy pequeña (5 a 20  $\mu\text{V}$ ) y se capta con electrodos superficiales que entran en contacto con la superficie de la piel.

Por lo anterior debemos hallar inicialmente la relación entre los transistores L1, L3 y L4, y sería:

$$L3 = L4 = 2L1$$

Al observar que L1 es la mitad de los otros, se determina que el ruido 1/f del amplificador queda dominado aproximadamente por la contribución del par diferencial (Transistores M1 y M2). Sabiendo que el ruido de un transistor depende en forma inversa de su área, dicha contribución puede ser reducida adicionalmente mediante un dimensionamiento adecuado, que se determina experimentalmente.

El método aplicado en el AIO para la reducción del ruido blanco es semejante al aplicado anteriormente, y se implementa disminuyendo las transconductancias de los transistores M3 y M4 frente a las de los transistores M1 y M2.

Por consiguiente, se obtiene que las relaciones de aspecto existente entre los transistores M1 y M2 son mucho mayores a las de los transistores M3 y M4. Aplicando por norma los valores  $(W/L)_1 = 3 \cdot (W/L)_3$

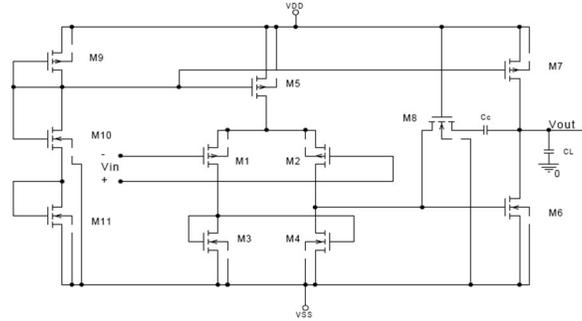


FIGURA 9. AMPLIFICADOR COMPUESTO POR TRANCISTORES

Para disminuir el *offset* sistemático, se debe lograr que la tensión de reducción del transistor M4 sea la necesaria para que la corriente del transistor M6 sea semejante a la del transistor M7 bajo condiciones de entrada a cero. Para ello se establece, según lo propuesto por Johns, D and Martín, K. en su texto, Analog Integrated Circuit Design

$$(W/L)_3 / (W/L)_6 = (W/L)_4 / (W/L)_6 = 0.5 (W/L)_5 / (W/L)_7$$

Por ende, las longitudes de los transistores M3, M4 y de M6 son iguales, con el propósito de asegurar que las relaciones anteriores se mantengan a pesar de variaciones inducidas por el proceso en las longitudes de canal de los transistores.

De acuerdo a lo tratado por Gregorian, R and Temes, G. Analog MOS en su trabajo Integrated Circuits for Signal Processing, siendo tema de referencia en relación al *offset* aleatorio se reduce incrementando las transconductancias de los dispositivos de entrada. Para esto se toman tensiones efectivas compuerta-surtidor de valor bajas para los transistores M1 y M2. Idénticamente, y con idéntico propósito (reducir *offset*), se implementan los transistores M5, M6 y M7 como la conexión en paralelo de transistores con W más pequeño.

La tabla 1 muestra los valores parámetros geométricos y las corrientes de polarización del amplificador diseñado con dicho fin al inicio, estos valores son determinados por los resultados obtenidos al realizar múltiples simulaciones con ellos.

Tabla 1: Parámetros geométricos y corrientes de polarización. Alimentación  $\pm 2,5$  voltios

Componente	W/L	Corriente ( $\mu A$ )
M1	98/6	10
M2	98/6	10
M3	65.25/12	10
M4	65.25/12	10
M5	4x25.5/6	20
M6	4x65.25/12	50
M7	8x25.5/5	50
M8	9.5/6	-
M9	25.5/6	5
M10	5/6	5
M11	9.75/6	5

## Resultados

Los resultados que se presentan se obtienen mediante modelación en PROTEUS y en SPICE utilizando los modelos de los transistores provistos por el CNM. Y el amplificador operacional. Se utilizan los circuitos de prueba propuestos por Allen, P. and Holberg, D. CMOS en su obra titulada Analog Circuit Design para la caracterización de amplificadores operacionales, siendo la que menos ruido se generó al ser aplicada con múltiples valores de parámetros.

La respuesta en frecuencia (magnitud y fase) de la ganancia en modo diferencial que se obtiene con el AOI. Parametrizado es con una ganancia en DC de 84dB con un producto ganancia ancho de banda (GBW) de 1.3MHz con una carga de 10pF. El lazo de compensación en frecuencia presenta un desempeño adecuado brindando un margen de fase de 56 grados.

La relación de rechazo de modo común es de 88 dB a frecuencias muy bajas.

En cuanto al rango dinámico de salida, las simulaciones muestran que el mismo es de 4.86 voltios.

La respuesta en gran señal se caracteriza mediante la medición de la velocidad de crecimiento (SR) y del tiempo del establecimiento (Ts) al 1%. Para una carga capacitiva pura de 2pF se obtuvieron una SR de 1.6v/ms y un Ts de 382ns, considerando que para 10pF los valores de SR y Ts fueron de 1.34 v/ms y 925 ns respectivamente. Estos son valores muy buenos para la velocidad de crecimiento (SR).

El voltaje de ruido de entrada equivalente ( $nV/\sqrt{\text{Hz}}$ ) encontrados en el modelo determinan que las contribuciones de los transistores M1 y M3 al ruido térmico de salida y al ruido 1/f cumplen con las condiciones que se esperan desde la etapa de diseño y que son parte de los objetivos del diseño.

La tensión de offset del operacional se evalúa mediante simulación Montecarlo utilizando las desviaciones estadísticas del proceso brindadas por el CNM. Se obtiene un offset referido a la entrada de 34.8mvolts bajo condición nominal con una desviación estándar (s) de 1.15 mvolts.

### 3. Conclusiones

Se presenta en este trabajo el diseño de un amplificador operacional tanto Operacional como uno de tipo Miller con consideraciones de minimización de tensión de offset y de ruido, utilizando la tecnología CNM25 de 2.5 mm. Obteniendo buenos resultados con el segundo tipo de amplificador

Las simulaciones muestran que el amplificador presenta una tensión de offset de entrada de 34.8mvolts con una desviación estándar de 1.15 mvolts.

En cuanto a características de ruido, se logra un voltaje de ruido de entrada equivalente de 55.44  $nV/\sqrt{\text{Hz}}$ , 26.75  $nV/\sqrt{\text{Hz}}$  y 24.5  $nV/\sqrt{\text{Hz}}$  para 10Hz, 100 Hz y 1Khz respectivamente. Los resultados cumplen con las condiciones de diseño al mostrar que los transistores del par diferencial de entrada dominan a los de la carga en cuanto a características de ruido flicker y ruido térmico.

Se logra así un amplificador con un desempeño adecuado en características de offset y ruido sin degradación elevada en sus otros parámetros.

### 4. Referencias

- [1] Laker, K and Sansen, W. Design of Analog Integrated Circuits and Systems. Mc. Graw Hill. 1994.
- [2] Johns, D and Martín, K. Analog Integrated Circuit Design. John Wiley & Sons. 1997.
- [3] Gray, P and Meyer, R. "MOS Operational Ampifier Design – A Tutorial Overview". Analog MOS Integrated Circuits II. IEEE Press. 1989.
- [4] Gregorian, R and Temes, G. Analog MOS Integrated Circuits for Signal Processing. John Wiley & Sons. 1986.
- [5] Allen, P. and Holberg, D. CMOS Analog Circuit Design. Oxford University Press. 1987
- [6] A.B. Smith, C.D. Jones, and E.F. Roberts, "Article Title", *Journal*, Publisher, Location, Date, pp. 1-10.
- [7] Jones, C.D., A.B. Smith, and E.F. Roberts, *Book Title*, Publisher, Location, Date.
- [8] H. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation. New York: Springer-Verlag, 1985, ch. 4.
- [9] J. U. Duncombe, "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility (Periodical style)," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-11, pp. 34–39, Jan. 1959.
- [10] S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, pp. 570–578, July 1993.
- [11] R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 44, no. 4, pp. 547–588, Apr. 1965.
- [12] E. H. Miller, "A note on reflector arrays (Periodical style—Accepted for publication)," IEEE Trans. Antennas Propagat., to be published.
- [13] S. P. Bingulac, "On the compatibility of adaptive controllers (Published Conference Proceedings style)," in Proc. 4th Annu. Allerton Conf. Circuits and Systems Theory, New York, 1994, pp. 8–16.
- [14] G. R. Faulhaber, "Design of service systems with priority reservation," in Conf. Rec. 1995 IEEE Int. Conf. Communications, pp. 3–8.
- [15] W. D. Doyle, "Magnetization reversal in films with biaxial anisotropy," in 1987 Proc. INTERMAG Conf., pp. 2.2-1–2.2-6.
- [16] Formato tomado y modificado del formato IEEE (<http://www.ieee.org/organizations/pubs/transactions/stylesheets.htm>)

# Caracterización de Sistema de Tratamiento de Señales Electromiográficas de Bajo Costo Empleado en la Activación de Prótesis de Miembros Superiores

## Characterization of a low cost electromyographic signal processing system used in the upper limb activation prosthesis

*Carlos Alberto Valencia Hernández<sup>1</sup>, Karen Lemmel Vélez.<sup>2</sup>*

*1 Institución Universitaria Pascual Bravo (Colombia), [carlos.valencia@pascualbravo.edu.co](mailto:carlos.valencia@pascualbravo.edu.co)*

*2 Institución Universitaria Pascual Bravo (Colombia), [karen.lemmel@pascualbravo.edu.co](mailto:karen.lemmel@pascualbravo.edu.co)*

### Resumen

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar una alternativa económicamente viable para la adquisición y tratamiento de señales electromiográficas con el fin de ser empleadas en la manipulación de una prótesis de mano, para esto se tomó el módulo electromiográfico comercial de tres derivaciones V3, este módulo consta de cuatro etapas, la primera de amplificación, la segunda de rectificación, y las últimas dos de filtrado. Para su caracterización se sometió a pruebas de funcionamiento en un ambiente de laboratorio, censando el movimiento del bíceps de un individuo varón de 28 años de edad. Como resultados se aprecia un comportamiento reactivo a los movimientos musculares por parte del módulo V3, esto reflejado en una variación de voltaje en su salida de 0.5V (con el músculo en reposo) a 5V (con el músculo contraído), también se aprecian que el sistema es susceptible a anomalías de voltajes de alimentación generando rizados en la señal de salida del dispositivo, afectando la integridad de las medidas. Igualmente se pudo establecer que es posible diferenciar el nivel de intensidad de la fuerza en el músculo, lo que permitirá no solo el control on-off de un actuador, sino el control proporcional de un actuador con estas características. Por último, la integración con sistemas embebidos (Arduino, PICs, Raspberry PI) es posible sin que se afecte la intensidad de la señal por la impedancia de los mismos.

**Palabras claves:** Electromiografía, Sensor, Adquisición, Filtrado, Amplificación.

### Abstract

This work aims to characterize an economical way for the acquisition and processing of electromyography signals to be used in handling a prosthetic hand, a commercial electromyographic module three leads V3 were use, the V3 module has four stages, the first amplification, the second correction, and the last two filtering. For characterization the V3 performance were tests in a laboratory environment, taking a biceps movement of a male 28-year-old. As results, a reactive behavior by the V3 for the muscle movements was find, a variation in the output voltage of 0.5V (with the muscle at rest) to 5V (with the contracted muscle) is appreciated, also the system is susceptible to faults generating supply voltages crimped in the output signal. it was established that it is possible to distinguish the level of intensity of the force on the muscle, allowing not only the on-off control of an actuator, also proportional control of an actuator, finally integrating systems embedded (Arduino, PICs, Raspberry PI) is possible without the signal strength is affected by the impedance from itself.

**Keywords:** Electromyography, Sensor, acquisition, filtering, amplification.

## 1. Introducción

Según el DANE en el censo general del 2005 se estima que en Colombia hay aproximadamente 381.724 personas que sufren de alguna discapacidad permanente en los miembros superiores, es decir, el 14.77% de la población presenta limitaciones para usar brazos y manos [1], una de las principales herramientas para tratamiento de señales de los miembros superiores es la electromiografía, la cual consiste básicamente en la adquisición, registro y análisis de la actividad eléctrica generada en nervios y músculos a través de la utilización de electrodos. La medición extraída proporcionan los patrones de activación muscular, la amplitud de las señales electromiográficas varía desde los  $\mu\text{V}$  hasta un bajo rango de 10Mv [2], esta amplitud, y las propiedades de la señal tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia dependen de factores como el tiempo, la intensidad de la contracción muscular, la distancia entre los electrodos y la zona de actividad muscular, las propiedades de la piel como por ejemplo el espesor de la piel o el tejido graso, las propiedades del electrodo, el amplificador y la calidad del contacto entre la piel y el electrodo [2]. En el caso de los miembros superiores la señal generada por una unidad motora tiene una amplitud de 0 volt (en reposo, es decir, cuando no existe contracción muscular) y 250  $\mu\text{V}$  durante la contracción según [2].

Debido a que las señales mioeléctricas son de bajo valor, los ruidos de línea (50Hz - 60Hz) [2] pueden provocar una falsa interpretación de los resultados, por lo cual se hace necesario el filtrado de la señal, además la necesidad de acople del sistema a un elemento de adquisición de señales promueve la aparición de una etapa de amplificación, asimismo la integración con sistemas embebidos (Arduino, PICs, Raspberry PI).

Por otro lado, la caracterización de sensores permite conocer su comportamiento ante diferentes modos de operación, razón por la cual la caracterización del sensor electromiografico comercial de tres derivaciones V3 se llevó a cabo.

## 2. Caracterización de la herramienta de filtrado y amplificación de señales electromiografías

El sistema caracterizado (Ver Fig 1) es capaz de tomar impulsos eléctricos del músculo, filtrarlos y amplificarlos para que la señal de salida pueda ser tomada por un sistema embebido. Para este caso se eligió un módulo de EMG de tres derivaciones el cual es compatible con Arduino o con un microcontrolador esto se hace teniendo en cuenta su estructura compacta, está especialmente diseñado para microcontroladores, tiene ganancia ajustable y es compatible con una breadboard, sus especificaciones eléctricas son mostradas en la Tabla 1

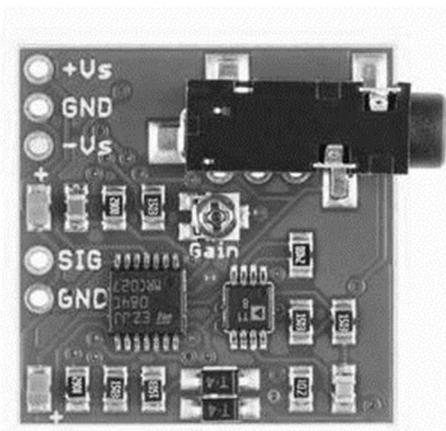


FIGURA 1. SENSOR ELECTROMIOGRAFICO V3

TABLA 1. ESPECIFICACIONES ELECTRICAS DEL V3 [3]

PARAMETRO	MIN	TYP	MAX
Voltaje de entrada	$\pm 3.5V$	$\pm 5V$	$\pm 18V$
Configuración de ganancia	0.01 $\Omega$ (0.002x)	50 k $\Omega$ (10,350x)	100 k $\Omega$ (20,700x)
Voltaje de salida	0V	--	+Vs
Voltaje de entrada diferencial	0 mV	2-5mV	+Vs/Gain

El sensor v3 está dividido en 4 etapas las cuales utiliza para las funciones de amplificación y filtrado de la señal electromiografica.

### 2.1. Etapa 1

El AD8226 está diseñado para trabajar con una variedad de señales y Voltajes. Debido a que la entrada gama incluye también la posibilidad de ir por debajo de la alimentación negativa, pequeñas señales cerca de la referencia pueden ser amplificadas sin requerir suministros duales. El AD8226 opera en los suministros que van desde  $\pm 1,35 V$  a  $\pm 18 V$ , para los suministros duales y 2,2 V a 36 V para la prestación única.

Las entradas del AD8226 están diseñadas para conectarse a sensores del mundo real. Además de su amplio rango de operación, la AD8226 puede manejar voltajes más allá de los límites. Por ejemplo, con un suministro de  $\pm 5 V$ , se garantiza soportar  $\pm 35 V$  en la entrada sin daño. El AD8226 es perfecto para aplicaciones industriales de tamaño reducido, el AD8226 está diseñado con una ganancia mínima de 1 y puede manejar fácilmente señales de  $\pm 10 V$  [4]

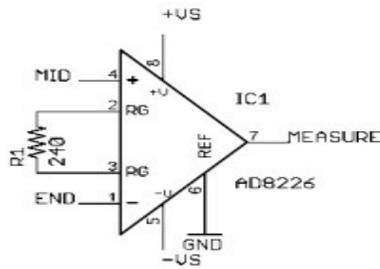


FIGURA 2. CONEXIONES EN EL V3 DEL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD8226 PARA LA ETAPA 1[3]

## 2.2. Etapa 2

En esta etapa se utiliza el integrado TL084 que consta de cuatro amplificadores operacionales, de estos cuatro se utilizan dos para hacer un rectificador de onda completa de precisión con resistencias iguales o circuito de valor absoluto, este circuito tiene resistencias iguales y una resistencia de entrada del mismo valor (150Kohm). En los voltajes para entrada positiva el diodo D3 conduce de modo que ambos amplificadores operacionales IC2B y IC2C actúan como inversores y el voltaje en la salida del primer amplificador es igual al del segundo (ver Fig 3).

Para voltajes de entrada negativa el diodo D4 conduce. La corriente de entrada se divide, de modo que el amplificador operacional IC2C actúa como un inversor. Por tanto, el voltaje de salida en el primer amplificador es positivo para cualquier polaridad de entrada. El voltaje de salida de los dos amplificadores en cualquiera de las dos configuraciones es positiva.

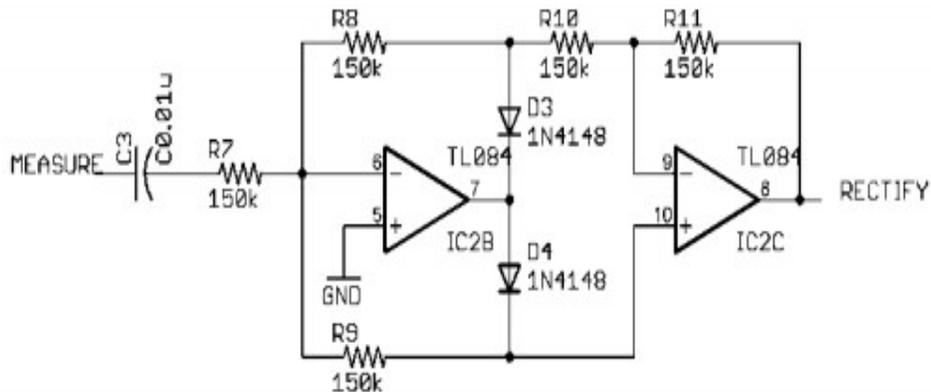


FIGURA 3. CONEXIONES EN EL V3 DEL AMPLIFICADOR TL084 PARA LA ETAPA 2 [3]

## 2.3. Etapa 3

Para la tercera etapa se utiliza uno de los amplificadores operacionales del integrado TL084 para realizar un filtro activo pasa-baja (ver Fig 4). Es un filtro que para frecuencias lo suficientemente bajas, el condensador (capacitor) puesto en paralelo con la resistencia actúa como un circuito abierto, pudiendo ser ignorado, con lo cual lo que tenemos aquí es esencialmente un amplificador inversor. Y para frecuencias lo suficientemente altas, el condensador actúa como un corto circuito, con lo cual el efecto resistivo de la resistencia en paralelo con el condensador queda nulificado y la ganancia, de acuerdo con la fórmula para el amplificador inversor, se vuelve cero. En pocas palabras, el circuito amplifica y deja pasar las señales de bajas frecuencias y bloquea las señales de altas frecuencias.

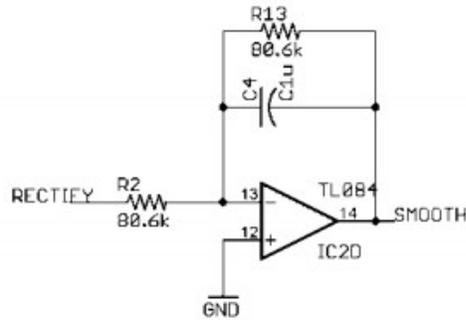


FIGURA 4. CONEXIONES EN EL V3 DEL AMPLIFICADOR TL084 PARA LA ETAPA 3 [3]

### 2.4. Etapa 4

La cuarta etapa es un amplificador inversor con retroalimentación (ver Fig 5), Un amplificador inversor es un amplificador que invierte el voltaje de entrada dando a su vez una ganancia de salida que depende de sus dos resistencias. En este caso se utiliza uno de los amplificadores del TL084 y una resistencia variable o trimer para dar un valor variable a la ganancia de salida.

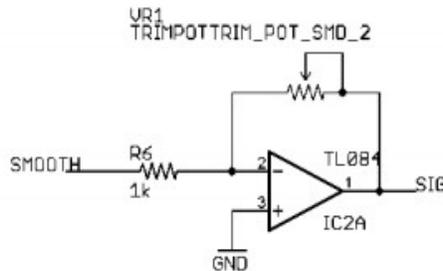


FIGURA 5. CONEXIONES EN EL V3 DEL AMPLIFICADOR TL084 PARA LA ETAPA 4 [3]

La configuración de pines para este sistema está determinada así: en el pin +VS se alimenta con un voltaje de 9V y en el pin -VS se alimenta con un voltaje negativo de -9V, el pin de la fuente de alimentación GND se conecta según la configuración de las baterías. La señal de salida del sistema de tratamiento de señales se comunica con las entradas analógicas del sistema embebido que se desee utilizar y para establecer la comunicación se unifican las tierras (ver Fig 6).

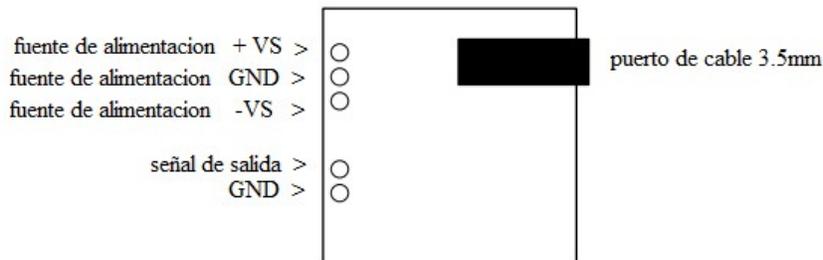
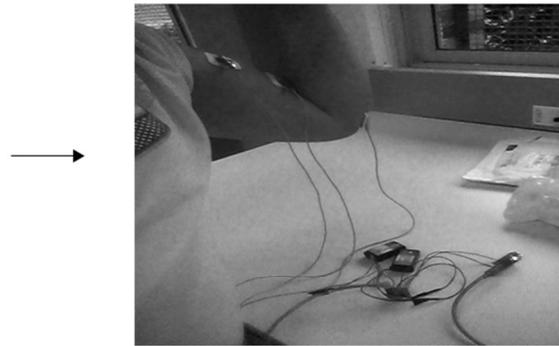


FIGURA 6. CONFIGURACIÓN DE PINES DEL SENSOR MUSCULAR V3 [3]

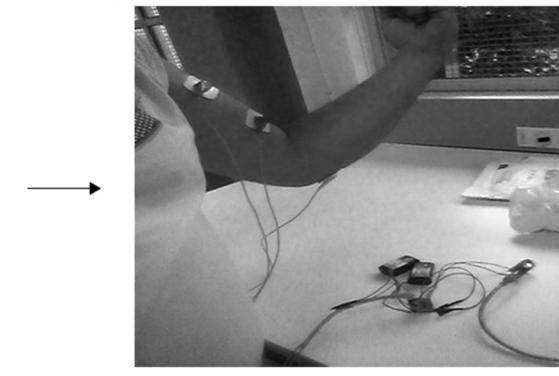
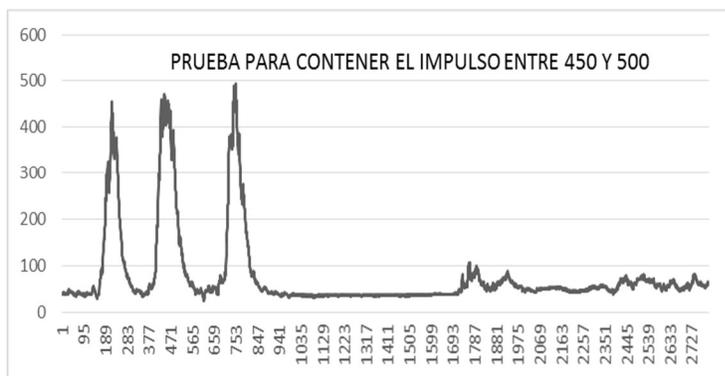
### 3. Resultados

Las pruebas que se plantean a continuación se realizaron en un sujeto de 28 años de edad sin ninguna patología en los miembros superiores, la toma de datos se realizó en el miembro superior izquierdo, con un sistema con 10 bits de resolución cuyo rango es de 0 para 0V y 1023 para 5V.

Como prueba de funcionamiento del sistema de tratamiento de señales (amplificación y filtrado de la señal) se obtuvieron los voltajes asociados al movimiento del bíceps, para el mediano y máximo esfuerzo cuyos resultados se aprecian en la Fig 7; para ambos casos cuando no se realizaba esfuerzo es decir el bíceps en descanso el impulso se mantenía en cero.



a) Máximo esfuerzo en el bíceps



b) Mediano esfuerzo en el bíceps

FIGURA 7. SEÑALES ELECTROMIOGRAFICAS A MÁXIMO (A) Y A MEDIANO (B) ESFUERZO DEL BÍCEPS.

Como fuente de alimentación del sensor muscular se utilizaron dos pilas recargables de nueve voltios, se conectó el terminal positivo de la primera batería al pin +VS del sensor muscular, luego conectamos el terminal negativo de la primera batería al terminal positivo de la segunda batería, de estas dos terminales sale el cable GND que se conectaron al GND de la fuente de alimentación del sensor muscular; El terminal negativo de la segunda batería se conectó al -VS del sensor muscular ( Figura 8),

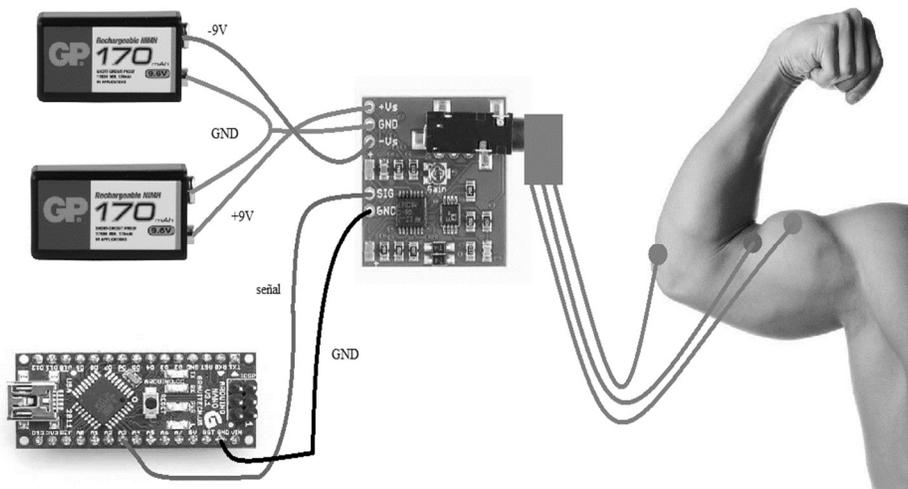


FIGURA 8. CONEXIÓN ELECTRODOS, SENSOR, ARDUINO

Los electrodos se conectaron uno en la zona media del cuerpo muscular, otro se conectó en un extremo del mismo cuerpo muscular, y el último electrodo se conectó en una parte ósea o no muscular, pero cerca al cuerpo a tratar, tomando como referencia la parte delantera del codo.

#### 4. Conclusiones

Existe un comportamiento reactivo a los movimientos musculares por parte del módulo V3, esto reflejado en una variación de voltaje en su salida de 0.5V (con el músculo en reposo) a 5V (con el músculo contraído).

Se identificó que el sistema es susceptible a anomalías de voltajes de alimentación generando rizados en la señal de salida del dispositivo, afectando la integridad de las medidas.

Es posible diferenciar el nivel de intensidad de la fuerza en el músculo, lo que permitirá no solo el control on-off de un actuador, sino el control proporcional de un actuador con estas características.

La integración con sistemas embebidos (Arduino, PICs, Raspberry PI) es posible sin que se afecte la intensidad de la señal por la impedancia de los mismos.

#### 5. Referencias

[1] DANE, «Identificación de las personas con discapacidad en los territorios desde el rediseño del registro,» abril 2008. [En línea]. Available: <http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/discapacidad/identificacion%20en%20los%20territorios.pdf>.

[2] DALCAME, «Grupo de investigación Bimedica,» [En línea]. Available: <http://www.dalcame.com/emg.html#.V8mkR1vhCM->. [Último acceso: 2 septiembre 2016].

[3] Advancer Technologies, «Muscle Sensor v3,» Febreo 2013. [En línea]. Available: [https://www.pololu.com/file/download/Muscle\\_Sensor\\_v3\\_users\\_manual.pdf?file\\_id=0J745](https://www.pololu.com/file/download/Muscle_Sensor_v3_users_manual.pdf?file_id=0J745). [Último acceso: 2 septiembre 2016].

[4] Analog Devices, "Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier AD8226." Analog Devices, pp. 1–28, 2012.

# Identificación de un Sistema Electromecánico e Implementación del Control PID para Gobernar Inalámbicamente el Movimiento de un Objeto Móvil, según una Trayectoria Arbitrariamente Seleccionada

Identification of an Electromechanical System and Implementation of PID Control in order to Govern Wirelessly the Motion of a Mobile Object, according to Arbitrarily Selected Track

Vesna Srdanovic<sup>1,2</sup>, Oscar Ignacio Botero Henao<sup>1,3</sup> y Sergio Hernando Ruiz Obando<sup>1,4</sup>

Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia<sup>1</sup>

[vesna.srdanovic@pascualbravo.edu.co](mailto:vesna.srdanovic@pascualbravo.edu.co)<sup>2</sup>, [oscar.botero@pascualbravo.edu.co](mailto:oscar.botero@pascualbravo.edu.co)<sup>3</sup> y [sergio.obando@pascualbravo.edu.co](mailto:sergio.obando@pascualbravo.edu.co)<sup>4</sup>

## Resumen

En este artículo estamos presentando los resultados parciales del desarrollo e implementación de un sistema inalámbrico para el control de movimiento de un objeto móvil, según una trayectoria arbitrariamente seleccionada. Se presenta el modelado matemático e identificación de un motor de corriente continua y el diseño del control PID correspondiente. Inicialmente son analizados diferentes métodos de modelado, desde el modelo matemático clásico en base de ecuaciones diferenciales, según las leyes que describen los sistemas electromecánicos, hasta la identificación de un sistema electromecánico aplicando la técnica experimental. También son presentados los resultados de verificación de los modelos obtenidos, el diseño del control PID y las simulaciones realizadas en Simscape, Simulink y Toolbox de Identificación de Sistema, las herramientas que pertenecen a Matlab, un software muy reconocido en la ingeniería de control automático. Los datos experimentales para identificación del motor de corriente continua son obtenidos utilizando la tarjeta de Arduino UNO para adquisición de datos y el Matlab para almacenamiento y presentación grafica de datos. El control inalámbrico para gobernar el movimiento del objeto móvil se implementó utilizando los módulos XBee, pequeños radios transreceptores de comunicación inalámbrica bajo el protocolo ZigBee.

**Palabras claves:** Modelado de motor DC, control PID, Matlab, transmisión inalámbrica de datos, protocolo ZigBee.

## Abstract

In this article we are presenting the partial development results and implementation of a wireless motion control system to manipulate a mobile object, according an arbitrarily selected track. It is presented the mathematical modeling and identification of a DC motor and design of the corresponding PID control. Initially are analyzed different modeling methods, from the classical mathematical model based on differential equations, according to the laws which describe electromechanical systems, until the identification of electromechanical system using the experimental technique. Also are presented the results of verification of the obtained models, design of PID control and simulations in Simscape, Simulink and System Identification Toolbox, which belonging to Matlab, the highly recognized software in automatic control engineering. Experimental data for identification of the DC motor are obtained using the Arduino UNO card for data acquisition and Matlab for storage and graphics presentation of data. The wireless control for govern the motion of the mobile object are implemented used the XBee devices, small radio transceivers for wireless communication under the ZigBee protocol.

**Keywords:** Modeling of DC motor, PID control, Matlab, wireless data transmission, ZigBee protocol.

## 1. Introducción

Para el desarrollo e implementación de un sistema de control de los procesos físicos son importantes, básicamente, las etapas de modelado, diseño del controlador, verificación y finalmente la construcción física del sistema. En este caso, donde se quiere gobernar inalámbricamente el movimiento de un objeto móvil según una trayectoria arbitrariamente seleccionada, fueron efectuadas las siguientes fases: el modelado de un motor de corriente continua que representa un sistema electromecánico utilizando la técnica analítica (modelo matemático) y la técnica experimental (identificación del sistema), el diseño del control PID utilizando las herramientas disponibles en Matlab y finalmente la verificación de los resultados obtenidos.

## 2. Modelado de motor de corriente continua

### 2.1 Descripción de modelo matemático

El modelo matemático representa una aproximación de un sistema físico, es un conjunto de expresiones matemáticas que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema. Determinar el modelo matemático es muy importante para analizar el sistema (observar la estabilidad, el comportamiento de la respuesta frente a diferentes señales de prueba, etc.) y para realizar el diseño del controlador apropiado [1]-[5]. También es de vital importancia el uso de las herramientas computacionales como el software Matlab que involucra sus cajas de soportes (Toolbox) y módulos especializados como Simulink y Simscape [6]-[9].

El motor seleccionado para el desarrollo de este proyecto es de corriente continua con imán permanente. Se pretende controlar la velocidad y el sentido de giro del motor por medio de voltaje de la armadura (rotor).

A continuación, se muestra la técnica analítica para obtener el modelo matemático del motor. En la Fig.1 se representa el esquema del sistema electromecánico para un motor de corriente continua con imán permanente, (en presencia de fricción viscosa) [10], [11]. El motor energizado, con un voltaje  $v_a$  en la armadura, produce el torque  $T_m$  que acciona su giro. El torque de motor  $T_m$  es proporcional a la corriente  $i_a$  que fluye por los devanados de la armadura. La aceleración de la armadura, con su momento de inercia  $J$ , sea igual a torque del motor  $T_m$ , que al girar la armadura se opondrá el torque generado por la fricción viscosa (proporcional a la velocidad de giro ( $w$ ) de la armadura). Se considera que la inercia del engranaje del motor es despreciable. Debido que los devanados de la armadura giran dentro del campo magnético (producido por el imán permanente del estátor), se induce el voltaje  $e_b$  en la armadura, opuesto al voltaje  $v_a$  suministrado. El voltaje inducido  $e_b$  se denomina fuerza contra-electromotriz y es proporcional a la velocidad angular ( $w$ ) de armadura.

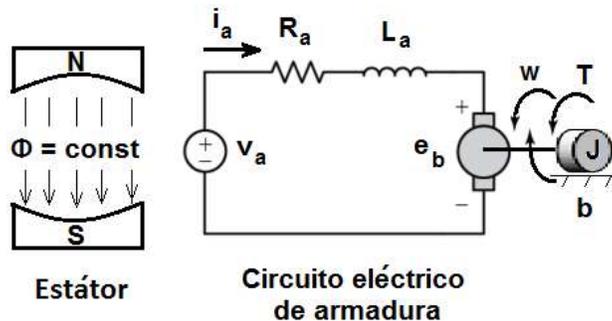


FIGURA 1. PRESENTACION ESQUEMATICA DE SISTEMA ELECTROMECHANICO DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CON IMAN PERMANENTE.

Las ecuaciones fundamentales que caracterizan el sistema electromecánico del motor de corriente continua con imán permanente, son presentadas a continuación. La primera ecuación caracteriza el circuito eléctrico de la armadura, basada en las leyes fundamentales de los circuitos eléctricos. La segunda ecuación caracteriza el movimiento giratorio de la armadura debido a la presencia de torque del motor  $T_m$  y el torque de fricción viscosa. La tercera ecuación presenta la proporcionalidad de torque del motor  $T_m$  y la corriente  $i_a$  de la armadura ( $K_t$  es la constante de torque electromagnético). La cuarta ecuación expresa la proporcionalidad del voltaje inducido  $e_b$  y la velocidad angular  $w$  de la armadura ( $K_b$  es la constante de fuerza contra-electromotriz).

$$v_a = R_a \times i_a + L_a \times \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (1)$$

$$J \times \frac{dw}{dt} = T_m - b \times w \quad (2)$$

$$T_m = K_t \times i_a \quad (3)$$

$$e_b = K_b \times w \quad (4)$$

Las constantes de torque del motor  $K_t$  y de fuerza contra-electromotriz  $K_b$  son de igual magnitud, esto se puede demostrar según el principio de conservación de la energía, sin embargo, tienen diferentes unidades (ecuación 5).

$$K_t \left[ \frac{Nm}{A} \right] = K_b \left[ \frac{V}{rad/seg} \right] \quad (5)$$

En la Tabla 1 son presentados los parámetros que caracterizan el modelo matemático del motor de corriente continua.

TABLA 1. NOMENCLATURA DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CON IMÁN PERMANENTE.

$R_a$ [ $\Omega$ ]	Resistencia interna de armadura del motor
$L_a$ [H]	Inductancia interna de armadura del motor
$K_b$ [V/(rad/s)]	Constante de la fuerza contra-electromotriz
$K_t$ [N.m/A]	Constante de torque electromecánico
$J$ [kg.m <sup>2</sup> ]	Momento de inercia de armadura
$b$ [(N.m)/(rad/s)]	Constante de fricción viscosa

En la Fig. 2 se muestra el modelo matemático del motor de corriente continua presentado en Simulink de Matlab.

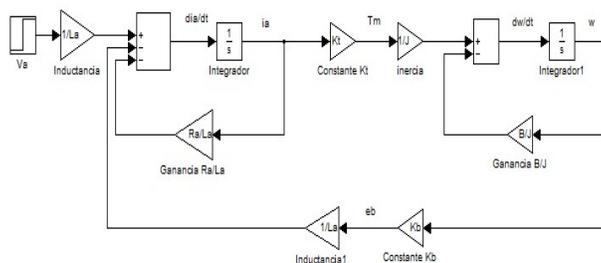


FIGURA 2. MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA PRESENTADO EN SIMULINK.

En la Fig.3 se observa el modelo matemático del motor de corriente continua presentado en Simscape de Matlab.

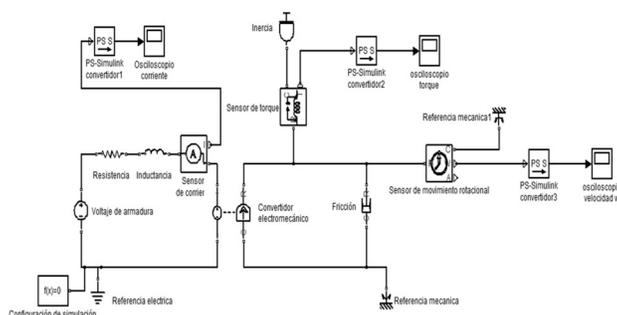


FIGURA 3. MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA PRESENTADO EN SIMSCAPE.

## 2.2 Estimación de los parámetros del motor de corriente continúa

Para este proyecto se ha seleccionado el motor de corriente continua con imán permanente del fabricante Pololu Robotics&Electronics, cuya presentación física se puede observar en la Fig.4 [12]. El motor tiene incorporado un engranaje o caja reductora de velocidad con una relación de 30:1. Debido a la desventaja de los motores de corriente continua, que tienen alta velocidad de giro y bajo torque, muchos fabricantes implementan el sistema de engranaje conectado al eje del motor. Estos motores también son denominados los motorreductores.



FIGURA 4. EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DEL FABRICANTE POLOLU ROBOTICS&ELECTRONICS.  
[Fuente: <https://www.pololu.com/product/1103>]

Los parámetros eléctricos del motor seleccionado para el proyecto, son suministrados por el fabricante Pololu Robotics&Electronics y se encuentran en la Tabla 2.

TABLA 2. LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MOTOR SUMINISTRADOS POR EL FABRICANTE.

Voltaje nominal	12 VDC
Velocidad nominal sin carga	350 RPM
Corriente nominal sin carga	300 mA
Torque máximo de bloqueo	8 kgf.cm
Corriente máxima de bloqueo	5A

En el modelo matemático previamente presentado están identificados los parámetros que caracterizan las propiedades eléctricas y mecánicas del motor (Tabla 1). Para la estimación de dichos parámetros se utilizó la técnica de medición directa e indirecta. En la Tabla 3 son presentados los resultados de valores obtenidos de los parámetros del motor seleccionado.

TABLA 3. LOS PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MOTOR.

Parámetro	Valor	Técnica aplicada
Ra (resistencia de armadura)	2.94 [ $\Omega$ ]	Medición directa (óhmetro)
La (inductancia de armadura)	2.31 [mH]	Medición directa (medidor LCR)
Kb (constante de fuerza contra electromotriz)	0.327 [V/(rad/seg)]	Estimado en base de mediciones de Va, la y w.
Kt (constante de torque de motor)	0.327 [N.m/A]	Estimado en base de mediciones de Va, la y w.
B (constante de fricción viscosa)	0.00345 [N.m.s]	Estimado en base de mediciones de la y w.
J (momento de inercia)	0.0012 [Kg.m <sup>2</sup> ]	Estimado en base de medición de constante de tiempo mecánica $\tau_m$ .

### 2.3 Verificación del modelo matemático

En base al modelo matemático del motor de corriente continua se presenta la función de transferencia resultante, donde la velocidad de giro del motor es la variable que se desea controlar por medio del voltaje de la armadura (ecuación 6).

$$\frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{(L_a \times s + R_a) \times (J \times s + B) + K_b \times K_t} \quad (6)$$

Reemplazando los valores de los parámetros previamente determinados, la función de transferencia se presenta en la ecuación 7.

$$\frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{117965.4}{s^2 + 1275.6 * s + 42243.87} \quad (7)$$

Una vez determinada la función de transferencia del motor, se procede a la verificación del modelo utilizando el software de Matlab. En la Fig. 5 se presenta la velocidad de giro del motor cuando en la armadura se aplica un voltaje de 12V<sub>DC</sub> (voltaje nominal). Se observa que la velocidad de giro del motor en estado estacionario es de 33,5 [rad/seg].

En la Tabla 4 se observa la comparación de los valores de velocidad de giro del motor para un voltaje de armadura de 12V<sub>DC</sub> (voltaje nominal): el valor suministrado por el fabricante, el valor medido experimentalmente en el laboratorio utilizando el tacómetro digital y el resultado obtenido en Matlab, utilizando el modelo matemático previamente desarrollado. Se observa que los valores reales de velocidad de giro del motor y los valores de simulación son muy cercanos, que indica que el modelo matemático obtenido es válido para el análisis del sistema y diseño del control.

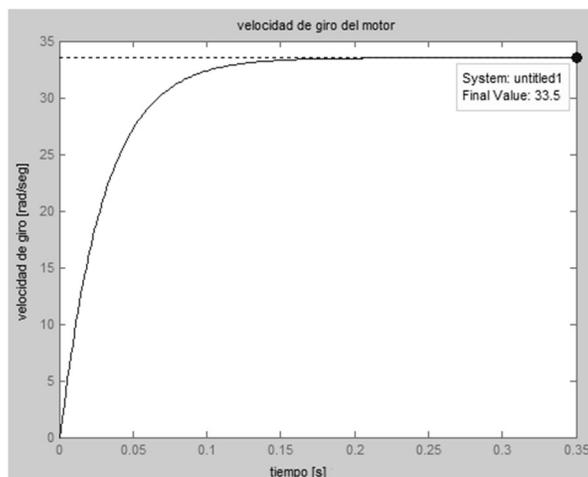


FIGURA 5. SIMULACIÓN EN MATLAB DE VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR PARA VOLTAJE NOMINAL DE 12V<sub>DC</sub> EN LA ARMADURA.

TABLA 4. COMPARACIÓN DE VALORES DE VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR PARA UN VOLTAJE NOMINAL DE 12V<sub>DC</sub>

Valor suministrado por el fabricante	350 rpm	36.65 rad/seg
Valor medido con el tacómetro	326 rpm	34.14 rad/seg
Valor obtenido de simulación en Matlab		33.5 rad/seg

La simulación obtenida en Simulink corresponde a la Fig. 6. Se observa el voltaje tipo escalón de magnitud 12V<sub>DC</sub> presente en la armadura (entrada) y la velocidad de giro del motor de 34 rad/seg como respuesta.

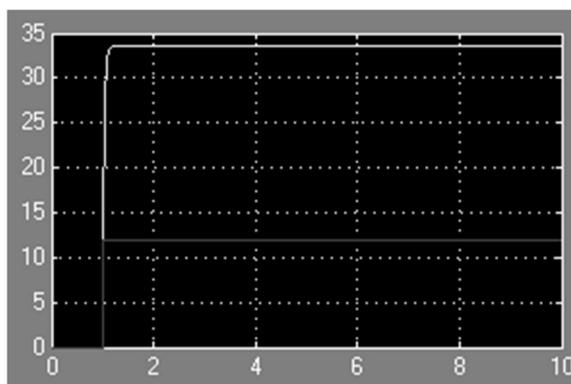


FIGURA 6. SIMULACIÓN EN SIMULINK DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR PARA VOLTAJE NOMINAL DE 12V<sub>DC</sub> EN LA ARMADURA.

Otra simulación fue realizada en Simscape de Matlab, bajo el mismo voltaje nominal de 12V<sub>DC</sub> en la armadura. En la Fig. 7 se observa la velocidad de giro del motor, en la Fig. 8 la corriente del motor y en la Fig.9 el torque del motor.

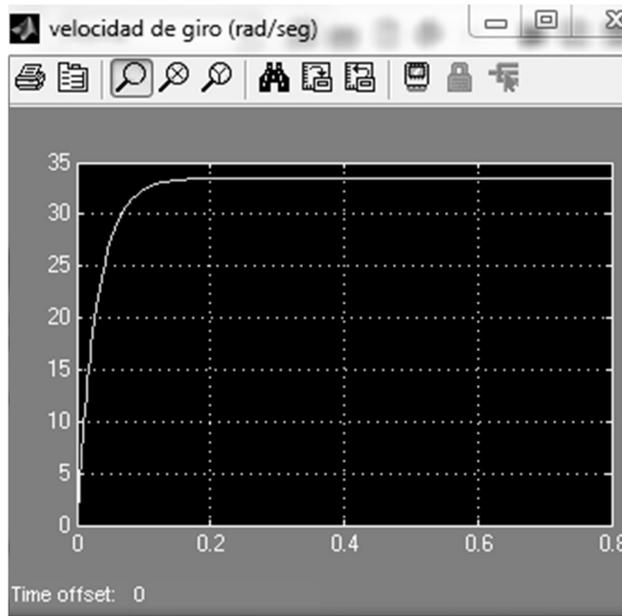


FIGURA 7. SIMULACIÓN EN SIMSCAPE DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR PARA UN VOLTAJE NOMINAL DE 12V<sub>dc</sub> EN LA ARMADURA.

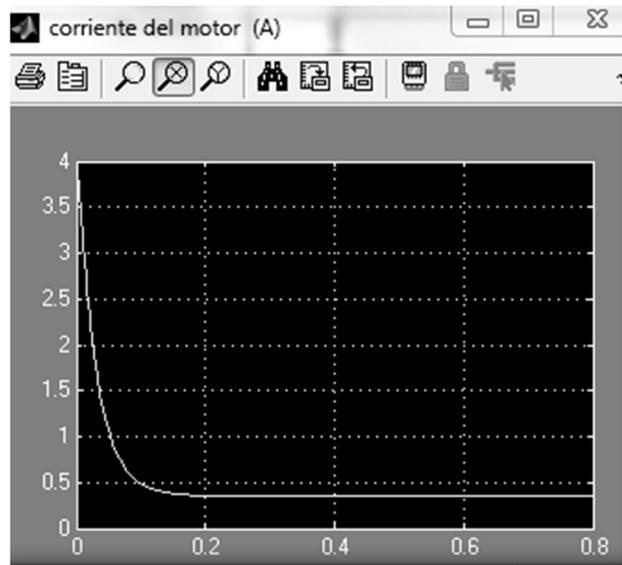


FIGURA 8. SIMULACIÓN EN SIMSCAPE DE LA CORRIENTE DEL MOTOR PARA UN VOLTAJE NOMINAL DE 12V<sub>dc</sub> EN LA ARMADURA.

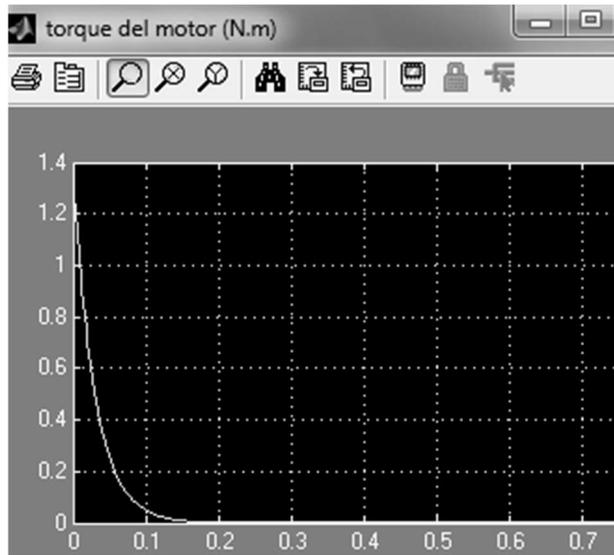


FIGURA 9. SIMULACIÓN EN SIMSCAPE DEL TORQUE DEL MOTOR PARA UN VOLTAJE NOMINAL DE 12V<sub>DC</sub> EN LA ARMADURA.

La simulación en Simscape también demuestra el comportamiento esperado del motor; se observa que el motor en estado permanente alcanza la velocidad nominal de 34[rad/seg] (el mismo resultado obtenido previamente en Simulink), la corriente nominal es muy próxima a los 300mA (coincide con el valor suministrado por el fabricante) y el torque del motor en estado permanente es cero, debido que no está acoplada la carga externa al eje del motor.

## 2.4 Identificación del Motor de Corriente Continua

La técnica experimental es la otra forma de obtener el modelo de un sistema dinámico y se conoce como identificación del sistema. Esta técnica requiere aplicar cierta excitación y observar la respuesta del sistema. Para el caso del motor de corriente continua, el procedimiento de identificación del sistema se realizó utilizando la tarjeta de Arduino UNO para la adquisición de los datos y el software Matlab para su almacenamiento y análisis. Interconectar el Arduino con Matlab requiere la instalación previa de un Toolbox apropiado en Matlab. También se necesita programar la tarjeta de Arduino Uno (el código de programación esta suministrado por la corporación MathWorks) [13].

En la Fig. 10 se presenta un sistema adecuado para proceder identificación del motor de corriente continua experimentalmente; el sistema permite, por un lado, energizar el motor de corriente continua y por otro lado obtener una señal eléctrica proporcional a la velocidad de giro del motor. El sistema consiste de dos motores de corriente continua, de las mismas características, acoplados eje con eje mecánicamente; el sistema es conocido como motor-generator.

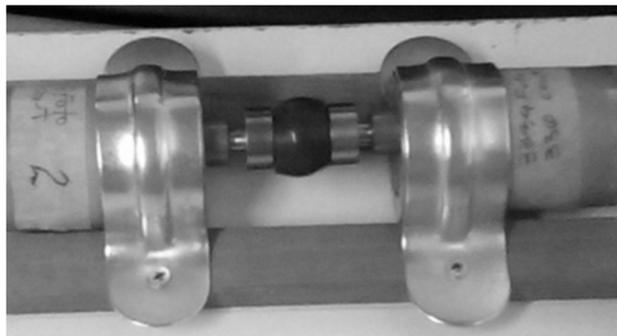


FIGURA 10. EL SISTEMA MOTOR-GENERADOR PARA ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL MOTOR.

En la Fig. 11 son presentados los resultados obtenidos en el proceso de adquisición de datos. En la parte superior de la figura se presenta el voltaje aplicado en la armadura del motor que tiene forma de un escalón de magnitud de 1.2V<sub>DC</sub> (fue necesario tomar una décima parte del voltaje nominal de 12V<sub>DC</sub> debido que la tarjeta de Arduino UNO no soporta los voltajes superiores de 5V<sub>DC</sub>). En la parte inferior de la figura se presenta la respuesta del sistema motor-generator; la señal eléctrica proporcional a la velocidad de giro del motor.

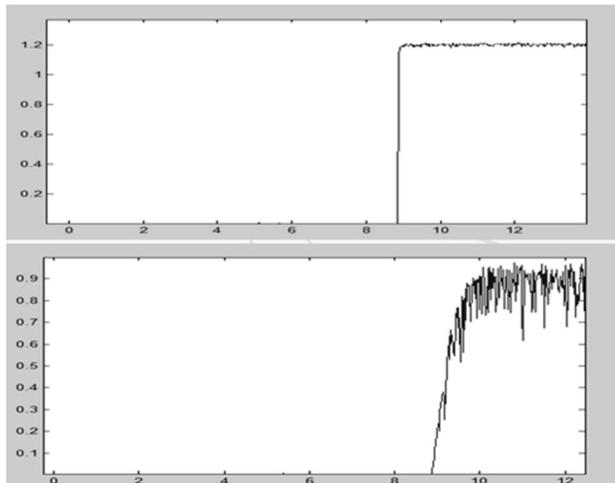


FIGURA 11. EL RESULTADO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL MOTOR, OBTENIDO POR MEDIO DE LA TARJETA DE ARDUINO UNO Y DE MATLAB.

Los datos obtenidos son posteriormente utilizados en Matlab para la identificación del motor de corriente continua [14]-[15]. La herramienta utilizada, denominada *System Identification Tool*, aparece en la Fig.12.

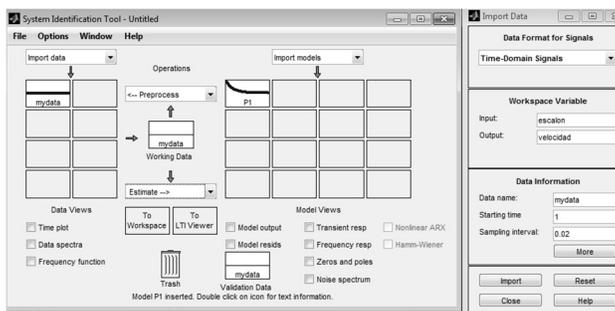


FIGURA 12. LA HERRAMIENTA PARA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS FÍSICOS DE MATLAB.

En la Fig. 13 se presenta la función de transferencia obtenida por medio de identificación del motor de corriente continua en Matlab.

*Process model with transfer function:*

$$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp1 \times s}$$

$$Kp = 0,73196$$

$$Tp1 = 0,41419$$

FIGURA 13. LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OBTENIDA POR MEDIO DE LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMA EN MATLAB.

Para verificar este resultado son utilizados el Matlab y el osciloscopio. En la Fig. 14 se observa la respuesta del motor (velocidad de giro) obtenida en el Matlab, utilizando la función de transferencia adquirida en el proceso de identificación del motor de corriente continua. La velocidad de motor en estado estacionario es proporcional al voltaje de aproximadamente  $0.9V_{DC}$  cuando la señal de la entrada (voltaje de armadura) es de  $1,2V_{DC}$  (una décima parte de voltaje nominal). Se puede sacar la conclusión que para la señal de  $12V_{DC}$  en la armadura, la señal de la respuesta sería  $9V_{DC}$ , que corresponde a la velocidad de giro de  $27,5[\text{rad/seg}]$  (ecuación 8).

$$w = \frac{e_b}{K_b} = \frac{9V}{0.327 \frac{V}{\text{rad/seg}}} = 27.5 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right] \quad (8)$$

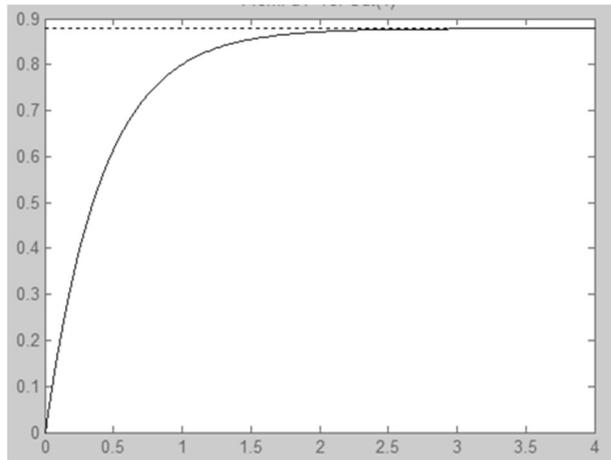


FIGURA 14. VERIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OBTENIDA POR IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA EN MATLAB.

En la Fig. 15 son presentados dos señales obtenidas utilizando el osciloscopio: la señal de voltaje en la armadura (escalón de magnitud de 12V<sub>DC</sub>) y la señal de salida en sistema motor-generador de 9,73V. La velocidad de giro correspondiente del motor es de 30,37 [rad/seg]. Este valor es muy próximo al valor obtenido utilizando el modelo adquirido por identificación del motor de corriente continua (ecuación 8).

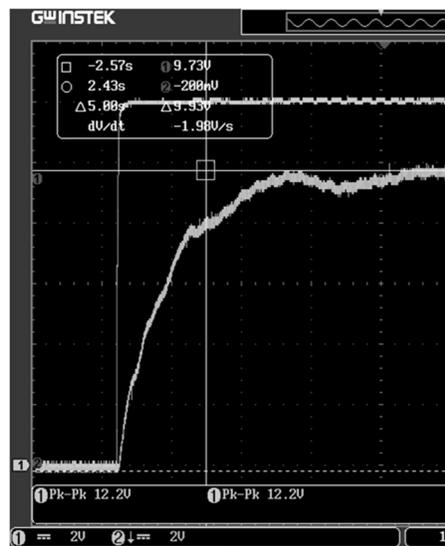


FIGURA 15. VERIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA UTILIZANDO EL OSCILOSCOPIO.

### 3. Diseño de control PID

Las funciones de transferencia obtenidas en el proceso de modelado del motor de corriente continua son utilizadas para el análisis y diseño de controlador PID [16]-[20]. La primera función de transferencia (ecuación 7), representa el motor como un sistema de segundo orden. Utilizando la herramienta *SISO Design* de Matlab, para el diseño de controlador, se obtuvo la función de transferencia del controlador PID; el requisito en el diseño fue el tiempo de la etapa transitoria de 0,5seg de duración. En la Fig. 16 se presenta la función de transferencia del controlador PID obtenida.

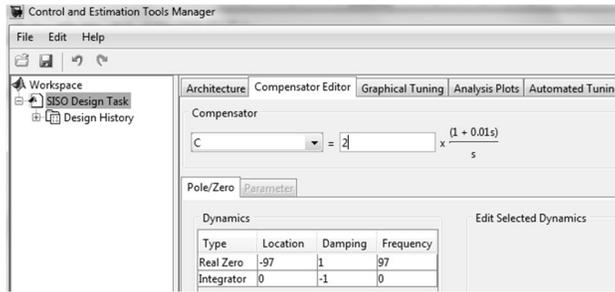


FIGURA 16. APLICACIÓN DE HERRAMIENTA DE SISO DESIGN DE MATLAB PARA DISEÑO DE CONTROLADOR PID (DISEÑO EN BASE DE MODELO MATEMATICO).

En la Fig. 17 se presenta la velocidad de giro del motor cuando se tiene incorporado el controlador PID anteriormente diseñado.

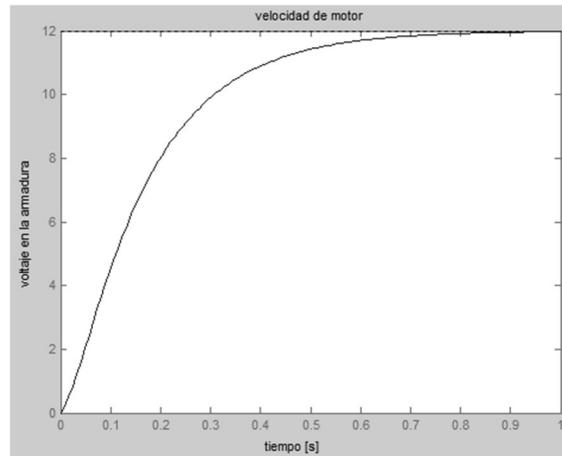


FIGURA 17. RESPUESTA DEL MOTOR GUBERNADO POR EL CONTROLADOR PID (DISEÑO EN BASE DE MODELO MATEMATICO).

La segunda función de transferencia obtenida por medio de identificación del motor de corriente continua, también fue evaluada utilizando *SISO Design* de Matlab. En la Fig.18 se presenta el resultado de la función de transferencia del controlador PID.

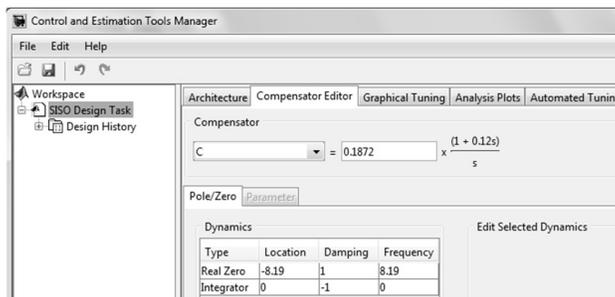


FIGURA 18. APLICACIÓN DE HERRAMIENTA DE SISO DESIGN DE MATLAB PARA DISEÑO DE CONTROLADOR PID (DISEÑO EN BASE DE IDENTIFICACION DE MOTOR).

En la Fig. 19 se muestra la velocidad de motor cuando se tiene incorporado el controlador PID obtenido. Se observa que la etapa transitoria es mucho mayor comparando con el resultado de la Fig. 17.

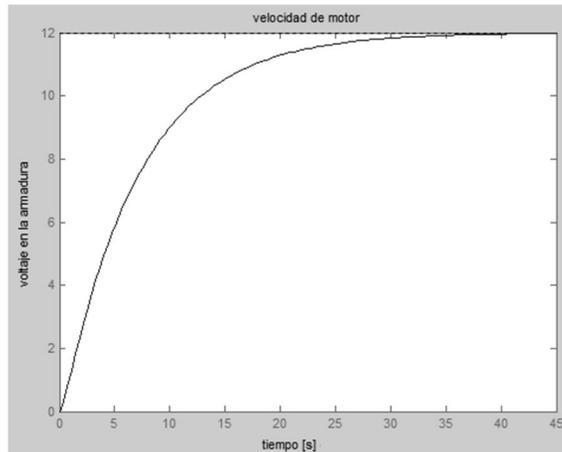


FIGURA 17. RESPUESTA DEL MOTOR GUBERNADO POR EL CONTROLADOR PID (DISEÑO EN BASE DE IDENTIFICACION DE MOTOR).

En la implementación práctica de control PID se van a realizar ensayos con ambos diseños de control PID para comparar sus resultados.

#### 4. Implementación de la transmisión inalámbrica de datos

Para realizar el control inalámbrico para gobernar el movimiento de un objeto móvil, según una trayectoria arbitrariamente seleccionada, son aplicadas varias pruebas experimentales. La tecnología seleccionada para esta funcionalidad es la reconocida tecnología ZigBee. Se trata de la transmisión inalámbrica de datos en base de protocolo ZigBee. Para ello se tienen disponibles distintos radios transreceptores y para este proyecto son seleccionados módulos Xbee Serie 2. El protocolo ZigBee permite establecer transmisión inalámbrica de datos entre dos o más dispositivos a corta distancia; los dispositivos tienen bajo consumo de energía, baja tasa de transmisión de datos y son de bajo costo [21]. Esta tecnología es satisfactoria para las necesidades de este proyecto debido a requerimiento de transmitir relativamente baja cantidad de datos a corta distancia.

#### 5. Conclusión

Los resultados obtenidos en el proceso de modelado del motor de corriente continua son satisfactorios y validados utilizando el software Matlab y otras herramientas que ofrece este software (Simulink, Simscape y System Identification Tool). En el proceso de diseño de control PID son utilizadas las funciones de transferencia obtenidas: por el modelo matemático y por la identificación de motor de corriente continua. Los resultados de las simulaciones, utilizando Matlab, han sido satisfactorios. En la siguiente etapa de este proyecto, está prevista la validación de funcionamiento del controlador PID diseñado.

Las próximas pruebas e implementación física de sistema de control inalámbrico para gobernar el movimiento de un objeto móvil, son las siguientes: la interconexión de la tarjeta de Arduino UNO con la tarjeta Arduino Motor Shield y Arduino XBee Shield (para la implementación de control PID de velocidad y de sentido de giro de dos motores de corriente continua) y la interconexión de la tarjeta de Arduino UNO con la tarjeta Arduino XBee Shield y Arduino Joystick Shield (para la implementación de transmisión inalámbrica de datos de control). Se seleccionó la tarjeta de Arduino UNO en la parte de implementación del sistema de control por su bajo costo y sus satisfactorias características técnicas para este proyecto [22].

#### 5. Referencias

- [1] K. Ogata, "Ingeniería de Control Moderno", Prentice Hall, Madrid, 2010.
- [2] R. Dorf, R. Bishop, "Sistemas de Control Moderno", Prentice Hall, Madrid, 2005.
- [3] A. Barrientos, R. Sanz, F. Matía, E. Gambao, "Control de Sistemas Continuos", Mc Graw Hill, Madrid, 1996.
- [4] V. M. Hernández, R. Silva, R. V. Carrillo, "Control Automático", Colección CIDETEC, México, 2013. [Online available: [http://www.controlautomatico.com.mx/book/CONTROL%20AUTOMATICO%202013\\_HIGH.pdf](http://www.controlautomatico.com.mx/book/CONTROL%20AUTOMATICO%202013_HIGH.pdf)].
- [5] F. X. Blasco, M. A. Martínez, J. S. Senent, J. Sanchis, "Sistemas Automáticos", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2000.
- [6] T. Álamo, D. Limón, M. G. Ortega, M. Ruiz, G. Heredia, "Introducción al Simulink", Universidad de Sevilla, Sevilla, 2000.
- [7] MathWorks, "Simulink User's Guide", The MathWorks Inc., Natick, 2015.
- [8] MathWorks, "Simscape User's Guide", The MathWorks Inc., Natick, 2014.
- [9] MathWorks, "Simscape Getting Started Guide", The MathWorks Inc., Natick, 2014.
- [10] C. Urrea, J. Kern, "Characterization, Simulation and Implementation of a New Dynamic Model for a DC Servomotor", IEEE Latin America Transactions, Vol. 12, No. 6, pp. 997-1004, September 2014.

- [11] M. S. Álvarez, "Modelo Matemático de un Motor de Corriente Continua Separadamente Excitado: Control de Velocidad por Corriente de Armadura", Latin American Journal of Physics Education, Vol. 6, No. 1, pp. 155-161, March 2012.
- [12] Pololu Robotics&Electronics, "Metal Gearmotor 30:1". [Online available: <https://www.pololu.com/product/1103>].
- [13] MathWorks, "Arduino Support from MATLAB", The MathWorks, Inc., [Online available: <http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html>].
- [14] M. Fruk, G. Vujisic, T. Spoljaric, "Parameter Identification of Transfer Functions Using MATLAB", 36th International Convention on Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), pp. 697-702, 2013.
- [15] D. A. Zacarias, "Estudio y Control Automático Retroalimentado de un Motor de CD de Laboratorio con las Herramientas de Matlab y Labview" (Tesis), Universidad Veracruzana, Xalapa, 2011.
- [16] J. D. Rairán, C. E. Guerrero y J. A. Mateus, "Diseño de Controladores de Tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) y Difuso para la Posición de un Motor de Corriente Continua (DC)", Revistas Científicas Pontificia Universidad Javeriana – Ingeniería y Universidad, Vol. 14, No.1, pp. 137-160, Enero-Junio de 2010. [Online available: <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/972/570>].
- [17] E. Rodríguez, J. Páez, "Diseño Mecatrónico de una Shield de Arduino para el Control de Motores DC con Escobillas", Prospect, Vol. 14, No. 1, pp. 73-79, Enero-Junio 2016. [Online available: [http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/view/370/pdf\\_32](http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/view/370/pdf_32)].
- [18] P. Vikhe, N. Punhabi, C. Kadu, "Real Time DC Motor Speed Control using PID Controller in Labview", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Issue 9, Sep. 2014.
- [19] N. Korenic, M. Horvatic, "Upravljanje Brzinom Vrtnje Malog Istosmjernog Elektromotora Koristenjem Arduino Razvojne Platforme", Technical Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 70-76, Sep. 2015. [Online available: [http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=203363](http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=203363)].
- [20] P. Vinnacota, "Motor Control with Arduino: A Case Study in Data-Driven Modeling and Control Design", The MathWorks, Inc., 2013. [Online available: [http://www.mathworks.com/tagteam/77442\\_92066v00\\_motor-control-with-arduino-a-case-study-in-design.pdf](http://www.mathworks.com/tagteam/77442_92066v00_motor-control-with-arduino-a-case-study-in-design.pdf)]
- [21] J. Titus, "The Hands-on Xbee Lab Manual", Elsevier, Waltham, 2012.
- [22] J. Blum, "Exploring Arduino", John Wiley&Sons, Indianapolis, 2013.

## Caracterización de Fases Minerales en Sulfuros Polimetálicos Mediante Tratamiento Digital de Imágenes

### Characterization of Minerals Phases in Polymetallic Sulphides by Digital Image Processing

Carlos Enrique Giraldo-Vélez <sup>a</sup>, Juan Guillermo Osorio-Cachaya <sup>b</sup>, Carlos Mario Serna-Zuluaga <sup>c</sup> & José Alejandro Posada-Montoya <sup>d</sup>

<sup>a,b,c,d</sup> Grupo de Investigación e innovación Ambiental GIIAM.  
Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia.

[ce.giraldo@pascualbravo.edu.co](mailto:ce.giraldo@pascualbravo.edu.co), [juancachaya@pascualbravo.edu.co](mailto:juancachaya@pascualbravo.edu.co), [c.serna@pascualbravo.edu.co](mailto:c.serna@pascualbravo.edu.co),  
[alejandro.posada@pascualbravo.edu.co](mailto:alejandro.posada@pascualbravo.edu.co)

### Resumen

Una metodología para la identificación y cuantificación de fases minerales en muestras de sulfuros polimetálicos mediante tratamiento digital de imágenes, TDI, fue desarrollada con el fin de evaluar la eficiencia en la recuperación de oro en procesos de electrolixiviación con tiosulfato. La preparación ceramográfica de los sulfuros polimetálicos se realizó mediante la norma ASTM E3, obteniendo un total de 5 secciones pulidas de las cuales se tomaron 1000 micrografías mediante un microscopio óptico Carl Zeiss. El TDI se realizó por medio de un software Open Source, en el cual se programó un algoritmo para determinar en forma automática las fases presentes, su porcentaje y morfología. Las muestras presentaron las siguientes fases minerales: pirita, galena, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, cuarzo, oro libre, y otras que, por su tamaño, forma, y cantidad no eran representativas estadísticamente para el presente estudio. Se logró identificar cristales de pirita inequigranulares y subhedrales (58%), cristales de galena de color gris claro con anisotropía débil y clivaje perfecto a 90° mostrando pits triangulares (15%), cristales de esfalerita, calcopirita y arsenopirita (7%) y oro libre <1%. El método desarrollado permitió la evaluación efectiva, en tiempos altamente menores a los requeridos mediante caracterización óptica manual.



cual consume un mínimo de dos meses para la completa identificación y cuantificación realizada por un operario calificado. Mientras que con el TDI desarrollado en este trabajo el tiempo necesario se reduce en un 90%, y se favorece la estadística en los resultados al utilizar un número altamente mayor de micrografías. Mediante la caracterización óptica manual se identificaron 1.300 cristales por probeta, mientras que con TDI hasta un millón de cristales.

**Palabras claves:** Caracterización Mineralógica, electrolixiviación, minería de oro, tratamiento digital de imágenes

### **Abstract**

A methodology for identification and quantification of mineral phases in samples of polymetallic sulphides was developed by digital image processing, DIP, in order to assess the efficiency of gold recovery in electro-leaching processes with thiosulfate. The ceramography preparation of polymetallic sulphides was performed by ASTM E3 standard, obtaining a total of 5 polished sections from which 1000 micrographs were taken with a Carl Zeiss optical microscope. The DIP was performed with an Open Source software and an in-house programmed algorithm to determine the phases present, its percentage and morphology automatically. The samples showed the following mineral phases: pyrite, galena, sphalerite, chalcopyrite, arsenopyrite, quartz, free gold, and others whose size, shape, and quantity were not statistically representative for the present study. It was possible to identify inequigranular and subhedral pyrite crystals (58%), crystals of light gray galena with weak anisotropy and perfect cleavage at 90 ° showing triangular pits (15%), crystals of sphalerite, chalcopyrite and arsenopyrite (7%), and free gold <1%. The developed method allowed the effective assessment, in much less time than required by manual optical characterization, which consumes at least two months to complete identification and quantification by a qualified operator. While the developed DIP in this work reduces the time required by 90%, and the statistical results are favored by using a higher number of micrographs. 1.300 crystals per specimen were identified by manual optical characterization, while up to a million crystals per specimen were identified by DIP.

**Keywords:** Mineralogical characterization, electroleaching, gold mining, digital image processing.

## **1. Introducción**

Las características históricas de la minería en Colombia corresponden a su realidad geológica. Sus cordilleras surgen a través del tiempo en sucesivos eventos orogénicos, donde en los suelos de las laderas de los complejos y escasos macizos se encuentra disperso el oro encerrado y mezclado entre otros minerales, o suspendido en las corrientes de agua [1].

En Colombia, dentro de la explotación de minerales metálicos predomina el oro, el cual representa el 90,9%. En 23 departamentos encuestados en el país existen 4.545 entables mineros, pero es preocupante que solo 549 cuentan con licencia y título minero, lo cual evidencia que la mayoría de los entables incumplen con las normas que ahora se exigen para garantizar una producción responsable y sostenible [2].

La minería de oro ha generado controversia en los últimos años debido a su impacto en el medio ambiente y en la salud humana. Sin embargo, el mercado del oro ha ido ganando protagonismo en todo el mundo, haciendo que la producción de este recurso aumente a más de 2.500 toneladas en 2010. En consecuencia, la producción de oro en Colombia se ha incrementado en más del 300% desde 2006. Su producción ahora ocupa el quinto lugar en América Latina, superando la producción de Chile, pero aún por debajo de la de Perú, México, Argentina y Brasil. Hoy en día, el país produce alrededor de 54.000 kilogramos de oro al año [3].

Uno de los mayores impactos de la minería de oro es el uso de cianuro y mercurio durante el proceso de beneficio para extraer el oro. Es la minería artesanal a pequeña escala la responsable del 20% al 30% de la producción mundial de oro y el uso del mercurio para separar y extraer el oro de veta es la práctica favorita. Se estima que una décima parte de todas las emisiones de mercurio generadas por el hombre en el mundo provienen de estos procesos mineros [4]. Sólo en Colombia se arrojan hasta 150 toneladas/año de mercurio al ambiente, dando al país la primera posición como el mayor contaminador por mercurio en el mundo de la minería artesanal de oro [5].

El uso del mercurio permite a los mineros individuales llevar a cabo todo el proceso de forma independiente sin entrar en alianzas con otros mineros. El mercurio es fácil de usar, muy eficaz en la captura de oro, muy accesible y fácil de transportar, así como más barato en comparación con otros métodos. Este método utiliza principalmente dos técnicas, cada una liberando diferentes cantidades de mercurio en el medio ambiente. En la primera técnica, 100% del material se amalgama durante la trituración, molienda y el proceso de lavado. Este método se considera el uso más contaminante del mercurio, se requiere de 3 a 50 unidades de mercurio para producir una unidad de oro, en promedio son producidas 5 unidades [3].

Debido a tantas deficiencias y reglamentaciones en la explotación minera, surgen iniciativas en pro de mejorar tanto el impacto como los procedimientos de esta. En Segovia Antioquia en el 2010 sugirieron reducir en un 10% las concentraciones de mercurio en el aire a pesar de que hubo un aumento del 30% en la producción de oro [6]. Con el objetivo de proteger y salvaguardar la salud humana y preservar los recursos naturales renovables y el ambiente se decreta el 15 de julio de 2013 la ley 1658, por medio de la cual se establecen



disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país. Se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones. Para la minería se reglamenta una fecha límite de 5 años para erradicar el uso de mercurio en todo el territorio nacional y de un término de 2 años para establecer medidas de control y restricción a la importación y comercialización de mercurio y los productos que lo contengan. También se aclara que se prohíbe la ubicación de nuevas plantas de beneficio que utilicen mercurio [7]. Apoyando ésta ley está el proyecto Cero Mercurio, organizado y liderado por la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Secretaría de Minas de la Gobernación de Antioquia, dictando talleres y capacitando sobre el **mejoramiento de prácticas comprometidas con el desarrollo social y el medio ambiente** [8].

Surgen también nuevas tecnologías que excluyen al mercurio y cianuro del proceso de recuperación, como el proceso de electrolixiviación con tiosulfato. Sonde el tiosulfato reemplaza el cianuro, y es encargado de destruir compuestos complejos presentes en minerales refractarios. La formación de éste se realiza en condiciones especiales, mediante la sustitución de un átomo de oxígeno por otro de azufre en un ion sulfato. La reacción sobre la superficie del mineral se puede considerar como un proceso de electrolisis, donde se involucran dos reacciones simultáneas: la reducción del oxidante y la oxidación del mineral con la transferencia de electrones a través del sistema cristalino del mineral, muy similar a la corrosión de metales. Este es un proceso menos contaminante; oxidando químicamente el azufre del mineral a sulfato o bisulfato, evitando así el encapsulamiento del oro; teniendo, además, control sobre la emisión de contaminantes importantes como arsénico, antimonio y azufre al medio ambiente [9]. El proceso convencional (amalgamación y cianuración) presenta una eficiencia del 65% en la recuperación, mientras que el proceso electrolixiviación mejora en un 95% [10].

El conocimiento de las características de los materiales fuentes o menas, ya sea en los procesos tradicionales de beneficio o en las alternativas a estos procesos, puede mejorar la eficiencia en la obtención del oro. Con métodos como la difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, mineralogía automatizada y microscopía óptica, la caracterización mineralógica tiene el potencial de mejorar la evaluación y la exploración, además de orientar la planificación de dónde, cómo y qué se puede extraer [11]. Los análisis practicados aportan información útil que permite evitar errores experimentales y ensayos poco productivos que generarían incrementos en los costos.

Dentro de las fases minerales principales que se pueden encontrar al caracterizar están los sulfuros como la pirita que es amarillento e isotrópico (de débil anisotropía), se caracteriza por ser fracturado y común en todo tipo de roca. La calcopirita es amarillo verdoso, su anisotropía es débil, se caracteriza por su asociación y por ser más amarillo y más suave que la pirita. La esfalerita es gris e isotrópico, se caracteriza por su color gris oscuro y poseer reflexiones internas rojas y por fracturas. La arsenopirita es blanca, presenta anisotropía fuerte dándole un color azulado, se caracteriza por su forma de rombo. La galena es gris claro con anisotropía débil. La bornita es rosáceo claro y marrón, su anisotropía es muy débil y se caracteriza por empañado entre azul o morado e intercrecimientos con calcopirita. La ilmenita es gris claro, ligeramente rosado, su anisotropía es moderada y se caracteriza por sus inclusiones lamelares de hematita. El cuarzo, no es un sulfuro, es un óxido de silicio, es muy común en la superficie terrestre [12].

La evolución de hardware y software ha contribuido a importantes cambios en la caracterización de materiales en las últimas décadas donde las imágenes digitales se almacenan de manera eficiente en la memoria del computador y pueden ser procesadas y analizadas con el fin de extraer información cuantitativa y cualitativa requiriendo conocimientos de diferentes aspectos como la resolución de imagen y profundidad de color, formatos de archivo, compresión, entre otros [13].

Las imágenes se pueden presentar en diferentes formatos. En el modo de hoja de cálculo, la imagen se muestra como una matriz en la que cada celda representa un píxel y la intensidad del píxel se muestra numéricamente, valores que representan un punto y elemento específico de la imagen. Esto puede ser útil en el análisis de estas partes específicas de la imagen y puede ayudar a entender el efecto de la operación matemática que representa esta [13].

Actualmente el tratamiento digital de imágenes (TDI) es ampliamente utilizado en todo tipo de procesos, desde teledetección espacial hasta industriales, categorizada como una herramienta muy efectiva a la hora de obtener y explorar toda la información que contiene un proceso o elemento a partir de una imagen.

Dentro de la producción de la mina de carbón, el tratamiento digital de imágenes se ha empleado en la detección de información de los macerales del carbón. Éste es el principal equipo dentro de sus procesos y su confiable operación es muy importante para el beneficio de la economía de la mina y definir el grado de este y su potencialidad de generación de aceite de petróleo. Mediante el tratamiento digital de imágenes y la rápida y precisa acción de una computadora que utiliza una mezcla de programación entre C++ y Matlab se logran detectar estas fallas y al detectar la señal de la imagen se mejora la confiabilidad de detección de información y de otros software que complementan el tratamiento digital [14].

En la química de los materiales se han diseñado metodologías para la construcción de modelos de relación entre la estructura y propiedad de materiales, basados en correlaciones estadísticas entre los parámetros de imagen extraídos. La metodología consiste en la conversión de imágenes de SEM en descriptores morfológicos cuantitativos útiles, tales como rugosidad y textura, por tratamiento digital de imágenes se separan las imágenes en componentes de alta y baja frecuencia que reflejan rugosidad en los regímenes meso y macro, y con la aplicación de componentes adicionales se logra correlacionar los parámetros morfológicos con otras características de rendimiento [15]. Así mismo el tratamiento digital de imágenes se ha utilizado para recuperar la topografía de la superficie articular en el estudio de la anisotropía mecánica e hidráulica de las articulaciones de roca, que dependen en gran medida de la rugosidad

superficial y la abertura [16]. También se han desarrollado algoritmos en el tratamiento digital de imágenes, tanto para analizar los resultados de procesos como catalizadores de CO por electrooxidación [17], como para automatizar el reconocimiento de menas metálicas en procesos mineralúrgicos e industriales [18].

En síntesis, el objetivo de este trabajo fue evaluar la mineralogía y el grado de oxidación del mineral (luego de haber sido sometido al proceso de lixiviación de oro a partir de minerales refractarios con soluciones de tiosulfato) mediante técnicas analíticas como Microscopía Óptica de Luz Plana Polarizada (MOLPP) y TDI.

## 2. Materiales y Métodos

### Caracterización Mineralógica

Las muestras minerales fueron cedidas por el Centro Provincial de Gestión Minero Agro-empresarial del nordeste antioqueño, mina el Silencio, municipio de Segovia. Las muestras contenían tenores promedio de oro representativos de la región, estas fueron sometidas a un proceso de conminución con el fin de garantizar una distribución de tamaño de partícula, pasante malla Tyler 200 (~75µm). Para su estudio y análisis se hicieron montajes de granos en resina epóxica y luego fueron desbastadas y pulidas hasta superficie espejo. Se obtuvo un total de 5 probetas para el estudio de fases minerales.

La caracterización mineralógica de las muestras, antes y después del tratamiento de lixiviación, fue hecha mediante el TDI, donde se identificaron y cuantificaron las diferentes fases presentes en las muestras a partir del procesamiento de imágenes capturadas con un microscopio óptico de luz plana polarizado, modo luz reflejada, CARL ZEISS AXIO SCOPE -A1-POL, alta resolución con corrección cromática y compensación de imagen plana, con objetivos de aumento en aire de 5, 10, 20 y 100X.

Teniendo en cuenta propiedades ópticas tales como color, intensidad luminosa, isotropismo, entre otras; el TDI se realizó mediante el software ImageJ v.1.50b, que permite adquirir, visualizar, editar, procesar y analizar imágenes en diferentes formatos. Adicionalmente cuenta con un lenguaje de Macros y una variedad de plugins que permiten generar nuevas funciones. La adquisición de las imágenes se hizo con los objetivos de aumento de 5, 10 y 20X en el microscopio, realizando un recorrido horizontal y vertical definido sobre la probeta, dejando 3, 2 y 1 mm de separación entre imágenes de acuerdo al objetivo utilizado para evitar el solape de las mismas (Fig. 1). Las imágenes se guardaron en único archivo en formato TIFF para facilitar el uso del algoritmo creado para el software (macro).

Posteriormente las imágenes fueron convertidas en formato de 8 bits para facilitar su manejo en escala de grises y normalizadas para extender los valores de intensidad luminosa en el espectro de 0 a 255 bits, luego se aplicó la herramienta threshold encargada de separar cada fase mineral por su valor en el espectro de escala de grises y finalmente se hizo el análisis de cada fase mineral dada la información suministrada por el software tales como el área, perímetro, moda, promedio y porcentaje de área de cada partícula.

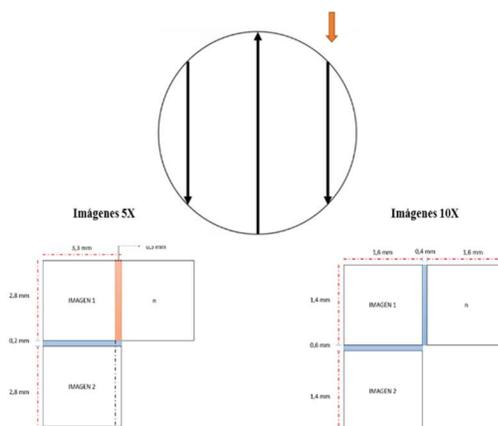


FIGURA 1. RECORRIDO REALIZADO EN CADA PROBETA Y MEDIDAS DE LAS IMÁGENES EN LOS OBJETIVOS 5X Y 10X PARA ESTABLECER MOVIMIENTOS HORIZONTALES Y VERTICALES.

### Análisis de Patrones de corrosión por TDI

Para determinar el porcentaje de corrosión en cada muestra se utilizó el TDI. Se analizaron características como surcos y poros (Fig. 4) generados por la oxidación. Se observaron un total de 164 cristales, entre ellos, pirita, esfalerita y galena. En los cristales que presentaron corrosión se utilizó la técnica de Focus Stacking (Fig. 2) con el fin de mejorar las condiciones de visualización, disminuyendo el efecto de la profundidad de campo (total de micrografías utilizadas, 790).

La profundidad de campo se presenta por la falta de paralelismo de la muestra, efecto que se agudiza al aumentar la profundidad de observación. Las micrografías se obtuvieron con el objetivo 100X en un microscopio petrográfico de luz plana polarizada, aumentando con el tornillo micrométrico de enfoque  $\frac{1}{2}$  mm de profundidad desde el primer punto focal de la imagen hasta el punto final tomando cerca de 5 micrografías por cristal a analizar. Las imágenes se guardaron en único archivo en formato .TIFF para facilitar el uso del algoritmo creado para el software (macro). Posteriormente las imágenes fueron convertidas en formato de 8 bits para facilitar su manejo en escala de grises y normalizadas para extender los valores de intensidad luminosa en el espectro de 0 a 255 bits. Se hizo la reconstrucción virtual de los cristales con la herramienta Stack Focuser. El porcentaje de corrosión de cada cristal se determinó a partir de la información suministrada por el software tales como el área, perímetro, porcentaje de área e intensidad luminosa tanto del cristal como de la zona corroída. Conociendo la intensidad luminosa que representa el cristal se pudo cuantificar su área total incluyendo zonas afectadas, así mismo se determinó el área que representan las zonas corroídas y con esta relación se pudo definir el porcentaje que estas representan respecto al área total del cristal.

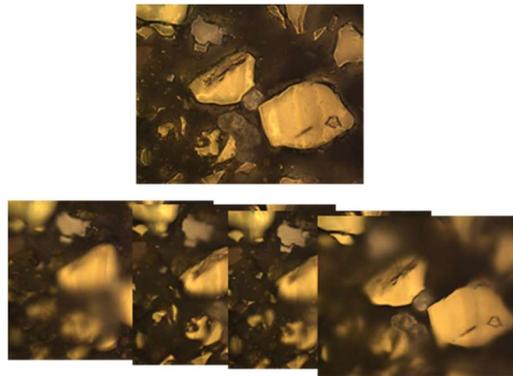


FIGURA 2. PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN DE PARTÍCULAS (FOCUS STACKING).

### 3. Resultados y Discusión

#### Observación Microscópica

La muestra del mineral refractario presentó las siguientes fases minerales: Pirita ( $\text{FeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), y algunas fases minerales que, por su tamaño, forma y cantidad no se lograron identificar. Adicionalmente, se observaron cristales euhedrales y subhedrales de pirita, con formas cuadradas características de cristalización isométrica. Las superficies observadas son lisas, algunas fracturadas y con contactos netos entre cristales. En algunas zonas se encontraron agregados finogranulares con cristalización anhedral. Los cristales más grandes presentaron inclusiones de esfalerita con cristalización subhedral a anhedral, mayoritariamente, aunque también se presentan en forma euhedral en menor proporción.

#### Caracterización por TDI

Se logró identificar, separar y cuantificar por medio del software Image'J cristales de pirita inequigranulares y subhedrales (58%), cristales de galena de color gris claro con anisotropía débil y clivaje perfecto a  $90^\circ$  mostrando pits triangulares (15%), cristales de esfalerita, calcopirita, arsenopirita y óxidos (7%), cristales de cuarzo (19%), y oro libre <1% (Fig 3). En total por probeta se logró identificar hasta un millón de cristales. Se obtuvieron 1000 imágenes que garantizan un nivel de confianza del 95% de los resultados con un intervalo de error del 4% respecto al promedio. El error se le atribuye a cambios en la intensidad luminosa que presentaron algunos puntos de las probetas, afectando directamente la intensidad luminosa que representa una fase específica. Estos cambios se deben a la falta de paralelismo que presenta la probeta en ese punto o a la cantidad de resina epóxica que puede haber.

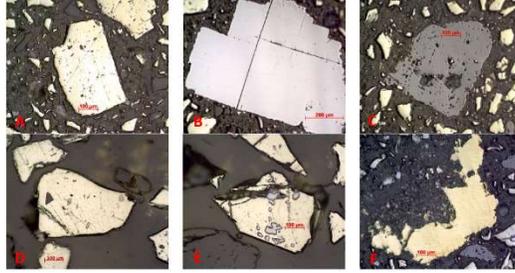


FIGURA 3. (A) CRISTAL DE PIRITA SUBHEDRAL, (B) CRISTAL DE GALENA CON PITS DE CLIVAJE, (C) CRISTAL DE ESFALERITA ANHEDRAL, (D) CRISTALES DE CALCOPIRITA COMO INCLUSIONES EN PIRITA, (E) CRISTALES DE ARSENOPIRITA EN CRISTALES DE PIRITA, (F) ORO LIBRE.

### Análisis de Patrones de corrosión por TDI

Se reconstruyeron 131 partículas que presentaron patrones de corrosión, cada muestra con un ensayo particular presentó comportamientos diferentes:

Ensayo A M2-T4: Con el TDI se determinó que esta muestra presentó muy poca corrosión, entre 0% y 4% de área corroída, representando un promedio del 1%.

Ensayo B M2-T5: Respecto a la muestra anterior hubo un aumento en la corrosión determinada mediante TDI, la mayoría de los cristales presentaron entre 6% y 10% de área corroída, con algunos poros y surcos.

Ensayo C M3-T11: Esta muestra presentó un aumento en la cantidad de poros y surcos, representando entre el 12% y 16% de área corroída.

Ensayo D -M3-T12: La cantidad y el tamaño de los poros y surcos en algunos cristales aumento en gran proporción, representando hasta un 26% de área corroída. Con TDI se determinó que esta muestra presentó el mayor porcentaje de corrosión entre 18% y 26% de área corroída (Fig. 4).

En todas las muestras después de la electrolixiviación hubo reducción de todas las fases minerales presentes. La calcopirita (52%), la pirita (44%) y la galena (40%) fueron las fases minerales con mayor disolución. La galena en algunas muestras presentó hasta un 100% de disolución.

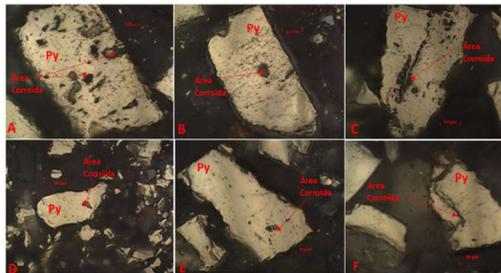


FIGURA 4. CRISTALES DE PIRITA CORROÍDOS RECONSTRUIDOS CON FOCUS STACKING Y CON TDI: (A-D) ENSAYO D, (B-E) ENSAYO C, (C) ENSAYO B, (F) ENSAYO A.

## 4. Conclusiones

La caracterización mineralógica por TDI permitió identificar y cuantificar diferentes fases minerales presentes en las muestras de manera mucho más eficiente y económica. Los resultados son favorecidos por la estadística al utilizar un número altamente mayor de micrografías. Mediante la caracterización óptica manual se identificaron 1.300 cristales por probeta, mientras que con TDI hasta un millón de cristales y en menor tiempo. La fase de mayor ocupación dentro de la muestra fue la pirita con casi el 60%, siguiéndole el cuarzo con un 20%. Visualmente se puede notar este mismo comportamiento.

Se identificó la variación que presentaron las diferentes muestras al ser sometidas al proceso de electrolixiviación, evaluando al tiempo que tan eficiente fue este en la disolución de fases minerales acompañantes del oro, representando un promedio del 49% disolución de fases como la galena, la pirita y calcopirita, y un 11% promedio de corrosión de la pirita.

La efectiva separación y cuantificación de las fases en el software Image'J está sujeta a la correcta definición de los parámetros para la captura de las imágenes en el microscopio. De igual manera los resultados se ven afectados por muchas variables, principalmente

por la falta de paralelismo en las muestras se presenta un fenómeno denominado profundidad de campo, el cual altera el nivel de intensidad luminosa que puede representar cada fase. Otra variable importante a tener en cuenta es la resina que ocupa gran porcentaje de área de cada imagen afectando en gran medida los resultados del cuarzo.

La resina y el cuarzo representan un nivel de intensidad luminosa similar, lo que dificulta la separación de ambos, sumándole el problema de profundidad de campo el error tiende a incrementar.

En la experimentación y en las muestras analizadas la esfalerita es la fase que menos se vio perjudicada por las similitudes en el nivel de intensidad luminosa. Los resultados de las demás fases se alteraron por todas las dificultades mencionadas, como en unas podía aumentar el área en otras podía disminuir.

Siendo el cuarzo el más afectado, su área promedio podría aumentar en un 50% por imagen, mientras que el área de la galena y la pirita disminuirían por imagen en un promedio del 9% y 16% respectivamente.

## 5. Agradecimientos

Al laboratorio de Materialografía, a los integrantes del Semillero de Investigación Ambiental (SIA) y del Grupo de Investigación e Innovación Ambiental (GIAM), a la Dirección Operativa de Investigaciones (DOI) de la Institución Universitaria Pascual Bravo; y a Colciencias por la financiación parcial de este proyecto.

## 6. Referencias

- [1] J. C. Umaña, "Colombia compleja," in *Colombia Compleja*, Bogotá: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Instituto de Investigación de recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2014, p. 102.
- [2] M. de minas y Energía, "Censo Minero Departamental: Colombia Minera, Desarrollo Responsable," *Bogotá, D.C., Colombia*, 2012. [Online]. Available: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/CensoMinero.pdf/093cec57-05e8-416b-8e0c-5e4f7c1d6820>.
- [3] L. Güiza and J. D. Aristizabal, "Mercury and gold mining in Colombia: a failed state," *Univ. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 33–49, 2013.
- [4] L. A. Rodríguez-Villamizar, D. C. Jaimes, A. Manquían-Tejos, and L. H. Sánchez Rodríguez, "Irregularidad menstrual y exposición a mercurio en la minería artesanal del oro en Colombia," *Biomédica*, vol. 35, no. SPE, pp. 38–45, Jan. 2015.
- [5] P. Cordy, M. M. Veiga, I. Salih, S. Al-Saadi, S. Console, O. Garcia, L. A. Mesa, P. C. Velásquez-López, and M. Roeser, "Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution.," *Sci. Total Environ.*, vol. 410–411, pp. 154–60, Dec. 2011.
- [6] P. Cordy, M. Veiga, B. Crawford, O. Garcia, V. Gonzalez, D. Moraga, M. Roeser, and D. Wip, "Characterization, mapping, and mitigation of mercury vapour emissions from artisanal mining gold shops.," *Environ. Res.*, vol. 125, pp. 82–91, Aug. 2013.
- [7] C. de Colombia, "Ley 1658 / 15 de Julio de 2013. Disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y otras disposiciones.," *Repub. Colomb. - Gob. Nac.*, pp. 1 – 9, 2013.
- [8] P. M. Escobar, "Mineros del Bajo Cauca le apuestan al 'cero mercurio,'" *El tiempo*, 2015. [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/mineros-del-bajo-cauca-le-apuestan-al-cero-mercurio/14069256>.
- [9] V. A. A. R. C. F. L. P. S. D. L. Dávila, "Refractory of Gold Concentrate," *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Metal. y Geográfica*, 2005.
- [10] Osorio, J., Serna, C., Ospina, J., "CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE SULFUROS POLIMETÁLICOS PROVENIENTES DEL NORDESTE ANTIOQUEÑO Y SU INFLUENCIA EN PROCESOS DE ELECTRO-OBTENCIÓN DE ORO CON TIOSULFATO," *XV Congr. Colomb. Geol.*, pp. 165–170, 2015.
- [11] H. E. Jamieson, S. R. Walker, and M. B. Parsons, "Mineralogical characterization of mine waste," *Appl. Geochemistry*, vol. 57, pp. 85–105, Jun. 2015.
- [12] C. D. Gribble and A. J. Hall, *Optical Mineralogy: Principles and Practice*, Chapman an. New York: Department of Geology & Applied Geology, University of Glasgow, 1993.
- [13] W. Baldwin, *Metallography and Microstructures Handbook*, vol. 9. 2004.
- [14] C.-L. W. Qing-Liang Zeng, Ji-Gang Wang, Liang Wang, *Proceedings of the 2012 International Conference on Communication, Electronics and Automation Engineering: The Research of Coal Mine Conveyor Belt Tearing Based on Digital Image Processing*, vol. 181. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [15] K. Artyushkova, S. Pylypenko, M. Dowlapalli, and P. Atanassov, "Use of digital image processing of microscopic images and multivariate analysis for quantitative correlation of morphology, activity and durability of electrocatalysts," *RSC Adv.*, vol. 2, no. 10, p. 4304, May 2012.
- [16] S. J. Chen, W. C. Zhu, Q. L. Yu, and X. G. Liu, "Characterization of Anisotropy of Joint Surface Roughness and Aperture by Variogram Approach Based on Digital Image Processing Technique," *Rock Mech. Rock Eng.*, Jul. 2015.
- [17] L. C. Grabow, Q. Yuan, H. A. Doan, and S. R. Brankovic, "Novel 2D RuPt core-edge nanocluster catalyst for CO electro-



- oxidation," *Surf. Sci.*, vol. 640, pp. 50–58, Oct. 2015.
- [18] R. Castroviejo, E. Berrezueta, "Automated microscopic characterization of metallic ores with image analysis: a key to improve ore processing. I: test of the methodology," *Revista de Metalurgia*, 43(4), pp. 294–309, 2007.

## La Nube como Mecanismo de Monitoreo Remoto de Variables Ambientales Aplicada a un Deshidratador Solar

### Cloud as Remote Monitoring Mechanism of Environmental Variables Applied to a Solar Dehydrator

Jose Alfredo Palacio  
Grupo de investigación GIIAM  
Facultad de Ingeniería Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia  
[josealpa@pascualbravo.edu.co](mailto:josealpa@pascualbravo.edu.co)

Bayardo Emilio Cadavid  
Grupo de investigación GIIAM  
Facultad de Ingeniería Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia  
[b.cadavid@pascualbravo.edu.co](mailto:b.cadavid@pascualbravo.edu.co)

#### Resumen

Este artículo, está basado en la necesidad de adquirir datos en un sistema de deshidratación solar cuya ubicación está en una zona apartada y de difícil acceso por lo que se requiere de un monitoreo remoto, el método de comunicación empleado es el de almacenamiento en la nube apoyado en sistemas Raspberry con programación en Python para Linux y un Arduino con modem 3G/4G para acceso a internet. Se adquieren las señales de los sensores de humedad, temperatura y peso. Los valores adquiridos se guardan en la nube y en disco local en un archivo de texto el cual puede ser supervisado remotamente.

**Palabras claves:** monitoreo remoto, internet, marquesina, python, arduino, deshidratación, peso

#### Abstract

This article is based on the need to acquire data in a solar drying system whose location is in a remote area and inaccessible so that it requires remote monitoring, the communication method employed is that of cloud storage systems supported Raspberry Programming Python for Linux and Arduino with 3G / 4G modem for internet access. Signals humidity sensors, temperature and weight. The acquired values are stored in the cloud and on local disk in a text file that is remotely monitored.

**Keywords:** remote sensing, internet, garage, python, arduino, dehydration, weight

### 1. Introducción

Los procesos agrícolas generalmente se encuentran muy retirados de las zonas urbanas y en el caso de Colombia, la topografía es bastante montañosa en la región andina, lo que hace difícil el acceso para monitorearlos. Una medida para registrar las variables inherentes a los cultivos y demás procesos agrícolas, es por medición in-situ o aprovechando las nuevas tecnologías y la reducción permanente costo de internet para el manejo de datos de bajo volumen cuando se trata de sensado remoto.

El proceso de deshidratación se desarrolla empleando diferentes fuentes de energía sean artificiales como en [1] que aprovechan el calor residual de los gases de escape de un motor de combustible disel-biogas, otros aprovechan la energía solar como fuente principal, como en el caso de [2].

Este trabajo se basa en la adquisición de algunas de las variables que intervienen en el proceso de deshidratación y enviar el estado de las mismas remotamente.

Ya en [3] realizan monitoreo remoto empleando el software LabVIEW como lenguaje de programación e interfaz de usuario y basado en PC. Se puede medir cada una de las variables inherentes a estos sistemas dependiendo del volumen de datos, vía GPRS [4], GSM [5], en el proyecto que actualmente se presenta en su etapa de comunicación remota, se

aprovecha otras plataformas más económicas, teniendo en cuenta que la finalidad del proyecto pretende impactar inicialmente a pequeñas economías. El prototipo inicial, se realizó con una marquesina para secado solar de doble cámara, a la cual se le monitorean las variables de humedad, temperatura en el interior y el exterior y el peso de una de las bandejas de secado o deshidratación. Para poder adquirir los datos, se empleó una tarjeta electrónica Arduino Leonardo que envía los datos vía protocolo USART a una tarjeta Raspberry pi en la cual se realiza la toma de datos periódicamente para las tres variables antes mencionadas. El programa se realiza en lenguaje Python 2.7 y los datos se guardan en la nube mediante el programa Overgive para ser adquiridos remotamente. El programa permite autorun en caso de bloqueo por interrupción de energía.

La planta a la que se le analiza la curva da peso es menta tipo piperita que en secado por marquesina tradicional tarda cerca de 5 días, tiempo máximo que se tendrá el sistema vigilado remotamente para determinar el momento aproximado para realizar visita a la zona para retirar el producto.

## 2. Materiales y Métodos

El sistema que se está monitoreando es un horno de deshidratación ubicado en el oriente del departamento de Antioquia Colombia, en una zona de difícil acceso (fig. 1) con condiciones óptimas para la producción de plantas aromáticas y medicinales y en donde se realiza el deshidratado mediante sistemas tipo marquesina (Fig. 2). Se quiere monitorear remotamente el estado de las variables que componen el sistema de deshidratado como son la humedad, temperatura y el peso del material vegetal presente en las bandejas donde se realiza el secado. Esto evitaría que se tenga movilizar personal constantemente y también conocer el momento adecuado para extraer el material, cuando este se encuentre en un estado de secado adecuado para la comercialización. Las pruebas de monitoreo remoto se hicieron con carga constante para determinar las desviaciones de la medida por sobrepeso y definir posible una posible reubicación de la celda de carga o que por temperatura sea necesario un requerimiento de compensación. El material vegetal fue suministrado por la empresa Eshkol Premium Foods s.a.s. que posee cultivos de plantas aromáticas y medicinales en el oriente antioqueño (ver figura 4)

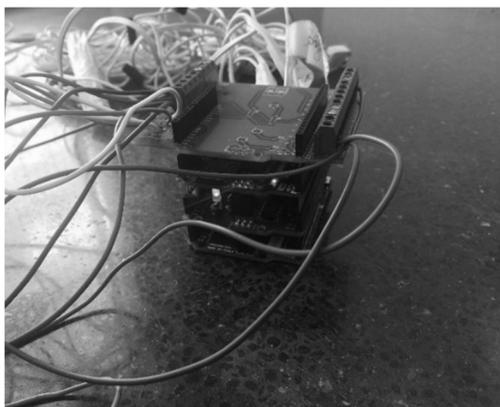
Figura 22. Entrada al sistema deshidratador



Figura 23. Marquesina construida



La adquisición de las variables se realiza empleando un sistema de desarrollo Arduino Leonardo con un shield Ethernet del que se usa la parte de almacenamiento en SD para corroborar datos remoto y detectar posible pérdida de información, dos shield (ver fig. 3) desarrolladas por los autores, una de las cuales maneja el sistema de pesaje y la otra las variables de humedad y temperatura obtenidas del tres sensores AM2302 que tienen un rango de operación de 0a 100% de HR y -40 a 80°C que abarcan los rangos esperados dentro del sistema de deshidratación. Las celdas de carga permiten valores de 5Kg cada una en total son 6 celdas de carga y su señal es acondicionada a través de un hx711 convertidas en modo digital.



**Figura 24. Hardware para Arduino empleado**

Los valores obtenidos de todas las variables son enviadas por puerto serial asíncrono a una Raspberry pi con sistema operativo Raspbian basado en Linux y mediante lenguaje Python que gestiona el proceso de captura y almacenamiento en el equipo servidor, que almacena en el disco conectado con Google drive y este a su vez puede ser supervisado remotamente por computadores de escritorio o dispositivos móviles.



**Figura 25. Invernadero de la empresa Eshkol Premium Foods s.a.s (fuente propia)**

Debido a que la IP de internet con la que se accede remotamente a la información es, es dinámica, se optó por emplear un disco en la nube que tenga acceso desde diferentes equipos remotos y poder monitorear las variables en cuestión.

El cliente de Google drive empleado es el Overgrive con prueba gratis de 15 días y costo de US5 para licencia definitiva. Se debe adquirir la licencia definitiva para que el sistema esté en autorun, el programa desarrollado en Python también arranca al iniciar la Raspberry. El código se muestra a continuación:

```
import os
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import serial
import datetime
from sys import stdout
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(3, GPIO.OUT)
GPIO.output(3, False)
time.sleep(10)
GPIO.output(3, True)
time.sleep(20)
```

```

arduino = serial.Serial('/dev/ttyACM0', baudrate=9600, timeout=10)
while 1:
    dato=arduino.readline()
    if dato:
        x = datetime.datetime.now()
        f = open("/home/pi/Google Drive/output1.txt", "a")
        f.write(str(x.day)+'/'+str(x.month)+'/'+str(x.hour)+':' +str(x.minute)+':' +str(x.second)+' '+str(dato))
        f.close()

```

Con la instrucción `arduino.readline()`, se obtienen las variables obtenidas por el Arduino y con `f.write` se guardan los datos con la fecha en el disco local de la Raspberry el cual es replicado en todos los computadores y dispositivos móviles que tengan instalado el Google drive con el mismo usuario.

El sistema de acceso a internet se conformó por un modem TP-Link TL-MR3220 3G/4G wireless y el modem USB de la empresa Tigo (fig. 5) que tubo señal en la zona de ubicación del deshidratador.



Figura 26. Sistema de acceso a internet empleado

### 3. Resultados y discusión

Las pruebas de temperatura y humedad con medición remota para exterior (Ext), cámara interna del deshidratador (C\_IN) y la cámara denomina de precalentamiento (C\_Pre) se muestran en la fig. 6 y la fig.7

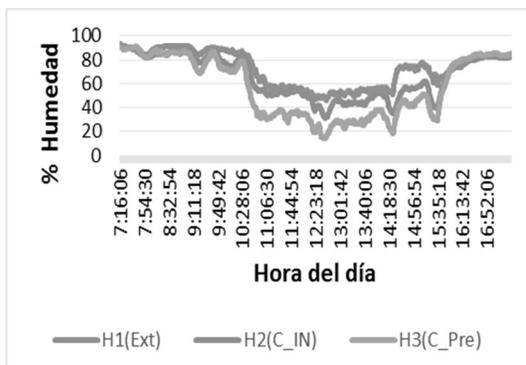


Figura 6. Curvas de humedad en cámaras internas y el exterior

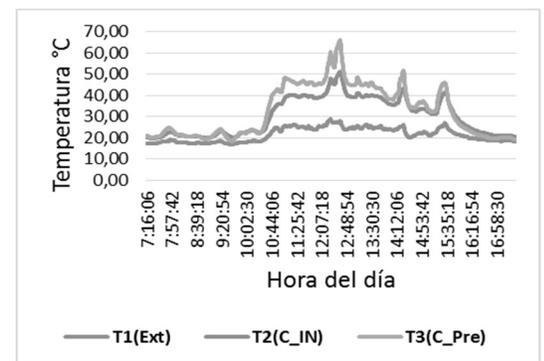


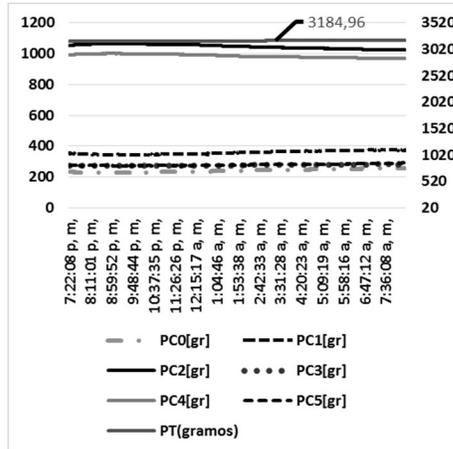
Figura 7. Curvas de temperatura en cámaras internas y el exterior

Las pruebas de peso se realizaron con las seis celdas de carga de 5kg a las que se les midió por separado el peso en gramos para determinar la porción del peso total que cada una de ellas adquiere y con ello determinar la redistribución de las mismas teniendo como tara una bandeja enmallada (fig. 8) donde se ubicó el producto (menta Piperita) a deshidratar con un peso inicial de 4350 gramos, los valores de la madrugada se aproximan a la tendencia determinada en el deshidratado diurno ya que en la noche no se elimina humedad (fig. 11). En la figura 9 se presenta el valor tomado por cada celda en un periodo de 12 horas sin material vegetal y pesando el marco enmallado que contendrá las plantas y el peso registrado sin material vegetal fue de 3184 gramos, valor este que se resta antes de agregar material vegetal cuando el sistema Arduino realiza el cálculo de la tara o peso del sistema que soporta las plantas.



**Figura 8. Bandeja de pesaje instalada**

Se nota un valor de peso constante tanto para los que será el soporte de las pantallas o tara medido en la fig. 9 y el peso registrado con valores menores a 250 gramos como se muestra en la fig. 10. Donde se fueron agregando y quitando valores de peso conocidos y determinar la exactitud del sistema.



**Figura 9. Curvas para carga fija de cada celda de carga (eje izquierdo) y el total (eje derecho)**

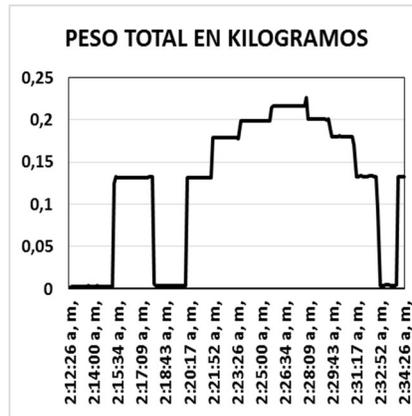


Figura 10. Medidas con peso conocido para determinar la precisión del sistema de pesaje

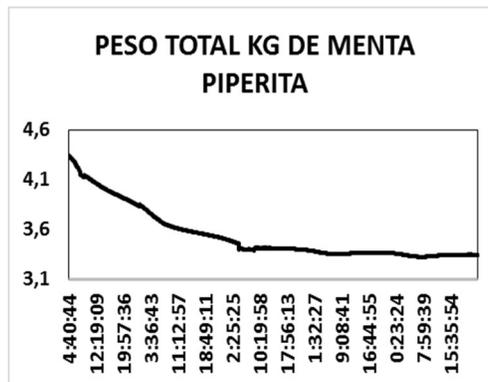


Figura 11. Curva remota de medición de peso

Al finalizar los 5 días se logró monitoreo con una interrupción de la energía voluntario y se pudo reiniciar el sistema, pero recalculando la tara o peso inicial. Las celdas de carga que permiten medir el peso, tuvieron una variación mínima con respecto a la temperatura antes de agregar la carga vegetal.

#### 4. Conclusiones

El sistema no sufrió pérdida de información en el proceso de almacenamiento, pues los datos están grabados tanto en el equipo Raspberry como en la nube y recuperados cada periódicamente en el equipo remoto.

En el sistema de pesaje se hicieron pruebas obligando el reset de la Raspberri para observar el autorun de los programas y funcionó correctamente.

No se observó variación significativa del peso de prueba constante ante variación de la temperatura

Se pudo observar el proceso de deshidratación mediante la disminución del peso que reportaron las celdas de carga

El sistema de internet está sujeto a cobertura del prestador de servicio de internet de datos utilizado y en el caso de este proyecto se debió ubicar en un punto de buena recepción de señal.

Este proyecto de monitoreo remoto, se puede adecuar a cualquier sistema o sensor que maneje señales y protocolos acordes con los sistemas Arduino o mediante un acondicionamiento de señal que permita dicha adecuación, el sistema no llega a un nivel de deshidratación óptimo pues durante el proceso de medición no se activaron los extractores de aire húmedo pues solo se realizó el programa para medición y comunicación remota más no se tuvo en cuenta el control del flujo de aire que sigue como etapa siguiente en el proyecto.

#### 5. Referencias

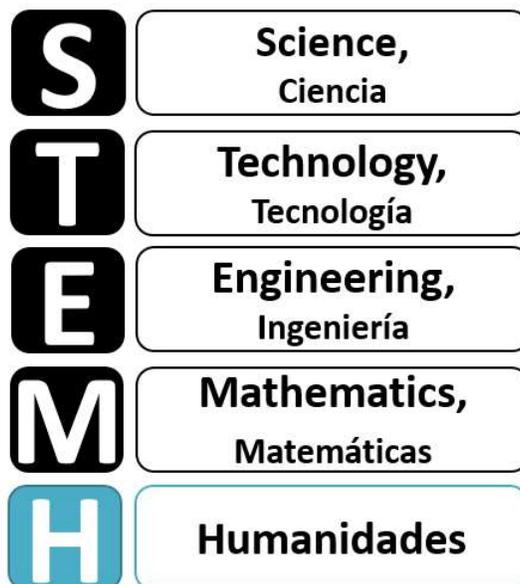
- [1] K. Cagua, L. Olmos-Villalba, B. Herrera y A. Gallego, «Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling,» *Applied Thermal Engineering*, pp. 762-767, 2016.

- [2] C. Phusampao, W. Nilhont y S. Janjai, «Performance of a Greenhouse Solar Dryer for Drying Macadamia Nuts,» de *International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green Energy for Sustainable Development*, Pattaya, 2014.
- [3] H. Karar, A. A. Khuwaja y A. Sattar, «Solar Power Remote Monitoring and Controlling Using Arduino, LabVIEW and Web browser,» *IEEE*, pp. 1-4, 2016.
- [4] D. Munandar y D. Syamsi, «Data logger Management Software Design for Maintenance and Utility in Remote,» de *1st International Conference on Information Teclmology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, 2014.
- [5] S. Jin, S. Jingling, H. Qiuyan y W. Sheng, «A Remote Measurement and Control System for Greenhouse Based on GSM-SMS,» de *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, Xi'an, 2007.

# Medellín, Un Territorio STEM + H

## Por una educación en ciencia motivadora para que nuestros estudiantes aprendan más y mejor

Por la doctora Martha Alexandra Agudelo Ruiz  
Coordinadora Educación para el Trabajo  
Articulación Media Técnica  
Secretaría de Educación Alcaldía de Medellín



Enfoque educativo que integra contenidos matemáticos y científicos utilizando el proceso de diseño de la ingeniería, con el fin de desarrollar a través del trabajo en equipo y el uso de la tecnología soluciones a problemas del mundo real.

### INVESTIGACIÓN

### INDAGACIÓN

### LIDERAZGO

Dirigida mejorar las habilidades de los estudiantes, proyectándolos a una vida universitaria exitosa basados en experiencias significativas de las ciencias naturales y humanas con acompañamiento docente.

- ✓ Proyectos Formativos o productivos
- ✓ Emprendimiento y Liderazgo
- ✓ Metodología de Investigación en el Aula
- ✓ Asignaturas de Ciencias Básicas



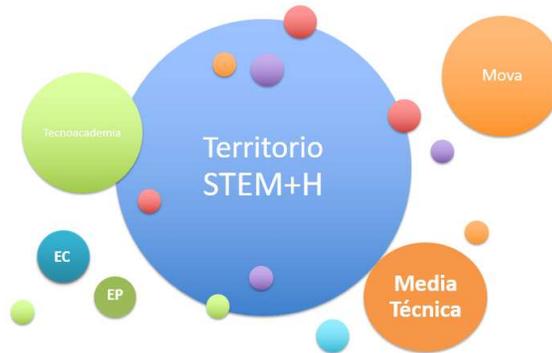
## ¿Porqué Humanidades?

Lo verdaderamente importante debería ser lo que permanece, lo que nos define como humanos. Lo que permanece en el hombre es la cultura, la lengua, la historia, el arte, etc. Estos estudios son transmitidos de generación en generación para la permanencia de la especie, y que necesariamente hay que mantener para no olvidar la esencia de ser hombre.

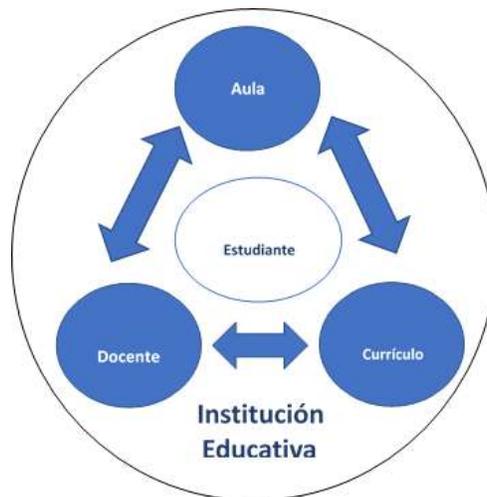
**El desarrollo de las humanidades es lo que nos sacará de las próximas dudas éticas que se aproximan a un ritmo vertiginoso debido a los grandes avances en la ciencia.**

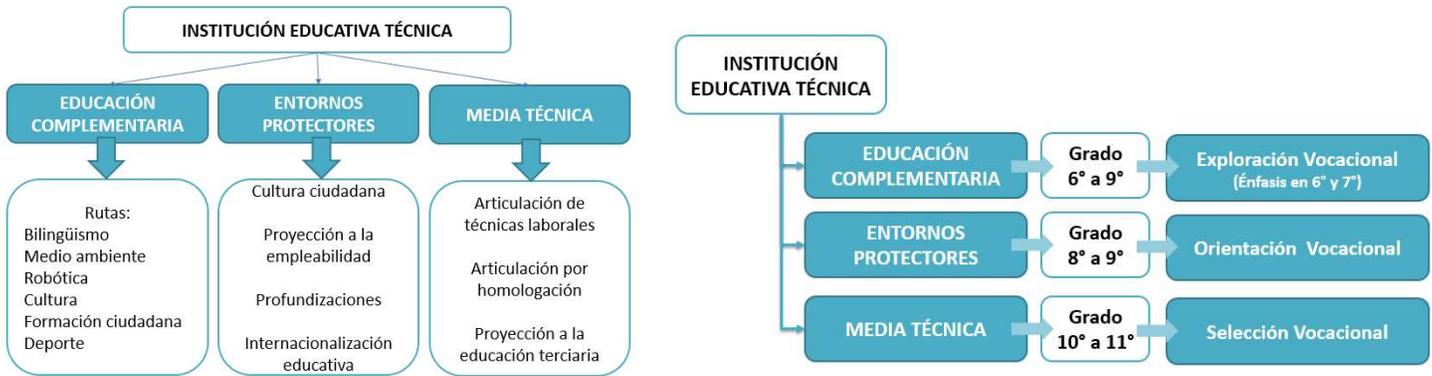
Apostar por las Humanidades sólo puede aportar beneficios al avance de nuestra sociedad.

## Como proyectar “MEDELLÍN, UN TERRITORIO STEM + H”

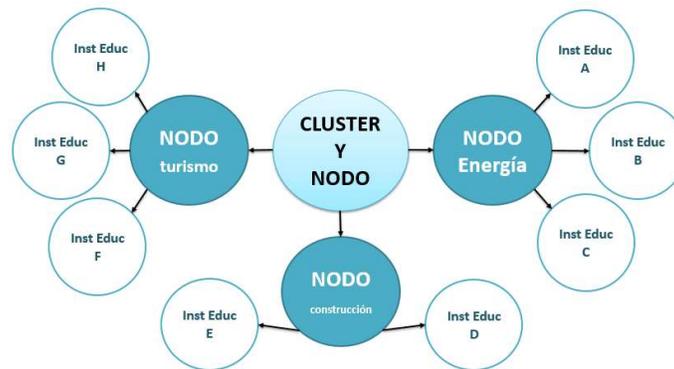


Dentro del PEI y el SIEE, la metodología adquiere un espacio (físico, tecnológico y pedagógico) para generar currículos universales e inclusivos en la aplicación de las actividades de aprendizaje. Con vinculación de actividades educativas complementarias en básica secundaria para llegar a la media técnica.





El territorio se forma en una Red con Instituciones con programas técnicos en común para desarrollar actividades (científicas, pedagógicas y competitivas).



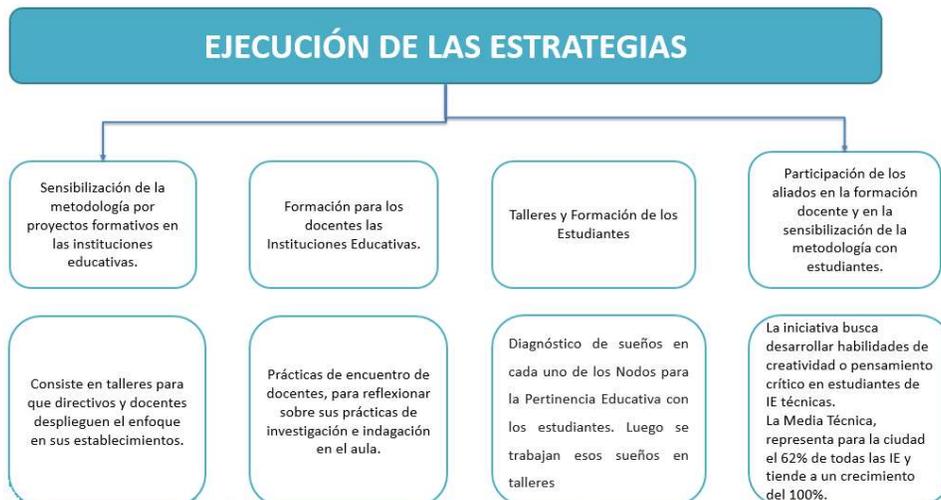
“Medellín, Un Territorio **STEM+ H**” será una estrategia para mejorar la calidad de la prestación del servicio educativo, a partir de la formación de maestros en habilidades y destrezas investigativas con la interacción de estudiantes en el aula. A través de formación por proyectos escolares que permitan solucionar problemas requeridos en un mundo cotidiano.

### Con quién proyectar “MEDELLÍN, UN TERRITORIO STEM + H”

#### Aliados

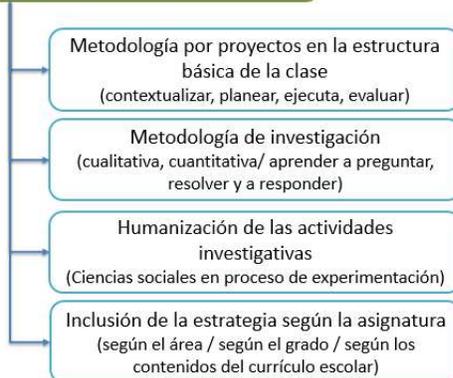
- \* Programa Ondas CTA
- \* Ruta N
- \* Sapiencia
- \* Colciencias
- \* Tecnoacademia Sena
  - Feria de proyectos escolares.
  - Formación de docentes en la metodología.
  - Implementación de la metodología en las instituciones educativas.
  - Implementación de los procesos de exploración vocacional, orientación vocacional y selección vocacional dentro de las instituciones de educación media técnica.
  - Inclusión de la metodología **Medellín, Un Territorio STEM + H** en los proyectos educativos institucionales como eje fundamental de la formación por proyectos, dentro de las asignaturas de las ciencias naturales, las ciencias sociales y humanas.
  - Proyección hacia el modelo de educación terciaria.
- \* Parque Explora
- \* Fundación SIEMENS
- \* Universidad Pontificia Bolivariana UPB
- \* Cámara de Comercio de Medellín
- \* Proantioquia

## Ejecución de la Propuesta Medellín Territorio STEM + H



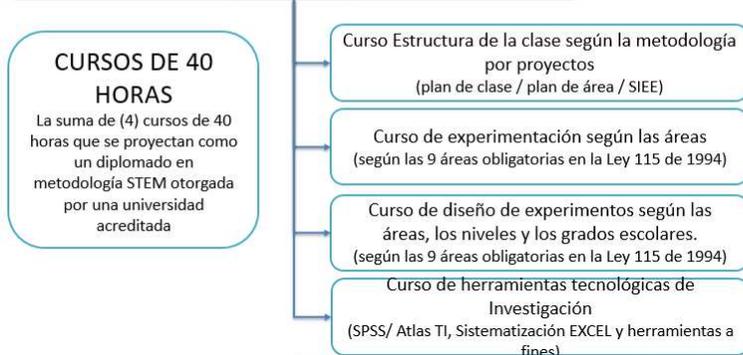
### EJECUCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS

#### Sensibilización de la metodología por proyectos formativos en las instituciones educativas.



### EJECUCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS

#### Formación para los docentes Instituciones Educativas





## La Magia de los Materiales Bidimensionales y su Gran Potencial en Aplicaciones para Ingeniería

Por El Doctor Juan Diego Zapata Caro  
Universidad de Antioquia - Medellín

El Grafeno es un material bidimensional que se deriva del grafito (utilizado en los lápices), que es un cristal de átomos de carbón. A partir del descubrimiento experimental del Grafeno, material completamente bidimensional con espesor de 0.34 nm; una familia de materiales con forma laminar, han estado emergiendo en el mundo de la ciencia, algunos de estos materiales se encuentran en la naturaleza y otros se pueden obtener artificialmente. Los materiales bidimensionales son actualmente fuente de grandes investigaciones por su enorme potencial en ramas de la ingeniería como: electrónica, materiales, civil, eléctrica entre otras áreas de conocimiento. Algunos de estos materiales están siendo utilizados para mejorar nuestras comunicaciones vía internet, para fabricar sensores con alta sensibilidad y para construir transistores de alta velocidad, además se utilizan para mejorar la resistencia mecánica de algunos sistemas y en secuencias de DNA en biología; en otras áreas como la medicina se están empleando para explorar la cura contra algunas enfermedades y en ingeniería ambiental, se usan para procesos de purificación de aguas.

Esta charla pretende mostrar la importancia de los materiales bidimensionales en las ingenierías y subsecuentemente mostrar algunas aplicaciones y estudios utilizando Grafeno y fósforo negro desarrolladas en Mackgraphpe centro de investigación en Grafeno y materiales bidimensionales en Brasil.

## Texturas Metálicas Inspiradas en Piel de Serpientes para Mejorar Desempeño Energético

S. Rudas<sup>1,2</sup>, P. Cuervo<sup>1</sup>, D.A. López<sup>1</sup>, J.P. Cano<sup>1</sup>, J.C. Sánchez<sup>1</sup>,  
H. Estupiñán<sup>1</sup>, H. A. Abdel-Aal<sup>3</sup>, A. Toro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia,  
Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Investigación e Innovación en Energía, Institución Universitaria Pascual Bravo,  
Medellín, Colombia

<sup>3</sup>Drexel University, 3141 Chestnut Street, Philadelphia, PA 19104, USA

En la naturaleza es posible encontrar superficies con un alto grado de complejidad, las cuales presentan un comportamiento atractivo para aplicaciones ingenieriles. En particular, para el área de la tribología viene siendo de gran interés estudiar los animales escamosos como las serpientes debido a que sus desplazamientos se dan con rozamiento constante sobre diferentes terrenos por medio de una gran variedad de movimientos, con un notable control de la fricción y el desgaste generados en el contacto. Dado que dicho control es determinante en la supervivencia de estos animales, sus mecanismos de optimización de fenómenos de disipación de calor y reducción de fricción a través de su superficie ventral se consideran entre los más sofisticados del reino animal.

La mejora de superficies en aplicaciones en donde se necesite reducción del coeficiente de fricción, como por ejemplo el par eje-buje en sistemas rotantes de transmisión de potencia o el par acetábulo-cabeza femoral en implantes de cadera, representa ahorro de energía y una mejora en la eficiencia del sistema y en la resistencia al desgaste de las piezas.

En consecuencia, se ha buscado la fabricación de superficies controladas o, bien llamadas, texturas superficiales determinísticas bio-inspiradas para minimizar el consumo energético en aplicaciones donde la fricción y el desgaste juegan un papel importante. Para lograr este propósito se caracterizó morfológicamente las escamas ventrales de la piel de diversas especies de serpiente por medio de técnicas no destructivas y se definieron parámetros cuantitativos que sean útiles para el proceso de replicación para propósitos de ingeniería.

Una vez caracterizadas las pieles, se procedió a implementar texturización por litografía sobre Titanio grado 5 (biomaterial Ti6Al4V). Las superficies obtenidas fueron sometidas a pruebas tribológicas de tipo pin-disco en condiciones de deslizamiento en seco con diferentes contra-cuerpos. Los resultados fueron correlacionados con las características topográficas de los patrones determinísticos con el fin de identificar las mejoras en términos de desempeño y consumo energético.

## Principales Modificaciones al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

Por el Doctor David Aponte gutierrez  
Dirección de Energía Eléctrica  
Ministerio de Minas y Energía- Colombia

### MAYOR RESPONSABILIDAD EN LOS DOCUMENTOS DE CONFORMIDAD

El responsable de la construcción, ampliación o remodelación de una instalación eléctrica que emite la declaración de la conformidad con RETIE, sin cumplir los requisitos que le apliquen; exponiendo a un peligro inminente la salud o la vida de las personas o en alto riesgo el medio ambiente; la misma instalación o los bienes de su entorno, debe ser investigado y sancionado por el ente de control y vigilancia competente (SIC, SSPD o Alcaldías).

Igualmente, debe ser investigado y sancionado el organismo de inspección acreditado que mediante el dictamen de inspección validó la declaración de conformidad con el reglamento, cuando al momento de la inspección la instalación eléctrica incumplía requisitos del RETIE exponiendo a las personas a un peligro inminente o en alto riesgo el medio ambiente, la misma instalación o los bienes de su entorno.

## NUEVAS PERSONAS EN EL ALCANCE DEL REGLAMENTO

Este reglamento debe ser observado y cumplido por todas las personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, contratistas u operadores, que en el territorio colombiano generen electricidad con cualquier fuente energética, la transformen, transporten o distribuyan, así como a quienes la usen. Igualmente, aplica a quienes, diseñen, construyan, supervisen, inspeccionen, operen o mantengan instalaciones eléctricas en Colombia.

Dentro de los generadores se incluyen los usuarios o clientes de energía eléctrica, que adicionalmente dispongan de equipamiento de generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables o no convencionales, así como los poseedores y operadores de instalaciones de sistemas de cogeneración o de instalaciones de generación distribuida, cualquiera que sea la fuente energética.

Así mismo, deben cumplir el presente reglamento los productores, importadores y comercializadores de los productos objeto del **RETIE** y los organismos que emitan dictámenes de la evaluación de la conformidad relacionados con este reglamento.

**Parágrafo.** Se incluye dentro del alcance de este reglamento la generación de electricidad con fuentes no convencionales, tales como: solar, eólica, geotérmica, hidrotérmica, centrales de cogeneración, olas, mareas, corrientes marinas y biomasa, ya sea procedente de actividades, agrícolas o pecuarias, de cultivos energéticos o desechos.

## NUEVOS PRODUCTOS

- Baterías o acumuladores de carga eléctrica para uso en sistemas de generación, transmisión y distribución eléctrica, sistemas de potencia ininterrumpida (UPS), sistemas fotovoltaicos, eólicos o de almacenamiento de carga para inyectar a la red eléctrica de uso general.
- Equipos para medición de energía eléctrica, Incluye medidor de energía activa, medidor de energía reactiva, transformadores de potencial (TP), transformadores de corriente (TC), gabinetes de encerramiento.
- Inversores de corriente continua a alterna, para sistemas fotovoltaicos, eólicos y otros sistemas de generación o almacenamiento de energía eléctrica que requiera conversión c.c./c.a.
- Partes eléctricas de ascensores, escaleras electromecánicas, pasillos, andenes y rampas para el transporte de personas y las partes eléctricas de tensiones mayores a 25 V de dichos equipos que se importen o comercialicen por separado.
- Reguladores o controladores de tensión para baterías usadas en sistemas fotovoltaicos o eólicos, o sistemas de acumulación para inyectar energía eléctrica a la red de uso general.

## DEFINICIÓN DE ALTA CONCENTRACIÓN DE PERSONAS

Es la concentración de 50 o más personas, pero no limitado a este número, en lugares cerrados, o de movilidad limitada, con el fin de desarrollar actividades tales como: trabajo, deliberaciones, comida, bebida, diversión, compras, espera de transporte, educación, entretenimiento o atención al público.

Igualmente aplica a salones comunales de edificaciones residenciales, salones de comercios de grandes superficies, rutas de evacuación de edificaciones, cavernas, túneles vehiculares, auditorios, boleras, cuarteles, cárceles, comedores públicos, gimnasios, iglesias o lugares de culto, salas de conferencias, salas de espera, salas de juzgados, salas de velación, salas de uso múltiples, lugares de atención al público, lugares de asistencia médica, teatros, estaciones de transporte masivo.

En la aplicación de esta definición se deben tener en cuenta la ventilación del lugar, los sistemas de evacuación y la densidad de personas o factor de carga de ocupantes, conforme a los títulos j y k de la NSR 10, tabla K3.3.1 o los valores señalados en la tabla 7.3.1.2 de la NFPA 101 (Código de seguridad humana).

## OTRAS DEFINICIONES

**EMBEBIDO.** Para efectos de este reglamento se aplica a un cuerpo solido absorbido por un material resultante de una mezcla de líquidos y sólidos, tales como el concreto.

**FRONTERA DE APROXIMACIÓN LIMITADA:** Es el límite hasta el cual una persona advertida puede situarse sin riesgo de exposición a contacto eléctrico.

**FRONTERA DE APROXIMACIÓN RESTRINGIDA:** Es el límite a partir del cual, una persona calificada y habilitada puede trabajar en conductores o partes de circuitos energizados expuestos.

**FRONTERA DE ARCO ELÉCTRICO:** Es la distancia a la cual la energía incidente producida por un arco eléctrico es igual a 5 J/cm<sup>2</sup> (1,2 cal/cm<sup>2</sup>). Se aplica para sistemas mayores a 50 voltios.

**PRODUCTOR.** Quien de manera habitual, directa o indirectamente, diseñe, produzca, fabrique, ensamble o importe productos sujetos a un reglamento técnico, una norma técnica, especificación técnica o documento normativo específico, medida sanitaria o fitosanitaria o que sean objeto de medición o sistemas de medida para su utilización en actividades agrícolas, industriales o comerciales, de investigación, interés público, salud, seguridad de productos o seguridad nacional, protección de los consumidores o protección del medio ambiente.

#### **Ar 8º. SISTEMA DE GESTIÓN DE LA SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO-SGSST**

Dar cumplimiento a los requisitos del Convenio 167 con la OIT (Ley 52 de 1993), de la Ley 1562 del 2012 y el Decreto 1072 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector del Trabajo, en especial el Capítulo 6, Título 4, parte 2 del libro 2. Igualmente, se debe atender la Resolución **1348 de 2009** expedida por el Ministerio de la Protección Social

Todos los empleadores públicos, privados, contratistas y subcontratistas, están obligados a organizar y garantizar el funcionamiento del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). Su cumplimiento será vigilado por la autoridad competente.

El Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). consiste en la planeación, organización, ejecución y evaluación de las actividades de Medicina Preventiva, Medicina del Trabajo, Higiene Industrial y Seguridad Industrial y gestión de emergencias.

Se deben estudiar e implementar los programas de mantenimiento preventivo de las máquinas, equipos, herramientas, instalaciones locativas, alumbrado y redes eléctricas. Así mismo, se deben inspeccionar periódicamente las redes e instalaciones eléctricas, la maquinaria, equipos y herramientas utilizadas y en general todos aquellos elementos que generen riesgos de origen eléctrico.

Las empresas deben contar con los elementos, protecciones y medidas específicas de seguridad preventiva, pasiva y activa en las subestaciones, tipo patio o caverna, para evitar contacto directo con partes energizadas, tales como pértigas de rescate.

#### **DISEÑO O ESQUEMA CONSTRUCTIVO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA**

Toda instalación eléctrica a la que le aplique el **RETIE** debe contar con un diseño eléctrico o con un esquema constructivo, dependiendo del nivel de riesgo de la instalación.

El diseño será exigido a las instalaciones que conllevan mayor riesgo y debe servir como mecanismo de previsión y minimización del mismo, así como de planeación de la construcción, operación y mantenimiento de la instalación eléctrica. Por tal razón, debe ser ejecutado por profesionales de la ingeniería cuya especialidad esté relacionada con el tipo de obra a desarrollar y cuente con la competencia otorgada por su matrícula profesional, conforme a las Leyes 51 de 1986 y 842 de 2003.

#### **REQUIEREN DISEÑO LAS INSTALACIÓN ELÉCTRICA**

- Centrales de generación eléctrica;
- líneas de transmisión;
- redes de distribución,
- subestaciones;
- instalaciones eléctricas para uso final clasificadas como **especiales** destinadas a:
  - lugares clasificados como peligrosos, instituciones de asistencia médica, lugares con alta concentración de personas y sitios de reuniones públicas; aeropuertos, salas de espera de estaciones de transporte; edificaciones prefabricadas (excepto casas prefabricadas); edificios para usos agrícolas o pecuarios; viviendas móviles, vehículos recreativos y remolque estacionados; casas flotantes y palafíticas; puertos y embarcaderos; instalación de equipos especiales; piscinas o jacuzzis, fuentes e instalaciones similares; sistemas integrados y sistemas solares fotovoltaicos, eólicos, biomasa conectadas a la red de uso general o individuales de más de 15 kVA de capacidad instalada; sistemas contra incendio; sistemas de emergencia; ascensores, escaleras electromecánicas, andenes, pasillos o rampas transportadoras de personas, grúas; minas, túneles o cavernas.
- Instalaciones **básicas**
  - **localizadas en edificaciones con más de cuatro cuentas** de energía de cualquier potencia instalada;
  - instalaciones de enseñanza;
  - instalaciones donde se atiende al público;

- grandes superficies;
- instalaciones para urbanizaciones, conjuntos o agrupaciones de edificaciones objeto de una misma licencia o permiso de construcción que contemplen más de cuatro cuentas cualquiera sea su potencia individual instalada
- instalaciones básicas de más de 15 kVA.

## ASPECTOS A TENER EN CUENTA CON LOS DISEÑOS

**Nota 1.** La profundidad con que se deben tratar cada uno de los ítems dependerá del tipo, complejidad y riesgos asociados a la instalación, para lo cual el diseñador debe aplicar un juicio profesional, teniendo en cuenta que el diseñador debe responder tanto por las deficiencias como por los excesos que conlleve el diseño.

**Nota 2.** En las memorias de cálculo el diseñador debe hacer mención expresa de aquellos ítems que a su juicio no aplican en la instalación objeto del diseño y señalar las razones de la no aplicación.

**Nota 3.** Para un análisis de riesgos de origen eléctrico, el diseñador debe hacer una descripción de los factores de riesgos potenciales o presentes en la instalación y las recomendaciones para minimizarlos. En algunos casos no basta que la instalación en el momento de la inspección cumpla los requisitos del presente reglamento ya que actividades en su entorno puede llevar a la aparición de factores de riesgo, que requieren ser advertidos al usuario.

**Nota 4.** Las partes involucradas con el diseño deben atender y respetar los derechos de autor y propiedad intelectual de los diseños; la construcción debe ceñirse a ellos y cualquier modificación debe ser consultada con el diseñador. Cuando un diseño con la autorización escrita del diseñador, se presente como soporte para la aprobación y asignación de recursos de un proyecto público, en la construcción debe aplicarse dicho diseño y el diseñador no podrá oponerse a esto. En todo caso, tanto en la declaración de cumplimiento como en el dictamen de inspección se hará mención del diseñador.

## RESPONSABILIDAD DE LOS DISEÑADORES

Adicionalmente, el diseñador debe certificar el diseño definitivo, para lo cual debe suscribir una declaración de cumplimiento del RETIE; en el evento que en el diseño eléctrico intervengan varios profesionales, debe existir uno que lo coordine, quien suscribirá la declaración y anexará las declaraciones parciales por las demás partes del diseño suscritas por el respectivo profesional que las realizo. La declaración será parte integral de las memorias del diseño y debe cumplir el formato 10.1

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA	
DECLARACIÓN DE CUMPLIMIENTO DEL DISEÑO CON RETIE	
No _____	
Yo _____ mayor de edad, identificado con la CC. No. _____, en mi condición de ingeniero portador de la matrícula profesional No. _____, declaro bajo la gravedad del juramento, que el diseño de la instalación eléctrica (descripción y alcance) _____, localizada en (dirección) _____, del municipio de _____, de propiedad de _____, CC. No. o NIT _____, cumple con todos y cada uno de los requisitos establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, que le aplican.	
En constancia se firma en la ciudad de _____ el _____ de _____ del _____	
Firma _____	
Dirección domicilio _____ Correo electrónico _____ Teléfono _____	

### Sentencia 190-05 sobre el artículo 18 de la Ley 842 de 2003

**‘todo trabajo relacionado con la ingeniería’ deberá ser dirigido por un ingeniero.**, no podría predicarse la constitucionalidad de la disposición acusada, pues una norma según la cual se reserva a una profesión –en este caso los ingenieros– la dirección de cualquier trabajo tan solo por el hecho de tener ‘alguna relación’ con su profesión no es una restricción razonable a la libertad de ejercer profesión u oficio, pues supone reservar para el ejercicio exclusivo de una profesión, actividades para las cuales otros profesionales fueron formados y tienen derecho de ejercerlas.

### Sentencia C-166/15.

Posibilidad a técnicos electricistas de intervenir en proyección y diseño de instalaciones eléctricas de nivel medio (ley 1264) -No se ajusta a la constitución en razón al riesgo social que esta actividad comporta.

### 10.1.1.3 EXCEPCIÓN DE DISEÑO 10.1.2 ESQUEMA CONSTRUCTIVO

No requieren diseño eléctrico:

- 1) Las siguientes instalaciones individuales de uso final catalogadas como básicas: Instalaciones domiciliarias o similares, pequeños comercios o pequeñas industrias, de potencia individual igual o menor a 15 kVA instalables y tensión no mayor a 240 V, que no estén señaladas en el numeral 10.1.1. y
- 2) Ramales de redes eléctricas monofásicos o trifásicos de baja tensión que sumados no superen 1 km para un transformador o 3 km en el mismo proyecto.

Quien la construye debe entregar un esquema constructivo acorde con el plano arquitectónico y con la siguiente información:

La ubicación de la puesta a tierra incluyendo la longitud y material del electrodo, calibre y tipo del conductor.

La ubicación del sistema de medida.

La ubicación del tablero general y de distribución.

La ubicación de las canalizaciones y encerramientos (tubos, canaletas y cajas), así como los diámetros de tuberías o ancho y profundidad de canaletas.

El número y calibres de conductores en cada tramo de tubo o canaleta (neutro, fases, tierra)

La ubicación de los aparatos (interruptores, tomas, timbres, protecciones diferenciales) y puntos de iluminación.

El cuadro de convenciones, conforme a RETIE.

El cuadro de cargas, señalando potencias y tensiones aplicadas en cada circuito.

El diagrama unifilar señalando protecciones de sobrecorriente del alimentador y de cada circuito.

Las distancias mínimas de seguridad respecto de las redes o líneas del entorno de la edificación objeto de la instalación eléctrica y la señalización expresa que no se violan esas distancias.

La caída de tensión para carga máxima al final de cada circuito y donde se conecten motores u otras cargas muy sensibles a la caída de tensión.

Los detalles constructivos que se requieran

### 10.2.2 RESPONSABILIDAD DE LOS CONSTRUCTORES

- Contratar personas calificadas, técnica y legalmente competentes para ejecutar dichas actividades.
- Utilizar productos y materiales que cumplan los requisitos establecidos en RETIE y cuenten con la certificación del producto.
- Desde el inicio de las obras deben asegurar que, al aplicar los diseños, la instalación eléctrica resultante tenga la conformidad con el RETIE. Si se requiere hacer ajustes al diseño, hacerlo con el consentimiento del diseñador.
- Para aquellas instalaciones en que el diseño, interventoría y demás servicios de ingeniería, así como la construcción o montaje, figuren a nombre de una empresa, las responsabilidades derivadas de estos servicios deben ser solidarias entre las partes.
- Los planos finales se deben actualizar conforme a la instalación construida, dichos planos deben ser firmados por la persona competente responsable de la dirección o construcción directa de la instalación eléctrica. El responsable de la construcción de la instalación eléctrica debe presentar un documento escrito donde se señalen las recomendaciones al usuario para no generar alto riesgo, (el plano final no hace parte del diseño).
- Se deben fijar señales o avisos de advertencia de los riesgos de origen eléctrico durante el tiempo de construcción, especialmente cuando se tengan redes de media o alta tensión cercanas a la edificación o al lugar del trabajo. En el evento de considerarlo necesario deben dejarse de forma permanente.

### 10.2.2 RESPONSABILIDAD DE LOS CONSTRUCTORES (CONT.)

Asegurar la aplicabilidad del RETIE bajo las condiciones de todos los elementos energizados que se encuentren en el entorno de la instalación, tales como: plantas de generación, líneas, redes, transformadores, bancos de condensadores o reactancias, y demás elementos energizados que se encuentren asociados a la edificación. Si las condiciones que no hacen aplicable el reglamento son ajenas a la instalación, se debe informar al responsable de tal situación para que corrija la anomalía y dejar la evidencia en la certificación.

Estar registrados en el registro de productores, importadores y prestadores de servicios, sujetos al cumplimiento de reglamentos técnicos de la SIC.

*Parágrafo 1. En el evento que se detecten incumplimientos al reglamento, atribuibles a la persona responsable de la construcción, quien lo detecte debe dar aviso al comercializador u OR del área correspondiente, para que tome las medidas tendientes a evitar la ocurrencia de un accidente o incidente de origen eléctrico.*

*Parágrafo 2. El incumplimiento del presente reglamento en la instalación eléctrica, que conlleve a un peligro inminente será causal de la suspensión del servicio por parte del Operador de Red.*

#### **10.4 ESPACIOS PARA MONTAJE, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA**

Los lugares donde se construya cualquier instalación eléctrica deben contar con los espacios suficientes para el acceso, montaje, operación y mantenimiento de los equipos (espacios de trabajo) y demás componentes, de tal manera que se garantice la seguridad tanto de las personas como de la misma instalación y los bienes aledaños,

En cumplimiento de lo dispuesto en la Ley 388 de 1997, en los planes de ordenamiento territorial se debe disponer de los espacios para la construcción, operación y mantenimiento de las redes de distribución y las líneas y subestaciones de transmisión, asegurando los anchos de servidumbre y distancias mínimas de seguridad requeridas para el nivel de tensión y configuración de la instalación; las autoridades de planeación municipal y curadurías deben tener especial atención en el momento de otorgar licencias o permisos de construcción para que se garantice el cumplimiento de las servidumbres y las distancias mínimas de seguridad a elementos energizados de las líneas, subestaciones y redes eléctricas.

Desde el diseño urbanístico, arquitectónico y estructural, se deben prever los espacios para la ubicación de los elementos y equipos de la instalación eléctrica, tales como subestación, plantas de respaldo, estructuras de soporte, cárcamos o ductos de conductores, cuartos eléctricos y tableros de potencia, medición, protección o control.

Se debe tener especial atención en las afectaciones que se puedan presentar en los espacios e infraestructura compartida con otros servicios, el OR debe establecer en su normatividad técnica las distancias y condiciones mínimas para la instalación de los demás elementos y en los contratos que autoricen compartir la infraestructura se debe hacer mención del cumplimiento de tal normatividad y demás requisitos de seguridad y salud en el trabajo; así como las responsabilidades asociadas por el uso compartido de la infraestructura.

#### **10.2.2 RESPONSABILIDAD DE LOS CONSTRUCTORES (CONT.)**

El espacio de trabajo y las salidas de las puertas de cuartos eléctricos y bóvedas debe permanecer libre de otros equipos y obstáculos.

Independiente de la bóveda que aloje transformadores, cuando existan equipos en media tensión localizados en el interior de copropiedades residenciales o comerciales, con partes energizadas expuestas, se deben proteger con cerramientos que impidan el acercamiento a las mismas con elementos como varillas, tubos, alambres; tales cerramientos deben ser construidos en materiales resistentes al fuego mínimo de una hora como ladrillo o concreto. No se permite malla eslabonada, paneles de yeso o fibrocemento.

En los lugares donde existan áreas comunes o de copropiedad se debe dar cumplimiento la Ley 675 de 2001 en especial al Artículo 3º, que diferencia entre los bienes comunes y los bienes privados. Se entienden por bienes comunes, “las partes del edificio, o conjunto sometido al régimen de propiedad horizontal pertenecientes en proindiviso a todos los propietarios de bienes privados, que por su naturaleza o destinación permiten o facilitan la existencia, estabilidad, funcionamiento, conservación, seguridad, uso, goce o explotación de los bienes de dominio particular”. Dentro de los bienes comunes, se señalan también los bienes comunes esenciales, los cuales son aquellos “indispensables para la existencia, estabilidad, conservación y seguridad del edificio o conjunto, así como los imprescindibles para el uso y disfrute de los bienes de dominio particular”. Se reputan bienes comunes esenciales, entre otros, las instalaciones de servicios públicos básicos y las instalaciones generales de servicios públicos, incluyendo las acometidas, cableado, armarios, subestaciones, bandejas, etc.

#### **10.5 PROTECCIONES DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

Para la mayor seguridad y confiabilidad de las instalaciones y minimizar los efectos adversos de las interrupciones, toda instalación eléctrica debe disponer de los elementos de protección y cuando estos actúen en cascada deben ser debidamente coordinados. Las protecciones deben proteger y aislar la zona fallada y deben coordinarse de tal forma que la actuación de una de ellas no complique, aumente o extienda dicha zona o los efectos de la falla.

Se debe tener en cuenta los siguientes principios:

- Sensibilidad. Los dispositivos deben operar con señales relativamente pequeñas.
- Selectividad. La protección más cercana al punto de falla es la primera que debe actuar, garantizando con esto la continuidad del servicio al resto de la instalación.

- Velocidad. la rapidez con que se despeje la sobre corriente o falla, depende de la magnitud de la sobre corriente y de la coordinación con las demás protecciones.
- Confiabilidad. Las protecciones seleccionadas deben ser de alta calidad en su proceso de manufactura y debe evitarse el uso de protecciones reutilizadas que no se tenga pleno conocimiento de su historial.

De la instalación y coordinación de protecciones se debe dejar evidencias que podrán ser consultadas por las autoridades de control y vigilancia. Los operadores de centrales de generación, líneas de transmisión, subestaciones de uso general y redes de distribución, deben establecer planes de mantenimiento, verificación de la funcionalidad y coordinación y reposición de las protecciones: para verificar la funcionalidad se puede recurrir a pruebas físicas, o a simulaciones si se cuenta con una hoja de vida de la protección.

### 10.7 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS

El tenedor de una instalación eléctrica, que por deficiencias de mantenimiento pueda afectar a terceros, debe establecer y ejecutar planes de mantenimiento que garanticen la seguridad en la instalación. Para instalaciones o equipos de mayor complejidad, se deben elaborar y aplicar protocolos de mantenimiento que sean eficientes y seguros, tanto para el personal que realiza el mantenimiento como para terceras personas, la misma instalación y demás bienes de su entorno.

El propietario o tenedor de cualquier instalación eléctrica, será responsable de operarla y mantenerla en condiciones seguras, por lo tanto, debe garantizar que se cumplan las disposiciones del presente reglamento y demás normas legales o reglamentarias que le apliquen.

Si la instalación eléctrica presenta alto riesgo causado por personas o situaciones ajenas a la operación o al mantenimiento, el tenedor o propietario debe prevenir a los posibles afectados sobre el riesgo a que han sido expuestos y debe tomar las medidas necesarias para eliminar dicha condición.

Quienes suministren el fluido eléctrico, una vez enterados del peligro inminente, deben tomar las medidas pertinentes para evitar que el riesgo se convierta en accidente o incidente, incluyendo si es del caso, la desenergización de la instalación y se deben dejar registros del hecho.

Si como consecuencia de la no aplicación de los correctivos ocurre un accidente, la persona o personas que generaron la causa de la inseguridad y quienes a sabiendas del riesgo no tomaron las medidas necesarias, deben ser investigadas por los entes competentes y deben responder por las implicaciones derivadas del hecho.

### 10.8 NORMATIVIDAD AMBIENTAL, DE PLANEACIÓN LOCAL O REGIONAL Y PÉRDIDAS TÉCNICAS

Toda instalación eléctrica **debe cumplir las normas que le apliquen, establecidas por las autoridades ambientales y por los entes de planeación de las entidades territoriales**, en este sentido las obras deben atender los planes o esquemas de ordenamiento tanto territorial como ambiental.

En el diseño de las instalaciones eléctricas, excepto en las residenciales de menos de 15 kVA de carga instalable, se debe hacer análisis del conductor más económico en acometida y alimentadores, considerando el valor de las pérdidas de energía en su vida útil, teniendo en cuenta las cargas estimadas, los tiempos de ocurrencia, las pérdidas adicionales por armónicos y los costos de energía proyectando el valor actual en la vida útil de la instalación.

### 13.4 DISTANCIAS MÍNIMAS PARA TRABAJOS EN PARTES ENERGIZADAS O CERCA DE ELLAS

Cuando se va a trabajar en partes energizadas o cerca de ellas, el trabajador puede estar expuesto a contactos directos, inducción o arcos eléctricos. Por tanto, la instalación se debe poner en condición eléctricamente segura antes de iniciar la labor.

El trabajo en tensión debe ser permitido cuando se demuestre que al desenergizar se generan riesgos adicionales. Se exceptúa de este requisito los trabajos en líneas de transmisión y en redes de distribución, siempre y cuando se disponga de los equipos y protocolos adecuados, y se cumplan los requisitos señalados en el presente reglamento.

Según estadísticas a nivel mundial, se han incrementado los accidentes por arcos eléctricos, originados en la apertura inadecuada de interruptores o seccionadores y condiciones de falla, tales como cortocircuitos, fallas a tierra, contacto de herramientas con partes energizadas, choque térmico, acumulación de polvos conductivos, pérdidas de aislamiento, depósitos de material conductor o ionización del medio.

El arco presenta radiación térmica que genera temperaturas hasta de 20000 °C que hacen que los materiales involucrados presenten desintegración y cambios de estado, lo cual lleva a la formación y desprendimiento de gases de metales y de material no metálico, con altos contenidos de sustancias altamente tóxicas. Esta elevada temperatura conlleva a un aumento súbito de presión hasta de 30 t/m<sup>2</sup> capaz de lanzar partículas sólidas (metralla), con velocidades comparables a las de los proyectiles y niveles de ruido por encima de 120 dB. Igualmente, las altas temperaturas producen radiación de diversas longitudes de onda que pueden llegar a valores cercanos a los de rayos X, capaces de producir lesiones al cuerpo humano.

## SEÑALIZACIÓN DONDE SE TENGAN TABLEROS O CELDAS DONDE LA ENERGÍA INCIDENTE SEA IGUAL O SUPERIOR A 5 J/CM<sup>2</sup> (1,2 CAL/CM<sup>2</sup>)

Para facilitar al personal identificar el máximo acercamiento permitido, la frontera de aproximación limitada debe ser señalizada con franja amarilla-negra y la de aproximación restringida con una franja blanca-negra, ya sea en pintura reflectiva u otra señal que brinde un cerramiento temporal, tal como lo señala la Figura 13.4.

Tensión nominal del sistema (fase – fase)	Frontera de aproximación Limitada [m]		Frontera de aproximación Restringida(m) Incluye movimientos involuntarios
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta	
50 V – 300 V	3,0	1,0	Evitar contacto
301 V – 750 V	3,0	1,0	0,30
751 V – 15 kV	3,0	1,5	0,7
15,1 kV – 36 kV	3,0	1,8	0,8
36,1 kV – 46 kV	3,0	2,5	0,8
46,1 kV - 72,5 kV	3,0	2,5	1,0
72,6 kV – 121 kV	3,3	2,5	1,0
138 kV - 145 kV	3,4	3,0	1,2
161 kV - 169 kV	3,6	3,6	1,3
230 kV - 242 kV	4,0	4,0	1,7
345 kV - 362 kV	4,7	4,7	2,8
500 kV – 550 kV	5,8	5,8	3,6

El estudio o análisis de arco debe revisarse en periodos no mayores a cinco años o cuando se realicen modificaciones mayores en la instalación.

En tableros y celdas donde la energía incidente sea igual o superior a 5 J/cm<sup>2</sup> (1,2 cal/cm<sup>2</sup>), se debe fijar un aviso que indique la frontera de arco eléctrico, los datos sobre este riesgo y la leyenda: “riesgo de arco eléctrico”.

## ARTÍCULO 14°. CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Todo diseño de **línea de transmisión y de subestación** de tensión mayor o igual a 110 kV, debe incluir cálculos de campo eléctrico y campo magnético, y verificar que en el límite de la zona de servidumbre no se sobrepasan los valores máximos admisibles de la Tabla 14.1 a un metro sobre el nivel del suelo.

Además, determinar y señalar gráficamente en 2D la zona donde la densidad de flujo magnético supere 200  $\mu$ T. Si en la zona aledaña a la servidumbre, existen edificaciones con presencia permanente de personas, se deben calcular los campos eléctrico y magnético en dichos puntos, tales como fachadas, balcones, azoteas, ventanas y pisos más c

Todo diseño de **instalaciones eléctricas para edificaciones aledañas a una zona de servidumbre** de líneas de transmisión o a una subestación de tensión igual o superior a 110 kV, debe incluir memorias de cálculo de campos eléctrico y magnético para cada piso, ventana, balcón y fachada más cercana a la línea o subestación, donde puedan estar ubicadas las personas (lugar de trabajo o domicilio).

Todo **proyecto cuya capacidad nominal del circuito, de la acometida o del ramal sea de 1000 A** o mayor, debe incluir cálculos de campo eléctrico y campo magnético, y verificar que no se sobrepasan los valores máximos admisibles de la Tabla 14.1 a un metro sobre el nivel del suelo.

### 17.1 ILUMINACIÓN DE SEGURIDAD

En las edificaciones que le aplique se debe cumplir la sección K.3.9 ILUMINACIÓN DE LOS MEDIOS DE EVACUACIÓN del Reglamento Colombiano de Construcción Cismo Resistente NSR-100.

En los lugares en los que estén situados los equipos de emergencia como extintores y camillas, en las instalaciones de protección contra incendios de utilización manual y en los tableros de distribución del alumbrado, debe asegurarse que cuenten con iluminación de emergencia.

Las rutas de evacuación deben estar claramente visibles, señalizadas e iluminadas con un sistema autónomo con batería, garantizando los parámetros fotométricos que se exijan en el RETILAP, aún en condiciones de humo o plena oscuridad. La ruta de evacuación debe estar previamente definida para que el diseñador de iluminación pueda garantizar los parámetros fotométricos. La iluminación de los medios de evacuación debe ser continua durante todo el tiempo en que se requiera que las vías de escape estén disponibles para ser utilizadas

Los medios de evacuación de las edificaciones que el Título K del Código Sismo Resistente - NSR 10 señale, deben estar provistos de las instalaciones para iluminación de emergencia. El sistema se debe alimentar con dos fuentes independientes de suministro, de tal forma que se garantice el funcionamiento continuo, en caso de un corte en la energía eléctrica. Como referente normativo se debe tomar el título K de **NSR 10** y secciones 4.6, 4.7 y 4.8 de la **NTC 1700** Higiene y seguridad.

## **ART 20 REQUISITOS DE PRODUCTOS**

Los elementos de amarre o sujeción, deben cumplir los requerimientos mecánicos y de producto, señalados en normas tales como **IEC 62275**, **UL 62275** o norma equivalente, de tal forma que se asegure la sujeción durante la vida útil del producto, y en el evento que se utilicen materiales plásticos para exterior, estos deben contar con protección UV.

El fabricante o proveedor debe señalar el alcance de las aplicaciones o las limitaciones de uso del producto, de lo contrario él será responsable por su uso indebido. Los efectos por los usos contrarios a los señalados por el proveedor serán responsabilidad del instalador o usuario del producto.

No se debe utilizar la sigla RETIE en productos que no estén certificados bajo el presente reglamento, el incumplimiento de este requisito se podrá considerar un engaño que induce a error al consumidor y debe ser sancionado por la SIC.

El fabricante o importador directo debe estar registrado en el Registro de Productores e Importadores y Prestadores de Servicios, sujetos al cumplimiento de reglamentos técnicos de la SIC.

## **ARTÍCULO 18°. TRABAJOS EN REDES DESENERGIZADAS**

### **18.1 VERIFICACIÓN EN EL LUGAR DE TRABAJO**

El jefe de grupo debe realizar una inspección detenida con base en lo siguiente: A-J

A) Que se tenga el conocimiento y se apliquen correctamente los protocolos establecidos por la empresa para realizar ese tipo de trabajo.

### **18.3 REGLAS DE ORO**

(se deben probar la ausencia de tensión en todos y cada uno de los conductores que estén en el entorno del lugar del trabajo), el hecho que una o dos fases del circuito no tengan tensión no descarta que la tercera este energizada.

### **18.4 MANIOBRAS**

Antes de energizar, se debe verificar que se hayan terminado los trabajos, retirado los elementos y equipos no requeridos, y ejecutado las pruebas de rigor señaladas en los protocolos establecidos para ese tipo de trabajos.

### **19.3 PROCEDIMIENTOS DE EJECUCIÓN de trabajos en tensión**

Las empresas que realicen trabajos en tensión o con redes energizadas, deben disponer procedimientos claros, precisos y seguros para realizarlos, para lo cual deben atender los siguientes lineamientos y asegurar su implementación y estricto cumplimiento

## **CONDUCTORES ELÉCTRICOS**

Los aislamientos de los conductores deben ser retardantes o no propagadores de llama (auto extinguidos), retardantes a un incendio, o resistentes al fuego, según su aplicación. Adicionalmente, para determinados casos deben ser de bajo contenido de halógenos, baja emisión humos tóxicos y baja opacidad (densidad). Para propagación de la llama y resistencia al fuego se deben aplicar el ensayo vertical u horizontal según requisitos de instalación y norma de fabricación del cable. El productor debe informar si los materiales del aislamiento son autoextinguidos, retardantes a un incendio o resistentes al fuego

Los conductores utilizados en bandejas portacables deben ser probados bajo alguna de las siguientes normas: **IEC 60332-3**, **UL 1685**, **UL 2556**, **NTC 5786**.

En edificaciones que alberguen más de 100 personas, destinadas a vivienda u oficinas, de origen eléctrico, el diseñador de la instalación hacer un análisis de riesgo donde evalúe la posibilidad de presencia simultánea de humos tóxicos por incendio de los aislamientos de los conductores eléctricos y alta concentración de personas y de acuerdo a ese análisis identificar y señalar el tipo de recubrimiento del conductor que se debe utilizar para evitar que en determinado lugar, se tenga originados y simultáneamente concentración de personas que en.

En el análisis se debe tener en cuenta las rutas de los flujos de los gases producidos por el incendio de los conductores, las rutas de evacuación de las personas y la ventilación del lugar.

## 24.2 SUBESTACIONES DE MEDIA TENSIÓN TIPO INTERIOR O EN EDIFICACIONES

- En toda edificación que requiera subestación, debe destinársele el espacio con las dimensiones apropiadas de acuerdo al tipo de subestación y los requisitos de este reglamento.
- En las subestaciones dentro de edificios, el local debe estar ubicado en un sitio de fácil acceso desde el exterior, localizado en áreas comunes, con medios apropiados que faciliten la entrada y salida de los equipos, para permitir a los profesionales competentes las labores de mantenimiento, revisión e inspección.
- En subestaciones y cuartos eléctricos debe asegurarse que una persona no autorizada no pueda acceder a las partes energizadas del sistema, ni tocándolas de manera directa ni introduciendo objetos que lo puedan poner en contacto con un elemento energizado.

## SUBESTACIONES DE MEDIA TENSIÓN TIPO INTERIOR O EN EDIFICACIONES

Toda subestación alojada en cuartos debe disponer del número y forma apropiada de salidas de emergencia, para evitar que un operador quede atrapado en caso de un accidente.

[Toda subestación eléctrica alojada en cuartos inundables y sótanos, debe contar con los elementos de drenaje o bombeo que impida la inundación; en caso que esta condición no se pueda garantizar, el equipo debe ser tipo sumergible.

Los equipos eléctricos de la subestación o de cuartos eléctricos deben estar separados de la planta de emergencia por un muro o barrera que impida el acercamiento de personas no calificadas a elementos energizados.

Se debe asegurar la no propagación del fuego al resto de la edificación para lo cual se requiere el uso de bóvedas, cuartos eléctricos, puertas y sellos cortafuego.

## 24.5 CERTIFICACIÓN SUBESTACIONES PARA INSTALACIONES DE USO FINAL

Las subestaciones que alimenten exclusivamente instalaciones de uso final, en edificaciones, conjuntos habitacionales o parcelaciones, deben demostrar la conformidad con el presente reglamento en conjunto con la instalación que alimenta y la acometida hasta la frontera donde termine la red de uso general.

En los proyectos de construcción con varias etapas, la instalación que alimente una edificación en construcción tendrá el carácter de instalación provisional y los apartamentos o comercios individuales no deben tener energización definitiva hasta contar con la certificación plena de cada una de las instalaciones correspondientes a cada cuenta. La SIC podrá sancionar el incumplimiento de este requisito por parte del constructor.

## INSTALCIÓN DE TUBERÍAS.

- Tuberías no metálicas livianas (Tipo A) no se deben instalar en cielos falsos ni expuestas, excepto para alguna de estas condiciones:
  - Si están embebidas o revestidas en toda su superficie en concreto o en materiales resistentes al fuego mínimo de 15 minutos.
  - Si están soportadas en una superficie rígida que no permita su deflexión y la placa del cielo falso o pared resista al fuego mínimo 15 minutos

En construcciones con tuberías embebidas en concreto, los instaladores deben tener especial cuidado en no deformarlas ni permitir la entrada de materiales que les ocasionen taponamientos. Previo al vaciado del concreto se les debe colocar en los extremos tapones provisionales. Para tuberías no metálicas se recomienda calentar y comprimir las puntas expuestas para asegurar que no sean removidos los tapones hasta cuando se instalen las cajas de conexión o paso.

Para demostrar el cumplimiento de literales anteriores, el constructor responsable de la instalación eléctrica deberá dejar registro fotográfico y muestras de los diferentes tubos conduit instalados en la obra que al momento de la inspección sería difícil verificar por no tenerlos a la vista.

## 27.6.4 CANALIZACIONES ELÉCTRICAS PREFABRICADAS O ELECTRODUCTOS

Con el fin de facilitar la conexión y posteriores labores de mantenimiento, evitar la deformación y aflojamiento de las uniones, ante movimientos sísmicos, asentamiento de la estructura de la edificación, desajustes de tornillos y movimientos dinámicos asociados a fallas y corto circuitos y mitigar el "Efecto Creep", se debe facilitar la flexibilidad del sistema de electroductos, en las uniones de barras, las conexiones entre tramos alimentadores, curvas, T, cruces y otros accesorios

de los electroductos, debe realizarse mediante uniones monobloques como las uniones tipo “Joint” y usar arandelas tipo Belleville DIN 6796 o equivalente.

Las salidas de derivación y cajas de derivación deben cumplir mínimo con lo siguiente:

- La caja de derivación debe garantizar que se pueda seccionar manualmente la protección eléctrica antes de realizar la apertura de la puerta,
- La continuidad del conductor de protección entre la canalización y la derivación debe establecerse antes que la conexión de los conductores activos
- Los interruptores utilizados en las cajas de derivación deben de minimizar los impactos de los efectos de las corrientes de cortocircuito en el electroducto.

### **20.3.1.2 REQUISITOS DE INSTALACIÓN DE BANDEJAS PORTACABLES**

No se permite el cableado sobre bandejas en instalaciones residenciales y demás excepciones definidas en la NTC 2050. El uso de bandejas portacables en infraestructura común de edificaciones que alojen conductores que sirven a cuentas múltiples de oficinas o unidades de comercio, se permite siempre y cuando se cumplen los siguientes requisitos:

- Que los equipos de medida estén agrupados en tableros de medidores.
- Que las bandejas se instalan en espacios o áreas comunes a la copropiedad.
- Que los conductores soportados en la bandeja aguas abajo de la medición, están agrupados e identificados por cada cuenta.
- Que cada cuenta esté debidamente identificada, con leyendas que se repitan en tramos no mayores a 10 m.
- Que en el reglamento de copropiedad, las bandejas portacables que sirven varias cuentas y los cables allí incorporados estén definidos como bienes comunes de la copropiedad y se establezca que la intervención, manipulación o modificaciones de las bandejas o de los conductores soportados en ellas, sean ejecutadas por personas competentes, con la autorización previa escrita y bajo control de la administración de los bienes comunes de la copropiedad y la administración de dichos bienes ejerza el control y cuidado para asegurar un buen funcionamiento y operación, tal como lo señala la Ley 675 sobre propiedad horizontal.

### **CUARTOS ELÉCTRICOS Y PUERTAS CORTAFUEGO SELLOS, DÁMPERES, BÓVEDAS**

Los cuartos que alojen equipos eléctricos, deben cumplir los requisitos de distancias mínimas de seguridad y ventilación, y no deben albergar equipos de medición o control de instalaciones de gas, combustible, de agua u otros líquidos. Si el cuarto eléctrico está destinado a equipos que energizan, controlan o protegen equipos hidráulicos, se debe contar con barreras de separación que impidan que las partes energizadas entren en contacto con el agua o las personas al realizar la operación y mantenimiento del sistema eléctrico lo hagan desde espacios mojados.

Los cuartos eléctricos cerrados y bóvedas de transformadores donde puedan quedar personas atrapadas, deben contar con puertas que abran hacia afuera y estén dotadas de cerradura antipánico.

A las puertas se les debe probar su resistencia al fuego, para lo cual se debe colocar la muestra como puerta de un horno o cámara de prueba que permita una curva de temperatura interna de los siguientes valores: a 5 minutos 535 °C, a 10 minutos 678 °C, a 30 minutos 840 °C, a 60 minutos 925 °C, a 90 minutos 985 °C, a 120 minutos 1000 °C y a 180 minutos 1050 °C con tolerancias de más o menos 10 °C, o los valores establecidos en las normas UNE 1634-1 o UL 10 B.

Las pruebas se deben hacer conforme a la norma técnica UL 10 o norma equivalente, o utilizando el método especificado en la norma EN 1363

### **20.6.2.3 REQUISITOS DE INSTALACIÓN DE TUBERÍAS**

Tuberías no metálicas livianas (Tipo A) no se deben instalar en cielos falsos ni expuestas, excepto para alguna de estas condiciones:

- Si están embebidas o revestidas en toda su superficie en concreto o en materiales resistentes al fuego mínimo de 15 minutos.
- Si están soportadas en una superficie rígida que no permita su deflexión y la placa del cielo falso o pared resista al fuego mínimo 15 minutos

Para demostrar el cumplimiento del literal c (espesor mínimo) el constructor responsable de la instalación eléctrica deberá dejar registro fotográfico y muestras de los diferentes tubos conduit instalados en la obra que al momento de la inspección sería difícil verificar por no tenerlos a la vista.

### **REDES SUBTERRANEAS**

Los cables deben ser tendidos y halados de acuerdo con las tensiones de halada dinámica máxima recomendada por los fabricantes y los radios de curvatura, los coeficientes de fricción, el tipo de chaqueta y forro metálico.

Las tapas deben tener mecanismos de sujeción a las cámaras para evitar el ingreso de personas no autorizadas, evitar accidentes peatonales y vehiculares. Cuando exista la probabilidad del robo de tapas por la estructura metálica esta debe ser material de polímero concreto o de polímero termoestable reforzada en fibra de vidrio

Los soportes, grapas, amarres bandejas metálicos y/o no metálicos o mixta deben cumplir con las fuerzas electrodinámicas producidas por el cortocircuito, cargas mecánicas y corrosión tal como lo estipula la **IEC 61914** o norma equiva

Las cámaras y tapas deben tener facilidad para que el operario entre y salga de ella sin dificultad, especialmente cuando exista un accidente de personas. Las dimensiones, espacio para trabajo del operario, ventilación, drenaje, protección mecánica y demás consideraciones de seguridad estructural ante el paso de vehículos en vías de alto tráfico vehicular pesado deben tenerse en cuenta los requisitos del numeral 323 de la **IEEE C2**, las normas de cajas y cámaras prefabricadas y los requisitos del ministerio de transporte.

Si las cajas y cámaras son concreto con marco y refuerzo metálico estas deben ponerse a tierra o equipotencializar cuando estén cerca de escuelas y lugares con alta presencia de menores que tengan contacto.

Los bancos de ductos, excavaciones y rellenos deben cumplir con la carga estructural de acuerdo con, las normas de instalación de ductos, tales como de la **IEEE C2** en los numerales 321 y 322 y los requisitos ambientales y estructurales que determina las normas de planeación urbana tanto si es en zona verde, peatonal y vía pública.

## **25.8 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

El Operador de Red o quien tenga el manejo de la red debe asegurar un mantenimiento adecuado de sus redes y subestaciones de distribución que minimice o elimine los riesgos, tanto de origen eléctrico como mecánico asociados a la infraestructura de distribución, para lo cual debe contar con un plan de mantenimiento. Así mismo debe dejar evidencias, mediante registros, de las actividades desarrolladas en la ejecución del plan de mantenimiento.

En el mantenimiento se debe asegurar el cumplimiento, entre otros, de los siguientes aspectos: Distancias mínimas de seguridad a partes energizadas, uso y dominio de la servidumbre, estabilidad mecánica de la red, control de fugas de corriente por deficiencias de los aisladores, operatividad de las protecciones tanto de sobrecorriente como de sobretensión, funcionamiento del sistema de puesta a tierra, y en general el control de cualquier factor de riesgo asociado al sistema de distribución.

## **AR 27º. REQUISITOS GENERALES PARA LAS INSTALACIONES DE USO FINAL**

No se debe suministrar energía a un inmueble directamente desde otro inmueble. Cada inmueble debe contar con su acometida y sus elementos de protección.

Toda salida de tomacorriente, localizada a menos de 1,8 m en zona húmeda debe tener protección mediante interruptor de circuito por falla a tierra.

La toma GFCI para protección en zonas húmedas, se podrán remplazar por un interruptor con protección diferencial, localizado en el tablero general, centros de carga o tableros de distribución.

En unidades de vivienda con capacidad instalable menor o igual a 5 kW, se permite que un tomacorriente con protección de falla a tierra, en un solo circuito proteja en cascada los demás tomacorrientes para pequeños artefactos de cocina y los de la iluminación y fuerza del baño. Siempre y cuando, en el mesón de la cocina no se instale más de tres salidas de tomacorriente y en el baño no más de una salida de tomacorriente, las cuales pueden ser dobles o sencillas.

## **INSTALACIONES PROVISIONALES**

En las instalaciones provisionales se deben cumplir mínimo los siguientes requisitos:

- Todo circuito debe tener una protección de sobrecorriente, con el encerramiento apropiado contra contacto directo o indirecto de personas.
- No se permite la instalación directa en el piso de cables que puedan ser pisados por las personas o vehículos al menos que estén certificados para esta aplicación.
- No se permite el uso de tomacorrientes sin su encerramiento apropiado.
- Los conductores móviles deben ser tipo cable y con revestimiento para dicho uso.

Los responsables del control de salud ocupacional, deben verificar que se cumplan los protocolos para instalaciones provisionales.

En las construcciones de edificaciones realizadas por etapas, a cada una de estas se le debe considerar instalación provisional y en ningún caso se debe suministrar el servicio de energía a una etapa posterior desde la instalación de una energizada definitivamente, sin antes haber asignado a persona competente responsable del protocolo de manejo de dicha instalación provisional e informado al Operador de Red de esta situación. Terminada la construcción de cada etapa

se podrá dar servicio definitivo, si estas instalaciones disponen de las certificaciones de conformidad con el presente reglamento para cada una de las cuentas.

**Parágrafo.** *Se debe diferenciar instalación provisional, del servicio provisional, este se puede prestar a instalaciones definitivas, las cuales deben demostrar el cumplimiento del RETIE.*

## **ARTÍCULO 34°. DEMOSTRACIÓN DE CONFORMIDAD DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

### **34.1 ASPECTOS GENERALES DE LA CERTIFICACIÓN DE LA INSTALACIÓN**

Toda instalación eléctrica construida con posterioridad al 1° de mayo de 2005, ampliación o remodelación, debe contar con el *Certificado de Conformidad* con el presente reglamento.

Se acepta como certificado de conformidad con RETIE la declaración del proveedor o productor, que para el caso será la declaración de cumplimiento suscrita por la persona competente responsable de la construcción directa o de la supervisión de la construcción de la instalación eléctrica.

Con el fin de garantizar una certificación expedida bajo principios de idoneidad, independencia e imparcialidad a las instalaciones que implican mayor riesgo, la declaración de cumplimiento debe ser validada mediante un Dictamen de Inspección, expedido por un organismo de inspección acreditado por el ONAC, en este caso, se considera que la certificación es plena.

### **34.3.2 INSTALACIONES QUE REQUIEREN INSPECCIÓN**

**Las instalaciones eléctricas especiales:** instituciones de asistencia médica, instalaciones en ambientes clasificados como peligrosos (hangares para aeronaves, gasolineras y estaciones de servicio, almacenamientos de combustibles, procesos de pinturas; industrias harineras, silos de granos, edificaciones donde se acumula polvo con agua o tengan atmosferas corrosivas); sitios de reunión pública o alta concentración de personas; lugares donde se atiende al público; escuelas, colegios y demás centros de enseñanza en áreas urbanas; instalaciones de vivienda, comercio o lugares recreativos montados sobre vehículos móviles; casas flotantes; instalaciones de equipos especiales (ascensores, grúas, montacargas, escaleras, rampas y pasillos electromecánicos para el transporte de personas), hornos o equipos de calentamiento por inducción, celdas electrolíticas, y de galvanoplastia, equipos y maquinaria de riego; instalaciones en piscinas, yacuis o fuentes de instalaciones similares; instalaciones de sistemas de bombas contra incendio, sistemas de emergencia o suplencia.

Las instalaciones eléctricas residenciales multifamiliares o comerciales que hagan parte de un mismo proyecto de construcción, autorizado bajo una misma licencia o permiso de: construcción, urbanismo o parcelación, o pertenezcan a la misma edificación, donde se involucren cinco o más cuentas de energía, así su capacidad instalable individual sea inferior a los 10 kVA o la construcción se haga en distintas épocas. En todo caso, para instalaciones ya construidas, al momento de construir la instalación de la quinta cuenta, esta última debe certificarse plenamente y tanto el responsable de la construcción de la nueva instalación como el organismo de inspección deben verificar que con esta instalación adicional no se afecta la seguridad en las demás instalaciones, y que ninguna de estas presenta alto riesgo o peligro inminente.

### **INSTALACIONES QUE REQUIEREN INSPECCIÓN**

Instalaciones residenciales, oficiales o comerciales de capacidad instalable individual igual o superior a 10 kVA en zonas urbanas o 15 kVA en zonas rurales ubicadas a más de 5 km de la cabecera municipal conectadas al SNT.

Instalaciones industriales de capacidad instalable igual o superior a 20 kVA.

Instalaciones, residenciales, comerciales y oficiales de capacidad instalable igual o superior a 15 kVA en zonas no interconectadas al SNT.

Instalaciones en minas, túneles o cavernas.

Instalaciones de uso final que contengan circuitos ramales de calibres menores a 13,3 mm<sup>2</sup>, construidas con conductores de aluminio, cualquiera que sea su potencia instalable.

Áreas comunes en edificaciones con cinco o más cuentas de energía.

Construcciones nuevas o remodelaciones de acometidas que involucren subestación, que alimente edificaciones, independiente de quien sea el propietario de la INFRAESTRUCTURA.

### **INSTALACIONES QUE REQUIEREN INSPECCIÓN**

Equipos paquetizados o prearmados que constituyen sistemas funcionales asimilables a una instalación para uso final o una subestación,

Circuitos de distribución nuevos o ramales de derivación nuevos, en redes de uso general, cuando lo nuevo supere 5 km, sumada tanto la red primaria como la secundaria o la potencia instalada nueva, en transformación sea igual o superior a 300 kVA.

Si la red o subestación atiende edificaciones o parcelaciones objeto de una misma licencia o permiso de construcción, las instalaciones que se deriven de la red de servicio general se deben inspeccionar asociadas a las instalaciones de uso final,

Líneas de transmisión por encima de 57,5 kV, cualquiera que sea su potencia y longitud.

Subestaciones de distribución y subestaciones asociadas a líneas de transmisión o centrales de generación para uso general de capacidad mayor o igual a 300 kVA.

Centrales de Generación de capacidad superior a 500 kVA.

Sistemas de generación a pequeña escala o generación distribuida que se conecten a la red de uso

#### **34.3.2.2 AMPLIACIONES Y REMODELACIONES**

En instalaciones residenciales: cuando la ampliación supere 10 kVA, de potencia instalable o se remodele más del 50% de los dispositivos o conductores en una instalación que la parte remodelada superior 10 kVA de capacidad instalable, o se les adicione equipos o instalaciones especiales.

Igualmente, edificaciones con capacidad de transformación mayor o igual a 100 kVA que requieran aumentar la capacidad de transformación en más del 30% deben certificar plenamente la acometida, la parte ampliada de la subestación y los alimentadores que demandarán ese aumento de carga, independiente de la fecha en que fueron instalados.

En instalaciones comerciales: en instalaciones con potencia instalada menor a 100 kVA cuando la ampliación o la parte remodelada supera 10 kVA. Para instalaciones que superen los 100 kVA de potencia instalada, cuando se remodela o se amplía más del 30% de la instalación o la capacidad de transformación, o cuando se le adicione o remodele con instalaciones o equipos especiales

En instalaciones industriales de potencia instalada menor o igual a 50 kVA, cuando la remodelación o ampliación supere 20 kVA. En instalaciones industriales de capacidad instalada de más de 50 kVA, cuando la ampliación o remodelación supere el 30% de la capacidad instalada. En cualquier instalación industrial de capacidad instalada de más de 20 kVA, cuando se cambie más del 50% de los aparatos o más del 50% del alambrado.

#### **AMPLIACIONES Y REMODELACIONES**

En instalaciones en ambientes clasificados como peligrosos, en instalaciones hospitalarias y en instalaciones fijas en minas, túneles o cavernas, cuando se hace cualquier tipo de ampliación o remodelación en más del 5%. En todo caso la persona responsable de cualquier reposición de equipo, remodelación o ampliación de la instalación debe ser competente para este tipo de instalaciones.

En redes de distribución de uso general, cuando la ampliación supere el 30% de la capacidad instalada en el circuito intervenido o el 30% de su longitud y con la ampliación, ampliaciones o remodelaciones efectuadas en el mismo circuito durante un año, las partes remodeladas o ampliadas superen 300 kVA y 5 km de red.

En el evento que la red de distribución sea de uso exclusivo de una edificación debe dársele el tratamiento de instalación de uso final, independiente de quien sea el propietario. El circuito intervenido se entenderá el controlado por la misma protección en el nivel de tensión donde se ejecuten los trabajos.

En una planta de generación cuando la ampliación supere el 30% de la capacidad instalada y se deba al montaje de nuevos equipos eléctricos en la misma casa de máquinas.

En una subestación cuando la ampliación supere el 30% del costo inicial reconocido por la CREG para cada unidad constructiva o el 30% de la capacidad instalada.

En una línea de transmisión cuando la ampliación aumente su tensión nominal de operación o su capacidad instalada por la adición de número de conductores o mayor calibre de estos.

En una subestación de uso general que sirva a usuarios de distintas edificaciones, cuando la ampliación supere el 30% del costo reconocido por la CREG para cada unidad constructiva o el 30% de la capacidad instalada, y la ampliación o remodelación supere los 300 kVA

#### **34.3.2.3 CRITERIOS PARA DEFINIR LOS PORCENTAJES DE AMPLIACIONES O REMODELACIONES**

Para instalaciones ampliadas o remodeladas, el porcentaje se determina teniendo en cuenta los siguientes criterios:

Para instalaciones de uso final se toma el número de las salidas o puntos de conexión en cada nivel de tensión.

Para instalaciones de distribución de propiedad de los Operadores de Red, el porcentaje estará referido al inventario de todas las unidades constructivas del mismo tipo, existentes en el circuito o a los componentes de la unidad constructiva del circuito donde se realicen la remodelación.

En redes de baja tensión el porcentaje será referido a la longitud total de la red asociada al mismo transformador.

### CRITERIOS PARA DEFINIR LOS PORCENTAJES DE AMPLIACIONES O REMODELACIONES

Remodelación de subestaciones. En subestaciones de transformación no asociadas a la instalación de uso final, el porcentaje estará referido al número de elementos de la unidad constructiva o conjunto de unidades constructivas donde se realice la remodelación. La certificación plena se aplica a la unidad o unidades constructivas remodeladas.

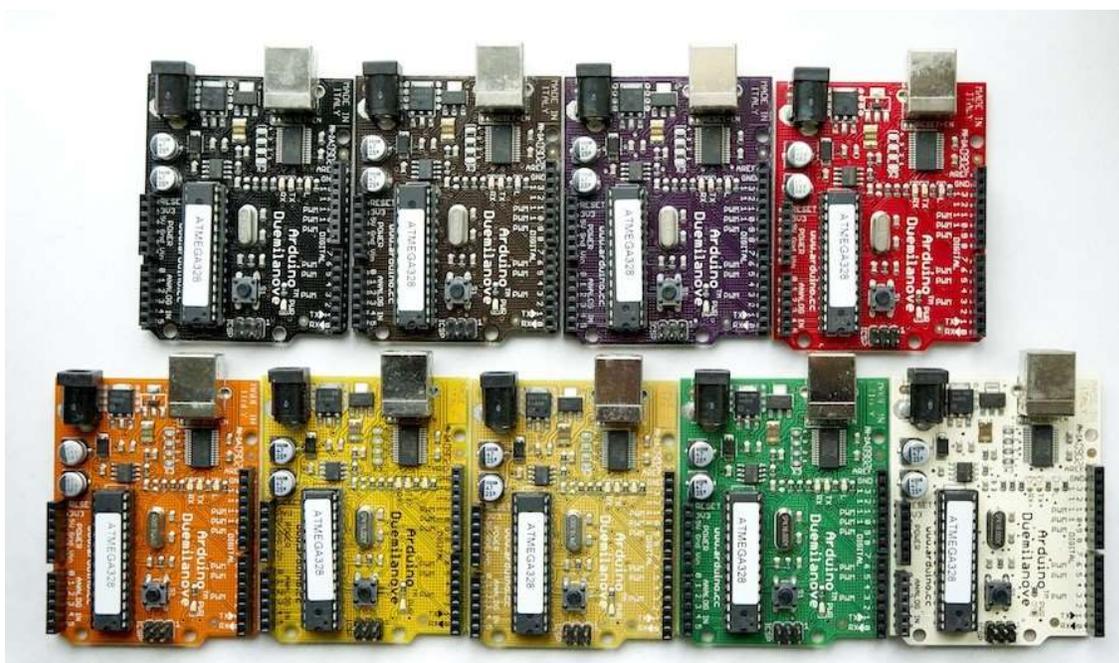
En plantas de generación los porcentajes están referenciados al componente donde se realicen los trabajos de remodelación, asimilándolos a un proceso así: casa de máquinas a uso final y subestaciones a transformación

*Si la remodelación supera el 80% de la instalación, debe acondicionarse la totalidad al cumplimiento del presente reglamento y se le dará el tratamiento como a una instalación nueva.*

*La sustitución o reposición de un aparato o equipo por uno de similares condiciones sin cambiar conductores, encerramientos, ni protecciones no se considera una remodelación, por lo tanto, no requiere certificación*

## Arduino: Del Aula al Laboratorio Global

*Por el Ingeniero Daniel Artamendi Ortiz de Zárate  
Universidad San Sebastian – España*



Esta charla traza el recorrido desde los orígenes de Arduino a su situación actual como placa de prototipado por excelencia. Recorreremos la filosofía *open source* (*software* y *hardware*), el nacimiento de la placa, sus posibilidades, sus nombres propios, derivas, así como diferentes proyectos de distinta naturaleza: desde proyectos educativos a instalaciones de arte que utilizan Arduino no solo para prototipar sino como la pieza fundamental de los mismos.

Arduino es una plataforma de hardware libre, que facilita el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios, permitiendo crear, entre otros, dispositivos que se relacionen con el mundo físico. Inspirado directamente en Processing, un lenguaje de programación visual, pretende aplicar los mismos principios de sencillez y rapidez de desarrollo de este lenguaje al campo de la electrónica. Se compone de un entorno de programación y un circuito integrado, ambos bajo

licencias de código abierto, diseñados para la realización de proyectos electrónicos, siendo ideal para entornos de prototipado rápido y educación.

A lo largo de su corta - apenas diez años - pero intensa historia, Arduino ha revolucionado la fabricación y distribución de microcontroladores, la enseñanza y la didáctica de la tecnología, el universo *open source*, proyectos artísticos, así como fundar una gran comunidad global que diseña, desarrolla y produce código, proyectos y hardware que parte de la base de esta pequeña placa.

## El Discurso de la Innovación Tecnológica y su Impacto

*Por el Doctor Juan Manuel Herrera Caballero  
Universidad UAM-Iztapalapa – México*

El objetivo de la presente exposición es generar conciencia e incentivar la generación de ideas creativas e innovadoras de los especialistas en ingeniería. La visión innovadora ha sido el principio que gobierna el crecimiento y la riqueza. Para comprobarlo es necesario analizar el impacto que la innovación tiene sobre el crecimiento del país. Por medio del análisis documental se pueden entender los indicadores y las comparaciones que nos ofrece el Índice Mundial de Innovación (GII).

El objetivo del análisis al GII es conocer y comprender los indicadores que más favorecen o afectan en la buena o baja de posición de un país. Este índice puede contribuir al entendimiento del orden mundial económico y tecnológico. A partir de ahí es posible emitir recomendaciones y conclusiones para contribuir en la consciencia de los ingenieros, quienes indudablemente contribuirán a la mejora del país. Es importante que se conozcan los puntos débiles y fuertes de la economía y la política del país para poder tomar acciones que mejoren la visión del pensamiento popular respecto al crecimiento económico y a la prosperidad. Estos puntos, débiles y fuertes, son revelados por medio de indicadores como los que Ofrece el Banco Mundial y el GII. Cabe señalar que el crecimiento laboral y económico es logrado por medio de la innovación a nivel científico y no sólo empresarial, pues es el especialista quien crea las empresas y las empresas son las que crean los empleos y la prosperidad.

Si un país que no está acompañada de innovación está condenado a estancarse.

En los últimos tres siglos, en la historia de la humanidad, las ciencias se han especializado aún más y han realizado recorridos insospechados. En especial en el penúltimo siglo más allá de la mecánica cuántica, el desarrollo de tecnologías ha permitido concebir nuevos escenarios y actuar en ellos como es el caso de la nanotecnología. Curiosamente la aplicación de los desarrollos científicos y tecnológicos ha sido fuertemente promovida para el desarrollo de las empresas y se ha dado más énfasis a la información y al conocimiento. Y es así como se ha arribado a esta sociedad del conocimiento, donde el valor estriba en el uso del conocimiento y la ventaja que se puede tener del mismo para generar mayores beneficios.

Una afirmación que se hace aquí sobre la innovación, es que es un proceso que, si bien es distinguible en los resultados a través de productos o servicios, es un proceso que pertenece también a la forma en cómo se organizan los individuos a partir de sus atribuciones y cómo procesan sus creencias y conocimientos colectivamente a fin de proponer y generar nuevas realidades.

### Palabras claves

Innovación, Tecnología, Prosperidad, Productividad, Factor Humano

EXPOTECNOLÓGICA  
20, 21 y 22 de octubre de 2016  
Institución Universitaria Pascual Bravo

LIBRO DE RESÚMENES DE LOS TRABAJOS ACEPTADOS EN EL  
IV ENCUENTRO DE TECNOLOGÍA E INGENIERIA &  
XII SIMPOSIO INTERNACIONAL EN ENERGÍAS

EVALUADORES

Carlos Alberto Valencia Hernández  
José Alejandro Posada Montoya  
Juan Sebastián Rudas Florez  
Luis Carlos Olmos Villalba  
Fabián Vargas Álvarez  
María Casamitjana Causa  
Rosalba Ríos Galvis  
Institución Universitaria Pascual Bravo

Compilador: Rosalba Rios Galvis.  
Edita: Institución Universitaria Pascual Bravo  
PBX (+57 4) 448 0520 Fax: (+57 4) 493 6363  
Dirección: Calle 73 No. 73A - 226  
Medellín, Colombia.  
Apartado Aéreo: 6564  
Web: <http://www.pascualbravo.edu.co>

ISSN: 2422-3891

NOTA EDITORIAL: Las opiniones y contenidos de los artículos publicados en el libro son de responsabilidad exclusiva de los autores; así mismo, éstos se responsabilizarán de obtener el permiso correspondiente para incluir material publicado en otro lugar.



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**PASCUAL BRAVO**



TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN  
CULTURA Y VIDA.



Alcaldía de Medellín  
**Cuenta con vos**