

ISSN 2523-2517

Volumen 2, Número 5 — Abril — Junio - 2018

# Revista de Ingeniería Eléctrica

**ECORFAN<sup>®</sup>**

## **ECORFAN-Perú**

### **Editora en Jefe**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

### **Redactor Principal**

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

### **Asistente Editorial**

ROSALES-BORBOR, Eleana. BsC

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

### **Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

### **Editor Ejecutivo**

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD

### **Editores de Producción**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

### **Administración Empresarial**

REYES-VILLAO, Angélica. BsC

### **Control de Producción**

RAMOS-ARANCIBIA Alejandra. BsC

DÍAZ-OCAMPO Javier. BsC

**Revista de Ingeniería Eléctrica**, Volumen 2, Número 5, de Abril a Junio 2018, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Perú. La Raza Av. 1047 No. - Santa Ana, Cusco-Perú. Postcode: 11500. WEB: [www.ecorfan.org/republicofperu](http://www.ecorfan.org/republicofperu), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María, Co-Editor: SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD. ISSN: 2523-2517. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 30 de Junio 2018.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional de defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

# **Revista de Ingeniería Eléctrica**

## **Definición del Research Journal**

### **Objetivos Científicos**

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en el Área de Ingeniería y Tecnología, en las Subdisciplinas Electromagnetismo, Fuentes de distribución eléctrica, Innovación en la ingeniería eléctrica, Amplificación de señales, Diseño de motores eléctricos, Ciencias materiales en las plantas eléctricas, Gestión y distribución de energías eléctricas.

ECORFAN-México S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

### **Alcances, Cobertura y Audiencia**

Revista de Ingeniería Eléctrica es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Perú, es una publicación científica arbitrada e indizada con periodicidad trimestral. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de la Electromagnetismo, Fuentes de distribución eléctrica, Innovación en la ingeniería eléctrica, Amplificación de señales, Diseño de motores eléctricos, Ciencias materiales en las plantas eléctricas, Gestión y distribución de energías eléctricas con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ingeniería y Tecnología. El horizonte editorial de ECORFAN-México® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

## **Consejo Editorial**

ROCHA - RANGEL, Enrique. PhD  
Oak Ridge National Laboratory

CARBAJAL - DE LA TORRE, Georgina. PhD  
Université des Sciences et Technologies de Lille

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD  
Institute of Technology

CASTILLO - TÉLLEZ, Beatriz. PhD  
University of La Rochelle

FERNANDEZ - ZAYAS, José Luis. PhD  
University of Bristol

DECTOR - ESPINOZA, Andrés. PhD  
Centro de Microelectrónica de Barcelona

TELOXA - REYES, Julio. PhD  
Advanced Technology Center

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD  
Universidad Gestalt

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD  
Universidad Politécnica de Madrid

HERNANDEZ - ESCOBEDO, Quetzalcoatl Cruz. PhD  
Universidad Central del Ecuador

HERRERA - DIAZ, Israel Enrique. PhD  
Center of Research in Mathematics

MEDELLIN - CASTILLO, Hugo Iván. PhD  
Heriot-Watt University

LAGUNA, Manuel. PhD  
University of Colorado

VAZQUES - NOGUERA, José. PhD  
Universidad Nacional de Asunción

VAZQUEZ - MARTINEZ, Ernesto. PhD  
University of Alberta

AYALA - GARCÍA, Ivo Neftalí. PhD  
University of Southampton

LÓPEZ - HERNÁNDEZ, Juan Manuel. PhD  
Institut National Polytechnique de Lorraine

MEJÍA - FIGUEROA, Andrés. PhD  
Universidad de Sevilla

DIAZ - RAMIREZ, Arnoldo. PhD  
Universidad Politécnica de Valencia

MARTINEZ - ALVARADO, Luis. PhD  
Universidad Politécnica de Cataluña

MAYORGA - ORTIZ, Pedro. PhD  
Institut National Polytechnique de Grenoble

ROBLEDO - VEGA, Isidro. PhD  
University of South Florida

LARA - ROSANO, Felipe. PhD  
Universidad de Aachen

TIRADO - RAMOS, Alfredo. PhD  
University of Amsterdam

DE LA ROSA - VARGAS, José Ismael. PhD  
Universidad París XI

CASTILLO - LÓPEZ, Oscar. PhD  
Academia de Ciencias de Polonia

LÓPEZ - BONILLA, Oscar Roberto. PhD  
State University of New York at Stony Brook

LÓPEZ - LÓPEZ, Aurelio. PhD  
Syracuse University

RIVAS - PEREA, Pablo. PhD  
University of Texas

VEGA - PINEDA, Javier. PhD  
University of Texas

PÉREZ - ROBLES, Juan Francisco. PhD  
Instituto Tecnológico de Saltillo

SALINAS - ÁVILES, Oscar Hilario. PhD  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados -IPN

RODRÍGUEZ - AGUILAR, Rosa María. PhD  
Universidad Autónoma Metropolitana

BAEZA - SERRATO, Roberto. PhD  
Universidad de Guanajuato

MORILLÓN - GÁLVEZ, David. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

CASTILLO - TÉLLEZ, Margarita. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

SERRANO - ARRELLANO, Juan. PhD  
Universidad de Guanajuato

ZAVALA - DE PAZ, Jonny Paul. PhD  
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada

ARROYO - DÍAZ, Salvador Antonio. PhD  
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

ENRÍQUEZ - ZÁRATE, Josué. PhD  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

HERNÁNDEZ - NAVA, Pablo. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

CASTILLO - TOPETE, Víctor Hugo. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

CERCADO - QUEZADA, Bibiana. PhD  
Intitut National Polytechnique Toulouse

QUETZALLI - AGUILAR, Virgen. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

DURÁN - MEDINA, Pino. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

PORTILLO - VÉLEZ, Rogelio de Jesús. PhD  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

ROMO - GONZALEZ, Ana Eugenia. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

VASQUEZ - SANTACRUZ, J.A. PhD  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados

VALENZUELA - ZAPATA, Miguel Angel. PhD  
Universidad Autónoma Metropolitana

OCHOA - CRUZ, Genaro. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

SÁNCHEZ - HERRERA, Mauricio Alonso. PhD  
Instituto Tecnológico de Tijuana

PALAFIX - MAESTRE, Luis Enrique. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

AGUILAR - NORIEGA, Leocundo. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

GONZALEZ - BERRELLEZA, Claudia Ibeth. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

REALYVÁSQUEZ - VARGAS, Arturo. PhD  
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RODRÍGUEZ - DÍAZ, Antonio. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

MALDONADO - MACÍAS, Aidé Aracely. PhD  
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

LICEA - SANDOVAL, Guillermo. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

CASTRO - RODRÍGUEZ, Juan Ramón. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

RAMIREZ - LEAL, Roberto. PhD  
Centro de Investigación en Materiales Avanzados

VALDEZ - ACOSTA, Fevrier Adolfo. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

GONZÁLEZ - LÓPEZ, Samuel. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

CORTEZ - GONZÁLEZ, Joaquín. PhD  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados

TABOADA - GONZÁLEZ, Paul Adolfo. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

RODRÍGUEZ - MORALES, José Alberto. PhD  
Universidad Autónoma de Querétaro

## **Comité Arbitral**

ESCAMILLA - BOUCHÁN, Imelda. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

LUNA - SOTO, Carlos Vladimir. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

URBINA - NAJERA, Argelia Berenice. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

PEREZ - ORNELAS, Felicitas. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

CASTRO - ENCISO, Salvador Fernando. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

CASTAÑÓN - PUGA, Manuel. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

BAUTISTA - SANTOS, Horacio. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GONZÁLEZ - REYNA, Sheila Esmeralda. PhD  
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

RUELAS - SANTOYO, Edgar Augusto. PhD  
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

HERNÁNDEZ - GÓMEZ, Víctor Hugo. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

OLVERA - MEJÍA, Yair Félix. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

CUAYA - SIMBRO, German. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

LOAEZA - VALERIO, Roberto. PhD  
Instituto Tecnológico Superior de Uruapan

ALVAREZ - SÁNCHEZ, Ervin Jesús. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada

SALAZAR - PERALTA, Araceli. PhD  
Universidad Autónoma del Estado de México

MORALES - CARBAJAL, Carlos. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

RAMÍREZ - COUTIÑO, Víctor Ángel. PhD  
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

BAUTISTA - VARGAS, María Esther. PhD  
Universidad Autónoma de Tamaulipas

GAXIOLA - PACHECO, Carelia Guadalupe. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

GONZÁLEZ - JASSO, Eva. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

FLORES - RAMÍREZ, Oscar. PhD  
Universidad Politécnica de Amozoc

ARROYO - FIGUEROA, Gabriela. PhD  
Universidad de Guadalajara

BAUTISTA - SANTOS, Horacio. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GUTIÉRREZ - VILLEGAS, Juan Carlos. PhD  
Centro de Tecnología Avanzada

HERRERA - ROMERO, José Vidal. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

MARTINEZ - MENDEZ, Luis G. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

LUGO - DEL ANGEL, Fabiola Erika. PhD  
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

NÚÑEZ - GONZÁLEZ, Gerardo. PhD  
Universidad Autónoma de Querétaro

PURATA - SIFUENTES, Omar Jair. PhD  
Centro Nacional de Metrología

CALDERÓN - PALOMARES, Luis Antonio. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

TREJO - MACOTELA, Francisco Rafael. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

TZILI - CRUZ, María Patricia. PhD  
Universidad ETAC

DÍAZ - CASTELLANOS, Elizabeth Eugenia. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

ORANTES - JIMÉNEZ, Sandra Dinorah. PhD  
Centro de Investigación en Computación

VERA - SERNA, Pedro. PhD  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

MARTÍNEZ - RAMÍRES, Selene Marisol. PhD  
Universidad Autónoma Metropolitana

OLIVARES - CEJA, Jesús Manuel. PhD  
Centro de Investigación en Computación

GALAVIZ - RODRÍGUEZ, José Víctor. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

JUAREZ - SANTIAGO, Brenda. PhD  
Universidad Internacional Iberoamericana

ENCISO - CONTRERAS, Ernesto. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

GUDIÑO - LAU, Jorge. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

MEJIAS - BRIZUELA, Nildia Yamileth. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

FERNÁNDEZ - GÓMEZ, Tomás. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

MENDOZA - DUARTE, Olivia. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

ARREDONDO - SOTO, Karina Cecilia. PhD  
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

NAKASIMA - LÓPEZ, Mydory Oyuky. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

AYALA - FIGUEROA, Rafael. PhD  
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

ARCEO - OLAGUE, José Guadalupe. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

HERNÁNDEZ - MORALES, Daniel Eduardo. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

AMARO - ORTEGA, Vidblain. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

ÁLVAREZ - GUZMÁN, Eduardo. PhD  
Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

CASTILLO - BARRÓN, Allen Alexander. PhD  
Instituto Tecnológico de Morelia

CASTILLO - QUIÑONES, Javier Emmanuel. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

ROSALES - CISNEROS, Ricardo. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

GARCÍA - VALDEZ, José Mario. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

CHÁVEZ - GUZMÁN, Carlos Alberto. PhD  
Instituto Politécnico Nacional

MÉRIDA - RUBIO, Jován Oseas. PhD  
Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital

INZUNZA - GONÁLEZ, Everardo. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

VILLATORO - Tello, Esaú. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

NAVARRO - ÁLVEREZ, Ernesto. PhD  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

ALCALÁ - RODRÍGUEZ, Janeth Aurelia. PhD  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

GONZÁLEZ - LÓPEZ, Juan Miguel. PhD  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

RODRIGUEZ - ELIAS, Oscar Mario. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

ORTEGA - CORRAL, César. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

GARCÍA - GORROSTIETA, Jesús Miguel. PhD  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

## **Cesión de Derechos**

El envío de un Artículo a Revista de Ingeniería Eléctrica emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Perú considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.

## **Declaración de Autoría**

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación del Artículo y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor del Artículo.

## **Detección de Plagio**

Todos los Artículos serán testeados por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

## **Proceso de Arbitraje**

Todos los Artículos se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homólogo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos- Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

## **Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación**

### **Área del Conocimiento**

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de Electromagnetismo, Fuentes de distribución eléctrica, Innovación en la ingeniería eléctrica, Amplificación de señales, Diseño de motores eléctricos, Ciencias materiales en las plantas eléctricas, Gestión y distribución de energías eléctricas y a otros temas vinculados a las Ingeniería y Tecnología.

## **Presentación del contenido**

Como primer artículo presentamos, *Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia*, por SALAZAR-PERALTA, Araceli, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda, con adscripción en el Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, como siguiente artículo presentamos, *Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica*, por MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma, con adscripción en CIATEQ A.C. y la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), como tercer artículo presentamos, *Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados*, por MEDINA-ÁNGEL, Gustavo & BURLAK, Gennadiy, con adscripción en CIICAp, y la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, como cuarto artículo presentamos, *Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica*, por LÓPEZ-XELO, Hilario, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad.

## Contenido

Artículo	Página
<b>Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia</b> SALAZAR-PERALTA, Araceli, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda <i>Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán</i>	1-9
<b>Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica</b> MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma <i>CIATEQ A.C.</i> <i>Universidad Autónoma del Estado de México</i>	10-17
<b>Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados</b> MEDINA-ÁNGEL, Gustavo & BURLAK, Gennadiy <i>CIICAp</i> <i>Universidad Autónoma del Estado de Morelos</i>	18-26
<b>Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica</b> LÓPEZ-XELO, Hilario, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad	27-32

## Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia

### Study to detect Defects in Solar Panels by means of Electroluminescence

SALAZAR-PERALTA, Araceli†\*, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda

*Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Ingeniería en Materiales*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Araceli, Salazar-Peralta* / ORC ID: 0000-0001-5861-3748, Researcher ID Thomson: U-2933-2018, CVU CONACYT ID: 300357

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *J. Alfredo, Pichardo-Salazar*

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Ulises, Pichardo-Salazar*

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Rosa Hilda, Chávez*

Recibido Abril 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

#### Resumen

En la industria fotovoltaica, las celdas solares se utilizan como el principal material semiconductor para la fabricación de paneles solares, en conexión serie y/o en paralelo, para integrar el módulo fotovoltaico completo. Las celdas solares pueden presentar defectos característicos, tales como micro grietas, dedos rotos, contactos defectuosos entre celdas, celdas con fisuras o celdas rotas, los cuales no son perceptibles a simple vista. La prueba de electroluminiscencia en la industria fotovoltaica, proporciona información de los defectos que se encuentran en las celdas solares. El objetivo de este estudio fue Identificar a través de la imagen de electroluminiscencia (EL), los defectos que se encuentran en las celdas solares. La prueba se realizó a los paneles, introduciendo un flujo eléctrico a través de las células solares en una cámara para electroluminiscencia. Los defectos encontrados en algunas celdas fueron: dedos cortados, microgrietas, celdas con fisura, lo cual repercutió en la reducción de potencia del módulo fotovoltaico. Se concluye que la técnica de electroluminiscencia, es una herramienta de utilidad para el aseguramiento de calidad en la fabricación de los módulos fotovoltaicos.

**Electroluminiscencia, Módulo fotovoltaico, Celdas solares, Dedos cortados**

#### Abstract

In the photovoltaic industry, solar cells are used as the main semiconductor material for the manufacture of solar panels, in series connection and / or in parallel to integrate the complete photovoltaic module. Solar cells can have characteristic defects such as micro cracks, broken fingers, defective contacts between cells, cells with cracks or broken cells, which are not visible to the naked eye. The electroluminescence test in the photovoltaic industry provides information on the defects found in solar cells. The objective of this study was to identify the defects found in solar cells through the electroluminescence (EL) image. The test was performed on the panels by introducing an electrical flow through the solar cells in an electroluminescence chamber. The defects found in some cells were: cut fingers, micro cracks, cracked cells, which affected the power reduction of the photovoltaic module. It is concluded that the electroluminescence technique is a useful tool for quality assurance in the manufacture of photovoltaic modules.

**Electroluminescence, Photovoltaic module, Solar cells, Fingers cut**

**Citación:** SALAZAR-PERALTA, Araceli, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda. Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 1-9

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (araceli\_salazar\_p@hotmail.com)

## Introducción

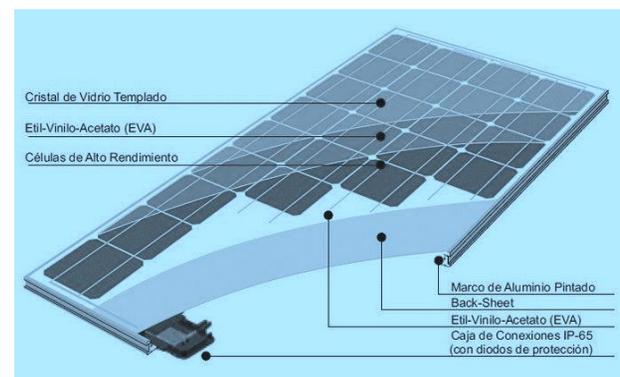
La necesidad de reducir los defectos, que puedan presentarse en la producción de módulos fotovoltaicos, conduce a realizar nuevos estudios, para mejorar la calidad de los mismos. Dentro del proceso de la producción, se presentan diferentes problemas, los cuales se ven reflejados en el producto terminado, así como en la vida útil del módulo. Para algunos de ellos existen métodos, que permiten detectarlos y corregirlos durante el proceso tales como mala soldadura, celdas rotas o defectos en la materia prima, pero hay problemas que solo se pueden ver con el paso del tiempo, y el deterioro del módulo (Ferrara. 2011).

El deterioro afecta la eficiencia que produce el módulo, a través de factores ambientales, por un mal manejo, o mantenimiento del mismo, se pueden llegar a hacer visibles, los defectos que trae a partir de su producción, entre estos defectos están los **dedos cortados**, que son las rupturas que presentan los colectores, de la celda. El proceso de soldadura y laminación, son los aspectos de mayor incidencia, que provocan defectos, de ahí la importancia, de estudiar los métodos y herramientas utilizados, para determinar los parámetros con los cuales se debe de trabajar, así mismo, como las características apropiadas del material (Hacke P. 2010).

La prueba de electroluminiscencia (EL), es una técnica de medición no destructiva que consta del mismo funcionamiento que un diodo emisor de luz. Esta prueba se realiza a los paneles solares, introduciendo un flujo eléctrico a través de las células solares. La EL es una técnica que sirve para caracterizar las células solares y el módulo fotovoltaico, es útil ya que es rápida, no destructiva, sensible a los efectos de los parámetros de resistencia y recombinación, de derivación y serie. La EL emitida por una célula solar en diagonal hacia adelante, puede ser detectada por una cámara de CCD en condiciones de oscuridad.

La prueba de electroluminiscencia, se realizó a los paneles solares, para poder identificar las celdas solares con defectos, a través de las imágenes EL. Estos defectos, que se encuentran en las células solares pueden provocar, una barrera para el flujo de la corriente eléctrica, y provocar una pérdida de potencia.

La importancia de realizar esta prueba, a los paneles solares, es poder identificar los defectos que no son visibles al ojo humano, y que pueden estar presentes en las celdas solares o en la soldadura, así como detectar los factores que generan la ruptura de los dedos (colectores), de la celda durante el proceso de fabricación, para implementar las posibles soluciones, y mejorar la calidad y la vida útil del módulo. En la Figura 1 se observan los componentes de un módulo fotovoltaico: Cristal de vidrio templado, Etilen vinil Acetato (EVA), Células de alto rendimiento, marco de aluminio, Back Sheet, EVA, y caja de conexiones.



**Figura 1** Capas componentes de un Módulo Fotovoltaico. Parte superior: Cristal de vidrio templado, Etilen vinil Acetato (EVA), Células de alto rendimiento. Parte inferior: Marco de aluminio, Back Sheet, EVA, y Caja de conexiones

Fuente: *Elaboración Propia*

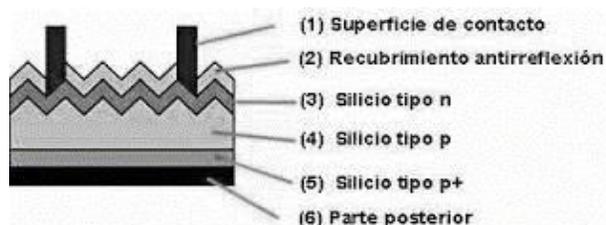
## Vidrio templado

Vidrio templado de sosa, cal y sílice con un espesor entre 3 y 4 mm, con bajo contenido de hierro. Este tiene muy buena transmisión de la radiación solar, además de proporcionar protección, contra los agentes atmosféricos, y los impactos. La superficie exterior del vidrio, es anti reflexiva y está tratada para impedir la retención del polvo, y la suciedad. La superficie interior, generalmente es rugosa, lo que permite una buena adherencia con el encapsulante de las células, además de facilitar la penetración de la radiación solar.

## Celda solar

Las celdas solares, son dispositivos de conversión directa, que transforman directamente, sin procesos intermedios la potencia proveniente del sol en potencia eléctrica (DC).

Puesto que la potencia  $P=IV$ , es necesario comprender como se genera la corriente  $I$  y el voltaje  $V$  en la celda. A su vez,  $I$  es el resultado de cargas en movimiento en una dirección determinada. Las cargas, son inherentes al material, pero en los semiconductores, están en estado ligado. Bajo la acción de la luz, las cargas se vuelven libres, capaces de formar una corriente. Las cargas son dirigidas en una dirección determinada, para formar una corriente, gracias a la acción de campo eléctrico creado en la celda. En la Figura 2 se observan los componentes de la celda, los cuales son: Superficie de contacto, Recubrimiento antirreflexión, Silicio tipo n, Silicio tipo p, Silicio tipo p+, Parte posterior.



**Figura 2** Componentes de la celda solar; (1) Superficie de contacto, (2) Recubrimiento antirreflexión, (3) Silicio tipo n, (4) Silicio tipo p, (5) Silicio tipo p+, (6) Parte posterior  
Fuente: *Elaboración Propia*

La estructura física, o arreglo atómico, de los semiconductores, se puede dividir en tres grupos: Cristal simple, policristalino y amorfo. La estructura de cristal simple se caracteriza por un ordenamiento periódico de átomos obteniendo una forma geométrica, tridimensional de un paralelepípedo. Tal es el caso del Silicio, el cual comparte cada uno de sus cuatro electrones de valencia, en una unión covalente, con cada átomo vecino de silicio, el sólido, por lo tanto, consiste en una unidad básica de 5 átomos de silicio, el átomo original más los cuatro átomos con los que comparte sus electrones de valencia.

### Componentes del Módulo Fotovoltaico: Celda solar

- Placa de silicio dopada con Fosforo y Boro para así obtener un lado positivo y un lado negativo.
- Capa anti reflectante con forma de cono o pirámides que capturan con mayor facilidad los rayos del sol.
- Rejillas o dedos encargados de recolectar las cargas producidas en la celda solar.

### Bussbar

El Bussbar es el principal colector, pasa en la parte negativa y positiva de la celda, donde se une el ribbon para formar cadenas de celdas.

### EVA

Se emplean dos capas de Etil-Vinil-Acetato (EVA) entre la matriz de celdas. Este copolímero se encuentra en contacto directo con las células, de manera que protege las conexiones entre las mismas, y aporta resistencia contra las vibraciones e impactos. Además, permite la transmisión de la radiación solar, y no se degrada con la radiación ultravioleta.

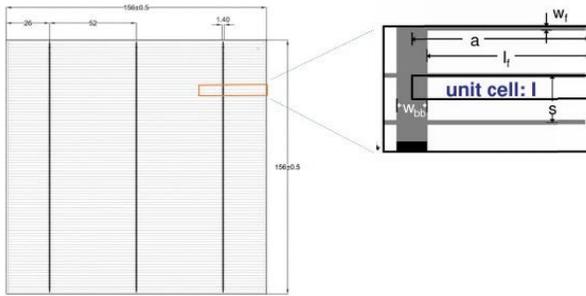
### Back-sheet (Tedlar)

Se utiliza comunmente un laminado de tres capas. La capa externa es de fluoruro de polivinilo (PVF), comercialmente denominado TEDLAR. Este material, junto con la cubierta frontal, protege al módulo de la humedad y otros agentes atmosféricos, sin embargo, no lo aísla eléctricamente, para ello se utiliza una segunda capa de poliéster (Tereftalato de Polietileno). En la parte interna se usa otra capa de TEDLAR. Esta lámina de plástico de material compuesto es de naturaleza opaca, habitualmente de color blanco, para reflejar la luz solar, que no almacenan las celdas sobre la cara posterior rugosa de la cubierta frontal, la cual refleja la luz de nuevo hacia las celdas.

### Dedos Colectores de la celda solar

Con el fin de recolectar las cargas que se generan por la radiación solar, la celda trae consigo contactos a través de la superficie, normalmente son tiras de metal, en forma de rejillas llamados dedos. En la Figura 3, se observan los dedos colectores, uno de ellos está marcado por medio de un rectángulo.

Sin embargo, si se coloca una rejilla grande, la cual es opaca, en la tapa de la celda, ocasionaría sombra a las partes activas de la misma, y por lo tanto se reduciría la eficiencia de conversión, en forma considerable. Para mejorar la eficiencia de conversión, se debe reducir al mínimo estos efectos que ensombrecen la superficie de contacto, con los rayos solares.



**Figura 3** Dedos colectores de una celda solar (marcada con el rectángulo).

Fuente: *Elaboración Propia*

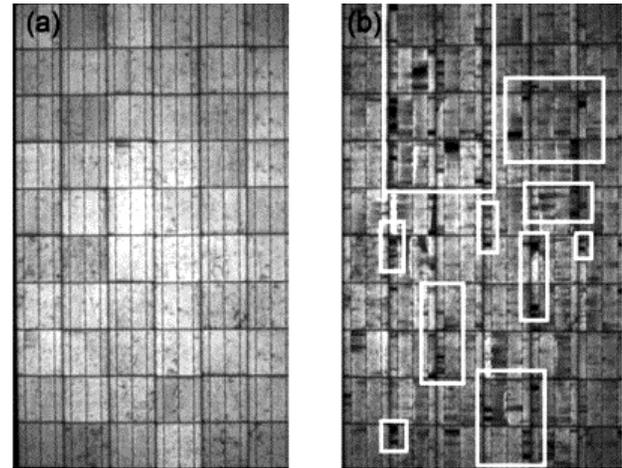
### Dedos Cortados

Son rupturas que presentan los colectores de la celda. Se considera ruptura, cuando los dedos colectores se fracturan, ya sea entre ellos o del bussbar, si esto sucede impedirán el flujo de corriente, que genera la celda provocando la pérdida de esa energía, disminuyendo la potencia del módulo.

Esta pérdida puede verse a través de un equipo llamado cámara de electroluminiscencia, que sirve como parte de la inspección de calidad del módulo, el cual induce una corriente eléctrica, sobre el módulo provocando que este brille, una vez hecho esto por medio de una cámara monocromática, equipada con filtro para bloquear la luz visible, se toman las imágenes, en las cuales se pueden detectar grietas, celdas rotas, y problemas de soldadura.

La cámara para la prueba de electroluminiscencia, produce imágenes, en donde se puede apreciar cuando una celda hace mal contacto, en este caso genera un brillo, lo cual se identifica como falta de soldadura, también aparecen manchas oscuras, las cuales representan ruptura de colectores, y así mismo se pueden ver las celdas rotas.

Cabe mencionar que las imágenes obtenidas en la cámara de electroluminiscencia, no dan mayores detalles, solamente dan zonas brillantes en el caso de falta de soldadura, y en el caso de colectores rotos zonas oscuras, como las que se observan en la figura 4. En esta figura se observa una celda sin defecto, y otra con defecto de dedos cortados. El inspector de aseguramiento de calidad, se debe capacitar y familiarizar con la prueba, para poder determinar el defecto.



**Figura 4** Prueba comparativa de Electroluminiscencia (EL) de un módulo sin defecto (a) y otro con dedos colectores con defecto (cortados) (b). Cabe mencionar que los defectos aparecen como manchas oscuras en la Cámara de Electroluminiscencia

Fuente: *Cámara de Electroluminiscencia*

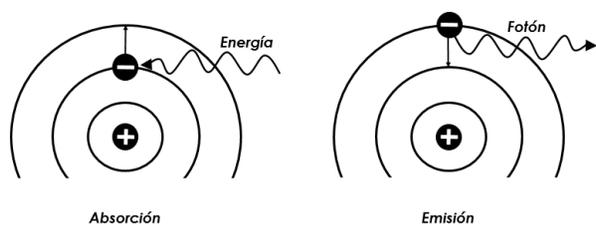
El Desarrollo de este trabajo se dividió en 6 secciones en la siguiente secuencia:

1. **Introducción.** En la cual se abordan los conceptos generales necesarios, para comprender todo lo relacionado con un módulo fotovoltaico, sus partes, así como la celda solar, su constitución y los defectos que puede presentar, lo cual influye en forma directa en la potencia del módulo.
2. **Experimentación.** En esta sección se explica la metodología a seguir para la medición de electroluminiscencia en el módulo.
3. **Análisis de Resultados.** En esta sección se aborda la discusión de los resultados encontrados.
4. **Conclusiones.** En esta sección se indican las conclusiones de este estudio.
5. **Agradecimientos.** En esta sección se agradece a las Instituciones que permitieron llevar a cabo el estudio.
6. **Referencias.** Finalmente se presentan las referencias consultadas.

### Experimentación

La prueba de electroluminiscencia se realizó en una máquina para ensayo de luminiscencia marca Flasher, tomando en consideración los siguientes aspectos:

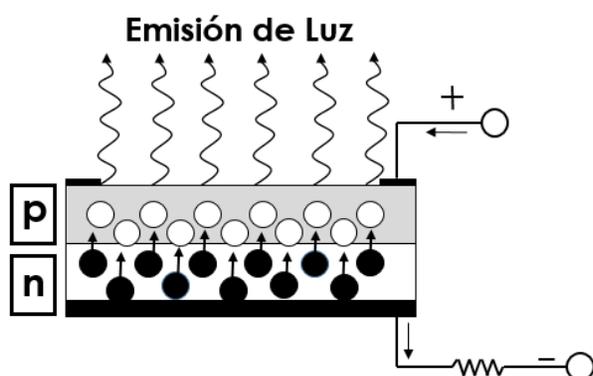
- 2.1 La Electroluminiscencia es la emisión de luz por parte de un material, cuando es sometido a la aplicación de un voltaje, es un fenómeno que se relaciona con los electrones salientes, generados por la existencia de un alto campo eléctrico en el dispositivo. Ver Figura 5.



**Figura 5** Fenómeno del electrón cuando emite y absorbe energía

Fuente: *Elaboración Propia*

La electroluminiscencia ocurre cuando los electrones cruzan la unión desde el material tipo **n** al tipo **p** el proceso de recombinación, electrón-hueco, produciendo algunos fotones en el rango visible o infrarrojo (IR), lo cual se observa en la Figura 6.



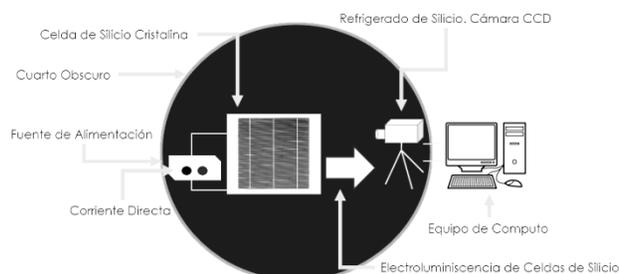
**Figura 6** Emisión de luz de un semiconductor np

Fuente: *Elaboración Propia*

Los electrones cruzan la unión desde el material tipo **n** al tipo **p** el proceso de recombinación, electrón-hueco, produce algunos fotones (luz) en el rango visible o infrarrojo.

- 2.2 Se verificó que la máquina Flasher estuviera calibrada.
- 2.3 Se colocó el panel en la máquina Flasher
- 2.4 Se introdujo un flujo eléctrico a través de las celdas solares.

- 2.5 La electroluminiscencia emitida por una celda solar se produjo conforme al siguiente principio. Las células solares, son sometidas a una corriente eléctrica que excita a los electrones del silicio lo que provoca la emisión de fotones que son detectados a través de una cámara CCD (Dispositivo de carga acoplada). Ver Figura 7.



**Figura 7** Principio del fenómeno de electroluminiscencia. Las células emiten una luz que es captada por la cámara de electro luminiscencia. Las que no tienen defecto aparecen brillantes en la imagen de la cámara, las que están dañadas mostrarán un color oscuro (mancha).

Fuente: *Manual de EL*

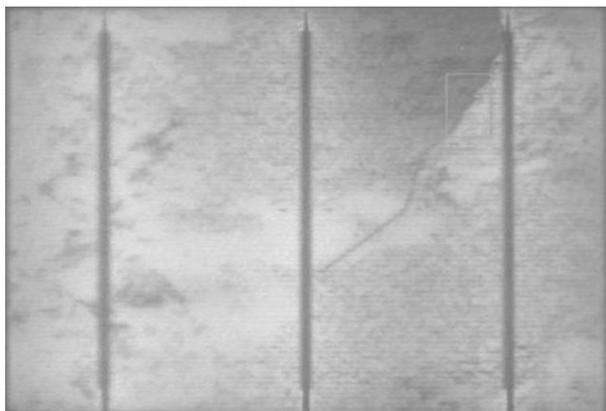
- 2.6 Se proyecta la imagen de electroluminiscencia del módulo PV (potencia voltaje) permitiendo identificar algunos defectos y características en las celdas solares que serían imperceptibles para el ojo humano. Dentro de los defectos que se pueden detectar por esta prueba son:
  - 2.6.1 Micro fisura (Micro crack): Fisuras en forma de líneas, no son visibles al ojo humano. Ver Figura 8.



**Figura 8** Imagen de Electroluminiscencia (EL) de un Módulo con microfisuras (líneas oscuras)

Fuente: *Cámara de Electroluminiscencia*

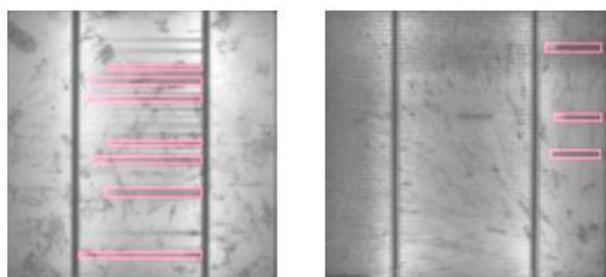
- 2.6.2 Fisura activa (active crack): Fisuras que se caracterizan por tener una región oscura a un lado, causando pérdida de la potencia. Ver Figura 9.



**Figura 9** Imagen de electroluminiscencia (EL) de un Módulo con Fisura activa (parte superior derecha)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

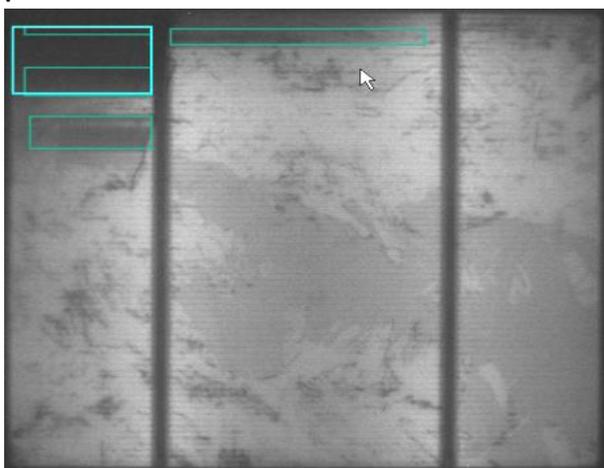
- 2.6.3 Dedos cortados: Impresión defectuosa de la celda, los dedos están interrumpidos. No son demasiados como para ocasionar regiones oscuras. Figura 10.



**Figura 10** Imágenes por Electroluminiscencia de Módulos con defecto de dedos cortados (manchas oscuras, señaladas con rojo)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

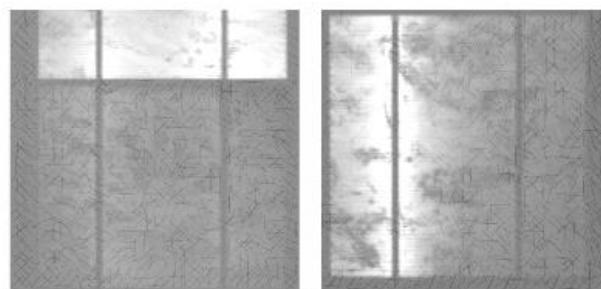
- 2.6.4 Dedos interrumpidos (cortados), que forman una mancha: Varios dedos están interrumpidos ocasionando una región oscura. Ver Figura 11



**Figura 11** Imagen por Electroluminiscencia (EL) de un Módulo con dedos interrumpidos, los cuales forman una mancha (rectángulo marcado con verde)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

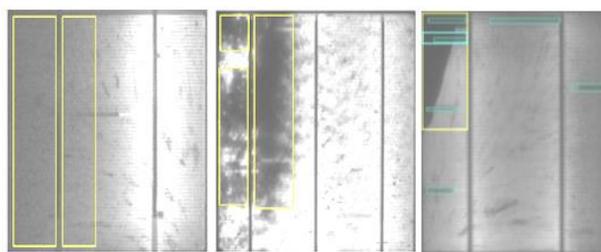
- 2.6.5 defecto por brillo: Se ocasiona por una mala soldadura
  - a. Todos los ribbons están mal soldados
  - b. El ribbon derecho está mal soldado. Ver Figura 12.



**Figura 12** Imágen por Electroluminiscencia (EL) de un módulo con defecto por brillo ocasionado por mala soldadura

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.6.6 Manchas oscuras ocasionadas por:
  - a. Fallos de soldadura (Ribbon izquierdo)
  - b. Defecto de la celda
  - c. Rotura en la orilla. Ver Figura 13.



**Figura 13** Imágenes de Electroluminiscencia de Módulos con manchas oscuras. a) Falla en soldadura, b) Defecto de celda, c) Rotura

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.7 Las imágenes obtenidas por Electroluminiscencia (EL) de cada módulo fotovoltaico probado, se guardan en un equipo de cómputo para ser analizadas con detalle posteriormente.

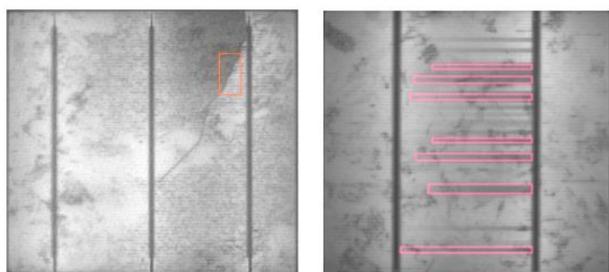
### Análisis de Resultados

De los 6 módulos probados en este estudio se encontraron 2 con los siguientes defectos: Uno con microfisura y otro con dedos cortados. Ver Figura 14, y 15. Cabe mencionar que la potencia de los módulos se vió afectada, los dos módulos estuvieron fuera de especificación.

- 3.2 La prueba de Electroluminiscencia ofrece una gran cantidad de datos sobre la uniformidad del área de las células que conforman el módulo solar. Es no destructiva y relativamente rápida de efectuar con tiempos de medición de 1 segundo posible.

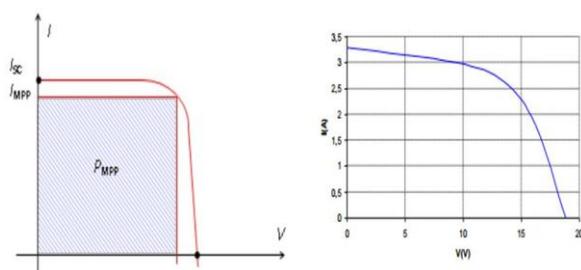
Para detectar posibles defectos que pueden afectar el rendimiento del módulo, se aplica un voltaje en las terminales de los módulos y estos responden mediante una recombinación de los electrones en las celdas, produciendo una radiación de fotones. Las áreas dañadas del módulo solar aparecen oscuras o brillan menos que las áreas que están en buen estado. La emisión de luminiscencia es detectada por la cámara al silicio, un dispositivo con carga acoplada (CCD) con una resolución de pixel de  $1376 \times 1040$ .

Este estudio permitió determinar el fenómeno llamado dedos cortados en los módulos fotovoltaicos, problema que influye directamente en la eficiencia, y utilidad de los módulos, ocasionado por el rompimiento de los colectores, que trae consigo la serigrafía de la celda solar. Los colectores al no hacer contacto con los interconectores del módulo, impiden el flujo de energía, y al mismo tiempo reducen la potencia generada por el modulo.



**Figura 14** Imágenes por Electroluminiscencia de Módulos fotovoltaicos con defectos. a) fisura activa (izquierda). b) Dedos cortados (derecha)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia



**Figura 15** Comparación de la curva I-V. De un módulo sin defecto, y otro con defecto.

Fuente: IUSA

## Conclusiones

La implementación de la prueba de electroluminiscencia en la producción de los paneles solares es uno de los pasos más importantes en todo el proceso. Esta prueba permite detectar los defectos durante el proceso y corregirlos, enviando el panel a reparación antes de enviarlo al cliente. La detección oportuna de los defectos que pueda tener el panel solar, ayudará a reducir el PNC (Producto no conforme), ocasionado por defectos en las celdas solares tales como: micro-fisuras, defectos invisibles de soldadura, y otros daños de los módulos fotovoltaicos, que no son visibles y no pueden ser detectados a simple vista.

Este estudio permitió conocer los defectos presentes en las celdas solares que conforman el módulo fotovoltaico, los cuales pueden ser ocasionados por las siguientes causas:

- Materia prima. Se debe verificar si cumple con las especificaciones al recibirla del proveedor.
- Tipo de almacenaje. Las celdas fotovoltaicas por lo general de fábrica vienen empaquetadas en una caja especial para evitar que se dañe, y como es material frágil se debe de tener especial cuidado durante su manejo, desde la recepción hasta el almacenaje.
- Área de producción. Se debe tener especial cuidado en los siguientes parámetros.
- Coeficiente de Dilatación Térmica (CTE) superficial causado por el espesor del ribbon.
- Falta de uniformidad en la soldadura. Puede ser exceso de penetración o falta de penetración.
- En general se deben controlar todos los parámetros de la máquina soldadora, así como la temperatura ambiente.

Se recomienda implementar controles por medio de hojas de inspección en cada etapa de fabricación, desde la recepción de la materia prima hasta el final del proceso para asegurar que el módulo llegue al cliente dentro de especificación.

## Agradecimientos

Al Tecnológico de Estudios Superiores por la Vinculación Academia Industria y las horas de Investigación asignadas para este estudio en colaboración con Industrias Unidas S.A de C.V

## Referencias

C. Ferrara, "Philip Why do PV Modules Fail, in: Proceedings of the Inter-national Conference on Materials for Advanced Technologies, Singapore", Energy Procedia 15, 2011, 379–387.

P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, D. Turdell, N. Bosco, S. Johnston, S. Kurtz, "Test-to-Failure of Crystalline Silicon Modules", in: Proceedings of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, 2010, pp. 248–250.

A. Gabor, M. Ralli, S. Montminy, L. Alegria, C. Bordonaro, J. Woods, L. Felton, "Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules", Proceedings of the 21st EUPVSEC, Dresden, Germany, 2006, pp. 2042–2047.

A. Schneider, M. Pander, T. Korvenkangas, S. Aulehla, R. Harney, T. Hort-tana, "Cell to Module Loss Reduction and Module Reliability Enhancements by Solder Ribbon Optimization", Proceedings of the 29th EUPVSEC, Amsterdam, Netherlands, 2014, pp. 165-170.

I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser, B. Bjørneklett, "Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks," Solar Energy Materials and Solar Cells 95, 2011, pp. 1131-1137.

A. Halm, V. Mihailetchi, G. Galbiati, L. Koduvelikulathu, R. Roescu, C. Comparotto, R. Kopecek, K. Peter, J. Libal, "The Zebra cell concept - large area n-type interdigitated back contact solar cells and one-cell modules fabricated using standard industrial processing equipment", Proceedings of the 27th EUPVSEC, Frankfurt am Main, Germany, 2012, pp. 567-570.

ASTM E 1040 (12.02) Physical Characteristics of Non concentrator Terrestrial photovoltaic Reference Cells. Specification for.

ASTM E 1328 (12.02) Relating to Photovoltaic Solar Energy Conversion, Terminology.

Barrera, P. (2009). "Simulación y caracterización de celdas solares multi-juntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales." (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional de General San Martín Comisión Nacional de Energía Atómica Instituto de Tecnología. República Argentina

Barrera, Fernández., (2010). Energía Solar. Energía Fotovoltaica Madrid: Liberfactory.

M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert, M. Karraß, R. Lippmann, M. Broddack and D. Wald, "Influence of manufacturing processes and sub-sequent weathering on the occurrence of cell cracks in PV modules," Proceedings of the 28th EUPVSEC, Paris, France, 2013, pp. 3275-3279.

Duran, J. C., Bruno, C. J., y Bolzi, C. G. (2002). "Convenio de cooperación CONAE-CNEA: Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas." Profesional Independiente, 20(1), 0329-5184.

Cengel, Y., y Hernán, P. J. (2004). "Transferencia de calor". México: McGraw-Hill

E. Wang, J. Yen, H.E. Yang, S. Chi, C. Wang, Failure modes evaluation of PV module via materials degradation approach, Energy Procedia 33 (2013) 256-264.

K.K.J. Lee, J. Park, K. You, H. Ahn, D. Han, Electrical characteristics of PV module according to optical characteristics of back-sheet, Korean Sol. Energy Soc. 11 (2008) 45-47.

R. Kahtri, S. Agarwal, I. Saha, S.K. Singh, B. Kumar, "Study on Long Term Reliability of Photovoltaic Modules and Analysis of Power Degradation Using Accelerated Aging Tests and Electroluminescence Technique", in: Proceedings of the 1st International Conference on Silicon Photovoltaics, Freiburg, Energy Procedia 8, 2011, 396–401.

S. Kajari-Schroder, I. Kunze, U. Eitner, M. Köntges, Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011) 3054–3059.

Solar Energy Materials & Solar Cells 95 (2011) 1131-1137: The risks of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to microcracks, [M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser, B. Bjorneklett].

## Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica

### Numerical integration of the energy consumption by current measurements to determine the useful life of the lathe tool

MARIN-MARIN, Rafael†\*, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma

CIATEQ A.C.

Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex)

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Rafael, Marin-Marin* / ORC ID: 0000-0002-6495-1716, Researcher ID Thomson: E-1385-2018, CVU CONACYT ID: 670535

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Carlos, Juárez-Toledo* / ORC ID: 0000-0002-7440-3246, Researcher ID Thomson: C-1368-2016, CVU CONACYT ID: 39912

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Irma, Martínez-Carrillo* / ORC ID: 0000-0002-7952-4418, Researcher ID Thomson: B-9264-2016, CVU CONACYT ID: 39914

Recibido Mayo 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

#### Resumen

El estudio del ahorro de energía en los procesos industriales se ha vuelto una prioridad en cualquier empresa, lograr reducir el uso de los recursos energéticos en las empresas las hacen más rentables, competitivas y amigables con el medio ambiente. El objetivo de esta tesis es determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno multihusillo para maquinaer acero al carbón 1045. Para determinar el desgaste que sufre la herramienta se aplica en cada proceso de maquinado la integral numérica a la corriente. Se muestra gráficamente como a medida que la herramienta pierde su propiedad de corte el gasto energético aumenta, incrementando el costo de manufacturación. La contribución de esta tesis es tener un método numérico confiable que pueda determinar la vida útil de las herramientas de corte, investigaciones futuras serán encaminadas a realizar estudios de desgaste a diferentes velocidades de corte y poder determinar la velocidad óptima del maquinado.

**Integral numérica, Gasto Energético, Herramienta de corte**

#### Abstract

Energy saving study in industrial processes has become a priority for any company, energy efficiency in the industry contributes to decoupling economic growth and environmental impact. The Project aimed at improving energy efficiency for a specific industrial process. The focus of this work is to determine the useful life of the cutting tool of a multi-spindle lathe using a numerical tool. The lathe machine works with 1045 carbon steel. The article shows that the impact of current increase when the tool loses its cutting ability, and this increase the cost of each piece that the machine produce. The numerical integration tool is necessary for proper interpretation of the results, this includes the understanding of the data collection with a PLC program. Thus, determining the useful life of cutting tools the process is more efficient and may reduce the specific cutting energy. Future work will be directed to determine the optimum speed of machining.

**Numerical integral, Energy expenditure, Cutting tool**

**Citación:** MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 10-17.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (rlmnmn@hotmail.com)

## Introducción

Los métodos numéricos han ayudado a entender y cuantificar en las empresas parámetros, que contribuyen a hacer más eficientes los recursos tanto materiales como energéticos, ejemplo de ellos puede ser el proceso de combustión en un motor empleando mecánica de fluidos computacional (Mora & Mantilla, 2017).

Las técnicas de métodos finitos no están diseñadas para ser una herramienta de análisis energético, pero pueden contribuir de forma indirecta encontrando defectos prematuros en el proceso. Por ejemplo, en la industria aeronáutica estas herramientas son utilizadas para determinar formas aerodinámicas por medio de la simulación computacional, de esta manera optimizan el uso de combustibles. (Botello Rionda, 2006), La simulación aerodinámica de los autos eléctricos se utiliza para optimizar la eficiencia energética, donde los modelos son analizados mediante sofisticados programas que hacen uso de métodos numéricos (Paire & Peiro, 1992).

El maximizar el uso de las energías no renovables se ha convertido en una gran tendencia y necesidad en los últimos años (Qianqian Zhong, 2016), cada vez el sector industrial exige producir más con menos recursos. Para poder cuantificar el consumo de la energía que los equipos industriales se usan sensores de corriente los cuales se han tomado relevancia ya que ayudan a determinar el punto de partida del consumo actual y muestra si las medidas tomadas realmente ayudan a mejorar el uso del recurso energético (Jamaica González, Diciembre 2015).

Dentro de la industria metal mecánica, se han desarrollado diferentes investigaciones con la finalidad de maximizar el uso de los recursos, como el de monitorear la temperatura de los metales mientras se realiza el maquinado (J.M. Longbottom, 2005), además de la temperatura hay otros factores que desempeñan roles muy importantes como son la velocidad del husillo, avances de corte, alteraciones metalúrgicas en la superficie maquinada (Ajay Goyal, 2014), el uso de sonidos que produce la herramienta de corte para determinar su estado (Kai-feng Zhang, 2015) La vida útil de una herramienta de corte también estará en función de la cantidad de material que esta renueve (Luis W. Hernández González, 2011).

Actualmente existen métodos para extender la vida útil de las herramientas industriales sometidas a desgaste, ejemplos de ellos puede ser el propuesto por Hernández en 2015, el cual consiste en una aplicación del tratamiento térmico criogénico la cual puede elevar la vida útil de la herramienta hasta en un 300%.

La presente tesis tiene como finalidad determinar la relación entre una herramienta de corte que se desgasta en una jornada laboral habitual y el consumo de corriente del motor. El objetivo es identificar los cambios del consumo de energía y determinar el cambio óptimo de la herramienta y esto ocurrirá cuando el motor consuma una mayor corriente debido al desgaste del filo de la herramienta de corte.

La máquina donde se realiza el análisis consiste en un torno multihusillo en la cual por políticas de la empresa se realiza el cambio de herramienta en cada remplazo del turno de la jornada laboral. Midiendo la intensidad de corriente en amperes por medio de un PLC de captura de datos, durante seis ciclos de 5 minutos cada uno y desfasados una hora se pretende tener una bitácora de la variación del gasto energético con respecto al proceso de desgaste de una herramienta nueva hasta que es cambiada.

Con este estudio se busca determinar la variación de los consumos de energía de la máquina verificando que tan oportunos son los cambios de la herramienta o, si es necesario realizarlos antes de los programados y de esta manera evitar un consumo en energía eléctrica extra por una herramienta en malas condiciones.

Debido a que el PLC utilizado realiza capturas en el tiempo del amperaje de la máquina se puede usar la integral numérica para cuantificar el gasto energético, determinando el área bajo la curva de diferentes muestras, para este caso son las lecturas de corriente del motor.

En esta tesis se presenta un modelo numérico basado en la integral especial de Simpson  $\frac{3}{4}$  de la corriente de la herramienta de corte de un torno, para determinar el momento del cambio óptimo.

### Métodos de integración numérica aplicados al cálculo del gasto energético de un torno

En la industria es muy recurrente el uso de métodos numéricos para resolver problemas que por su naturaleza es difícil de obtener algebraicamente, ejemplo de ello es la integral numérica la cual determina el área bajo la curva de un fenómeno físico con buena precisión. (Chapra & Canale, 2007).

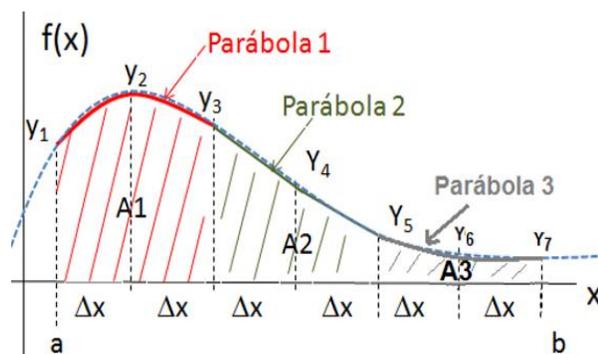
Existen investigaciones que han sido orientados a medir los desgastes en la herramienta (Castillo-Castaneda, 2006), pero no miden las repercusiones de los aumentos de energía por usar herramientas gastadas. En esta tesis se incorpora un PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley sobre el carro donde se ubica la herramienta de corte de un torno.

La herramienta donde se ubica el estudio es la que ejerce mayor fuerza y desgaste durante el proceso de maquinado de las conexiones que se fabrican, Esta máquina utiliza barras hexagonales las pueden girar hasta 1000 revoluciones por minuto y es en donde la herramienta sufre un mayor desgaste ya que desbastan las aristas de la barra y retiran la mayor cantidad de material excedente de una barra de acero, dejando la pieza cercana al producto final.

La ecuación de Simpson es una herramienta confiable que consiste en determinar el área bajo la curva de una señal discreta (Chapra & Canale, 2007). La herramienta puede ser intuitiva y consiste en determinar curvas o polinomios de grado dos, es decir, áreas bajo la curva descritas por la siguiente ecuación.

$$A_s = A_1 + A_2 + A_3 \quad (1)$$

Donde  $A_s$  representa el área total aproximada de la suma de las áreas de las parábolas individuales  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ , ver figura 1.



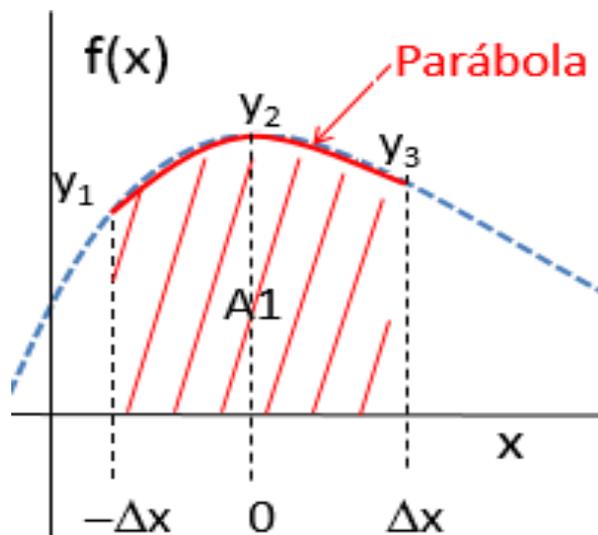
**Figura 1** Integración de Simpson

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 1  $f(x)$  corresponde al valor de las corrientes ( $y_1, y_2, \dots, y_7$ ) determinado por el PLC en Amperes, mientras  $\Delta x$  es el paso de iteración constante de la toma de muestra de 300 s. Para determinar el área de cada parábola individual de los arcos de la figura 1, se puede utilizar la forma general de segundo orden expresada por la siguiente ecuación.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

donde para la primera parábola los términos  $a$ ,  $b$  y  $c$  se deben reemplazar usando los términos de las corrientes conocidas  $y_1, y_2, y_3$ . Una manera más simple de determinar la primera parábola consiste en trasladar el origen a  $y_2$  ver figura 2.



**Figura 2** Integración de Simpson

Fuente: Elaboración Propia

Evaluando en los extremos tenemos se obtiene

$$\frac{a\Delta x^3}{3} + \frac{b\Delta x^3}{3} + c\Delta x - \left( -\frac{a\Delta x^3}{3} + \frac{b\Delta x^3}{3} - c\Delta x \right) \quad (3)$$

Donde es fácil mostrar que el gasto energético para el primer intervalo de tiempo es (Smith, 2002).

$$Ap1 = \frac{\Delta x}{3} (2a\Delta x^2 + 6c) \quad (4)$$

Sustituyendo los puntos conocidos  $(-\Delta x, y1)$ ,  $(0, y2)$  y  $(\Delta x, y3)$  en la ec. 2 se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} y1 + y3 = 2a\Delta x^2 + 2c \\ y2 = c \end{cases} \quad (5)$$

Por lo que el gasto energético para la primera área en términos de las corrientes conocidas del PLC, está determinada por:

$$Ap1 = \frac{\Delta x}{3} (y1 + 4y2 + y3) \quad (6)$$

De forma general la suma del gasto energético de todas las áreas es:

$$\Delta As = \frac{\Delta x}{3} [y_1 + y_{n-1} + 4(y_2 + y_4 + y_4 + \dots + y_n) + 2[y_1 + y_3 + y_5 + \dots + y_{n-1}]] \quad (7)$$

Haciendo uso de herramientas de computo se puede generar el código para determinar el área bajo la curva y de esta manera cuantificar la corriente que el motor consume en el ciclo de maquinado.

## Experimentación

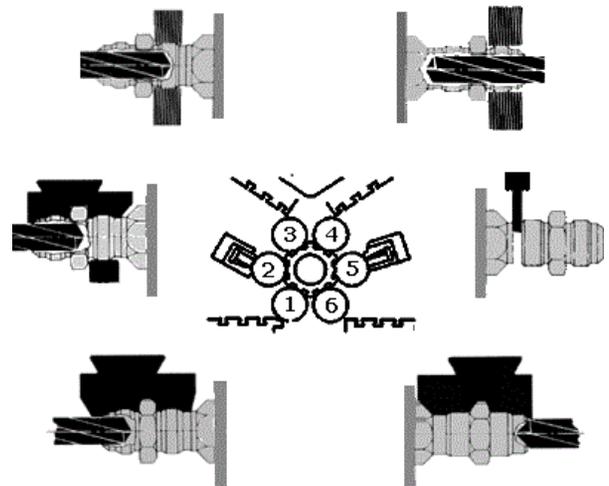
### Descripción del proceso de maquinado

La máquina donde se realiza el estudio de gasto energético tiene como finalidad fabricar conexiones de acero de diferentes formas y características, usadas para la conducción de fluidos y gases en diversos sectores de la industria.

Concretamente consiste en un torno de seis husillos (ACME 1 ¼ RB6) con control numérico basado en un CPU de procesador Intel, cuenta con un total de 5 carros de corte frontal, dos de corte lateral de un eje y 2 de corte lateral de dos ejes. Además, tiene un motor principal es de 50 HP controlado mediante un variador de velocidad de la marca SIEMENS.

Para los carros frontales y laterales de un eje se controlan mediante drives COMPUMOTOR de la SERIE ZX que son controlados mediante un puerto serial desde una tarjeta STARGATE instalada en el CPU y para los carros laterales de dos ejes se controlan mediante un amplificador SINUMERIC de la marca Siemens.

Las herramientas que usualmente se instalan en los carros laterales de un eje, son cuchillas de corte para tronzar la pieza finalizada y herramientas de forma para corte, para los carros laterales de dos ejes se utilizan normalmente para la fabricación de cuerdas y los carros frontales se instalan de forma regular brocas, machuelos. En la figura 3 se muestra una distribución de los componentes de la máquina.



**Figura 3** Diagrama esquemático

Fuente: <http://multispindle.com/>

La figura 3 muestra un diagrama general de la distribución de las herramientas. La máquina en la cual se realizó el estudio cuenta con seis husillos donde las posiciones 1 y 6 generalmente se instalan las herramientas de forma. En las posiciones 3 y 4 se realiza el maquinado de cuerdas y en las posiciones 2 y 5 se instalan las brocas.

La herramienta que se analiza es una herramienta de forma, la cual lleva este nombre porque la herramienta tiene maquinada la forma de la pieza que se desea obtener del maquinado, esta herramienta se puede apreciar en la figura 4.



**Figura 4** Herramientas de forma

Fuente: <https://tools.leistritz.com/en/products/tools-overview/flat-form-tools.html>

Las ventajas de la máquina para realizar el estudio son las siguientes:

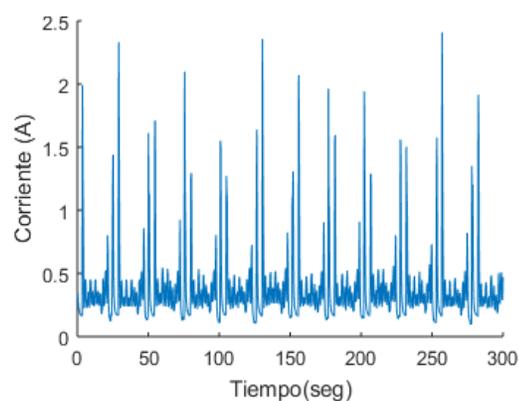
- La fácil instalación del PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley con un módulo analógico de 16 bits y un sensor de corriente de la marca LEM instalado en el motor que controla el avance de la herramienta de corte,
- Por el amplio tiempo de operación el cual para cada pieza es de aproximadamente 25 segundos con 8 horas efectivas de trabajo divididas en dos turnos de lunes a viernes con un cambio de herramientas por turno. La cantidad promedio de piezas por día es de 2000.

Las condiciones de ajuste de la máquina y durante todo el proceso son: velocidad en los husillos de 800 rpm, la velocidad de corte parametrizado a 1.2 milésimas de pulgada por revolución. La herramienta de forma desbasta de un diámetro de 0.75 de pulgada a 0.68 de pulgada en una longitud de 1.2 pulgadas, cabe mencionar que la máquina cuenta con dos herramientas de forma:

- La primera sirve para aproximar sin proporcionar el acabado final
- La segunda que es la que determina el acabado final.

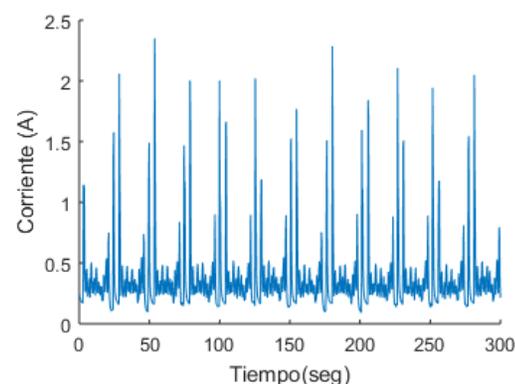
El estudio se realiza con la primera herramienta ya que es la que se encuentra sometida a un mayor desgaste.

La herramienta de forma se fabrica con un acero M2 y se usa mediante una máquina de corte por hilo, la herramienta después de ser sometida al proceso de corte entra a un proceso de temple para obtener un grado de dureza de entre 62 y 64 hrc. El acero M2 aleado al tungsteno y molibdeno es usado en herramientas de corte, debido a que mantiene el filo y tiene resistencia al desgaste (Aceros SISA, 2012). A continuación, se muestra el comportamiento del consumo de corriente de las primeras cinco horas de maquinado (ver figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10).



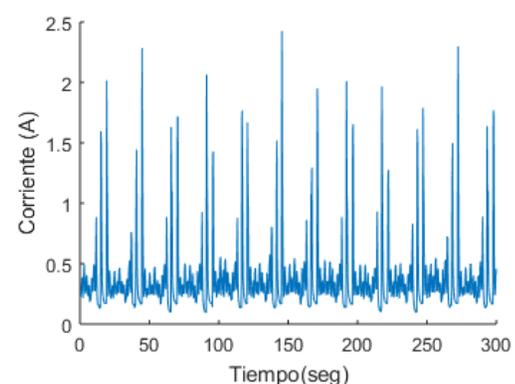
**Figura 5** Muestra 1, inicio de jornada laboral

Fuente: *Elaboración Propia*



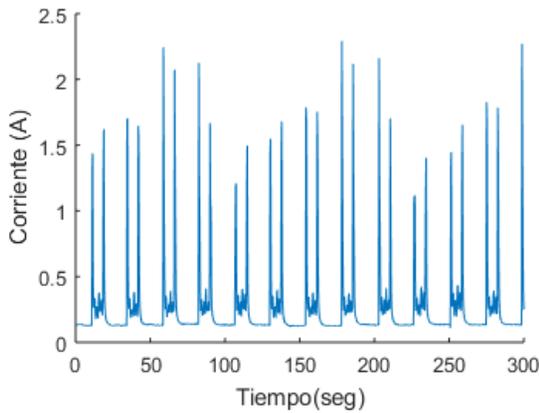
**Figura 6** Muestra 2, herramienta con una hora de trabajo en condiciones normales

Fuente: *Elaboración propia*

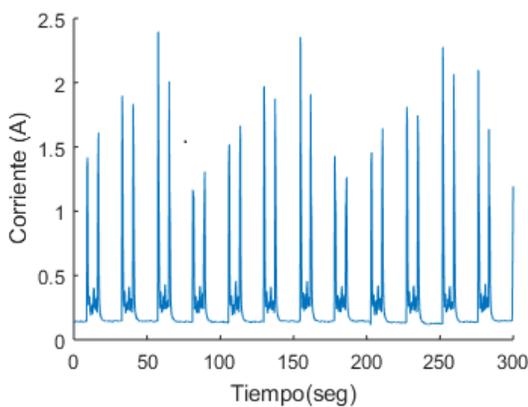


**Figura 7** Muestra 3, herramienta con dos horas de trabajo en condiciones normales

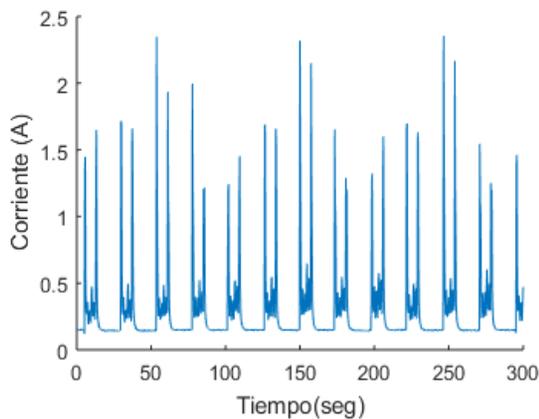
Fuente: *Elaboración propia*



**Figura 8** Muestra 4, herramienta con tres horas de trabajo en condiciones normales  
Fuente: *Elaboración Propia*



**Figura 9** Muestra 5, herramienta con cuatro horas de trabajo en condiciones normales. Fuente: *Elaboración Propia*



**Figura 10** Muestra 6, herramienta con cinco horas de trabajo en condiciones normales y antes del cambio de turno y herramienta  
Fuente: *Elaboración Propia*

En las figuras 5 a la 10 se muestran los casos de estudio que corresponden a las 6 muestras de corrientes tomadas desde inicio de operación hasta el cambio de turno. Como puede notarse en las figuras de corriente (figuras 5-10) lo ciclos de maquinado quedan definidos por medio de dos picos de corriente, para cada 300 segundos aproximadamente se realizan 12 maquinados.

Como puede notarse en la evolución de las figuras 5 a la 10 a medida que la herramienta se desgasta la cantidad de ruido tiende a disminuir ya que existe menos contacto con la pieza.

Muestra	Tiempo efectivo de trabajo (hora)	Gasto energético (A*s)
1	0	111.4004
2	1	72.9302
3	2	75.1728
4	3	52.6908
5	4	53.7695
6	5	58.2813

**Tabla 1** Resumen de mediciones  
Fuente: *Elaboración Propia*

Haciendo uso de la ecuación 7 se determina el gasto energético mostrado en la tabla 1 durante las primeras 5 horas de trabajo con una herramienta nueva. En la tabla 1 se muestra que el consumo de energía tiende a disminuir hasta la tercera hora de trabajo (marcado en gris) y comienza en a incrementarse a partir de la cuarta hora.

La corriente tiene un descenso marcado en la primera hora lo cual hace suponer que el avance de corte de la herramienta no es el adecuado, provocando que se ejerza una presión adicional sobre el material al cortar (Pradeep Kumar Patil, 2016). Debido a que es un proceso repetitivo la cantidad de material que devasta la herramienta de corte es constante en todos los ciclos,

En la tabla 2 se presentan los picos de corriente de cada una de las seis muestras, dichos picos son producidos en cada inicio y final de maquinado, es decir por el arranque y paro del motor.

Muestra	Pico de corriente (A)
1	2.4092
2	2.3493
3	2.4262
4	2.2920
5	2.3969
6	2.3554

**Tabla 2** Picos de corriente por muestra  
Fuente: *Elaboración Propia*

Es importante recordar que durante las cinco horas de trabajo se realiza la misma extracción de material en todas las muestras.

	Trabajo (Horas)	Gasto energético (A*s)
Corriente actual	5	424.245
Corriente Propuesta	5	312

**Tabla 3** Comparativa consumo actual contra corriente de menor consumo de la tabla 2

Fuente: *Elaboración Propia*

La tabla 3 muestra un posible escenario que se obtendrían al disminuir la demanda de corriente para en las primeras horas de trabajo, tomado la corriente de la muestra 4 de la tabla 2 como un estándar para las 5 horas de trabajo se tendría un consumo total de 312 amperes aproximadamente contra lo los 424.245 amperes actuales, implicando un área de oportunidad de ahorro del 26%.

## Conclusiones

La administración energética de los procesos industriales es una medida que toman las empresas para reducir costos de producción y ser competitivos en el mercado global. En esta tesis se presenta un estudio de energía de una máquina que opera 8 horas de las cuales se toman los datos de las primeras 5 horas de trabajo en una jornada diaria, se monitorea la corriente en la herramienta de mayor desgaste por medio de un PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley con un módulo análogo de 16 bits y un sensor de corriente de la marca LEM.

El objetivo de la tesis es cuantificar por medio de la integral numérica el gasto energético de un proceso repetitivo, determinado la relación de desgaste de la herramienta contra el aumento de la corriente eléctrica. Para evaluar el método planteado se utilizó un proceso de lote de producción de entre 1000 a 1500 piezas por turno, el diagrama esquemático de la máquina utilizada se muestra en la figura 3. Es importante mencionar que durante todo el estudio la cantidad de piezas elaboradas y los parámetros de la máquina se mantienen constantes (avances de corte, aceites de corte, espesor de maquinado y velocidades de los husillos).

El estudio demuestra que se tiene un problema al inicio de la vida útil de la herramienta ya que el avance de corte no es el adecuado y la máquina requiere de mucho mayor energía para realizar la operación como se aprecia en la tabla 1 donde el área bajo la curva es de 111 amperes comparado con los 75 amperes después de haber trabajado 3 horas.

Si la cantidad de corriente usada es mayor con una herramienta nueva comparada contra la corriente después de haber trabajado por tres horas, se considera necesario realizar un estudio para optimizar la velocidad de corte de la herramienta sobre la cual se está realizando el estudio al inicio del turno.

De los datos obtenidos se puede observar también que la corriente tiende a incrementarse después de haber alcanzado un mínimo que es de 52.6 amperes como se aprecia en la tabla 1 y terminando el estudio con una lectura de 58.2 amperes lo que podría indicar el desgaste de la herramienta.

Para tener una mejor visión del fenómeno es conveniente realizar un análisis de caracterización de la herramienta en cada hora de su proceso, lo cual resulta inviable económicamente para la empresa. Investigaciones futuras estarán encaminadas a optimizar los avances de corte de los diferentes aditamentos y, con base en la información se podrá determinar la viabilidad económica.

En esta tesis se fundamentan las bases para realizar una inversión de un sistema de monitoreo de la corriente, para optimizar la sustitución de los herramientas.

## Referencias

- Ajay Goyal, S. D. (2014). A Study of Experimental Temperature Measuring Techniques. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 82 - 93.
- Botello Rionda, S. (2006). Ejemplos de Aplicación de los Métodos Numéricos. *Centro de Investigación en Matemáticas*.
- Castillo-Castaneda, G. d.-R. (2006). UN METODO DE MONITOREO DEL DESGASTE DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE. *Ingeniare • Revista Chilena de Ingeniería*, 124-129.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. Mexico : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- J.M. Longbottom, J. L. (2005). Cutting temperature measurement while machining. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 122–130.
- MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica. *Revista de Ingeniería Eléctrica*. 2018.

Jamaica González, A. O.-Z.-O.-S. (Diciembre 2015). Sensores de corriente aplicados al ahorro de energía en iluminación. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 224-229.

Kai-feng Zhang, H.-q. Y. (2015). A method for tool condition monitoring based on sensor fusion. *Springer Science+Business Media New York*, 1011-1026.

Luis W. Hernández González, R. P. (2011). Efecto del volumen de metal cortado y de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta durante el torneado de alta velocidad del acero AISI 1045. *Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte*, 61-83.

Pradeep Kumar Patil, A. I. (2016). Measurement and analysis of cutting forces. *International Journal of Structural*, 359-369.

Qianqian Zhong, R. T. (2016). Evaluation on models of calculating energy consumption in metal. *Int J Adv Manuf Technol*, 2087-2099.

Smith Allen (2002). Analisis numeric. PHH Prencice Hall, 3017-323

## Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados

### Study of the electrical conductivity in electrical nanocomposites with disordered nanotubes

MEDINA-ÁNGEL, Gustavo<sup>†</sup>\* & BURLAK, Gennadiy

CIICAp, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad 1001, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62209.

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Gustavo, Medina-Ángel* / ORC ID: 0000-0002-0279-3492, Researcher ID Thomson: G-7236-2018, CVU CONACYT ID: 624958

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Gennadiy, Burlak* / ORC ID: 0000-0003-4829-8435, Researcher ID Thomson: T-7967-2018, CVU CONACYT ID: 20332

Recibido Mayo 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

#### Resumen

Estudiamos la conductividad eléctrica de nano compuestos en una rejilla de tres dimensiones (3D) incorporando nano tubos de carbono (CNT) de forma aleatoria dentro del sistema. Nosotros variamos la longitud y radio de los nanotubos utilizando una distribución normal (Gauss) y generamos una posición aleatoria del nano tubo dentro del sistema usando el método Monte Carlo. La conductividad del sistema es asociada al fenómeno crítico de percolación en los CNT, en donde la intercepción o contacto entre los nano tubos crean un clúster infinito que es capaz de transmitir la conductividad eléctrica. Nosotros calculamos la probabilidad mínima necesaria para la transmisión de conductividad, mediante la técnica de optimización global en paralelo que permite estudiar el comportamiento de la conductividad en nano compuestos. Este enfoque nos permite estudiar los detalles de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos, incluso al nivel de las fluctuaciones de filtración en materiales a nano escala en el campo de la ingeniería y conductividad en los materiales.

#### Nano-Compuestos, Conductividad, Percolación

#### Abstract

We study the electrical conductivity of a three-dimensional (3D) nanocomposite with incorporated random carbon nanotubes (CNT) within the system. We varied the length and radius of the nanotubes using a normal distribution (Gauss) and generated a random position of the nano tube within the system using the Monte Carlo method. The conductivity of the system is associated with the critical phenomenon of percolation in the CNT, where the interception or contact in the nano tubes creates an infinite group that is capable of transmitting the electrical conductivity. We calculate the minimum probability necessary for the transmission of conductivity, by means of the technique of global optimization in parallel that allows to study the behavior of the conductivity in nanocomposites. This approach allows us to study the details of the electrical conductivity in electrical nanocomposites, even at the level of the fluctuations of filtering in nano-scale materials in the field of engineering and conductivity in materials.

#### Nanocomposites, Conductivity, Percolation

**Citación:** MEDINA-ÁNGEL, Gustavo & BURLAK, Gennadiy. Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 18-26.

<sup>†</sup> Investigador contribuyendo como primer autor.

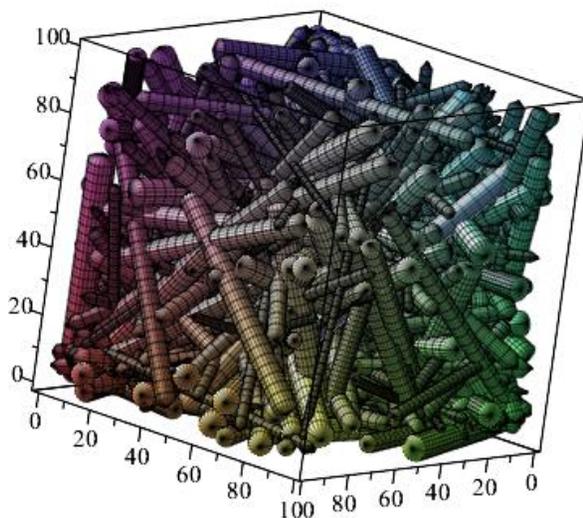
\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (gustavo.isc@hotmail.com)

## 1. Introducción

En la actualidad la industria de la ingeniería a apostado por la nanotecnología, aprovechando su tamaño para poder construir dispositivos más pequeños y resistentes [1], esto trae como consecuencia la creación de materiales conductores que puedan transmitir la información en forma de pulsos digitales o corrientes analógicas por medio de nano estructuras conductoras. Este artículo se enfoca al estudio de la conductividad a través de estas nano estructuras [2] [3].

Este estudio es analógico y aplicado en la percolación de los CNT(Nanotubos de carbono), debido a sus extraordinarias y variadas aplicaciones en la rama de la nano-ingeniería como son por ejemplo en la creación de sensores pizeoeléctricos [4], membranas artificiales, pinturas conductoras, textiles inteligentes [5], entre otras aplicaciones.

Nosotros estudiamos la percolación de los nanotubos de carbono en un sistema 3D [6], en donde implementamos cilindros que semejan la forma de los nanotubos de manera desordenada, con radios y longitudes de diferentes dimensiones tal como se muestra en la figura 1.



**Figura 1** Rejilla tridimensional de percolación con nanotubos desordenados  
Fuente: *Elaboración Propia*

## 2. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es encontrar una probabilidad crítica que satisfaga la percolación en la conductividad eléctrica, ya que esta probabilidad ayudaría a minimizar el ahorro en los materiales.

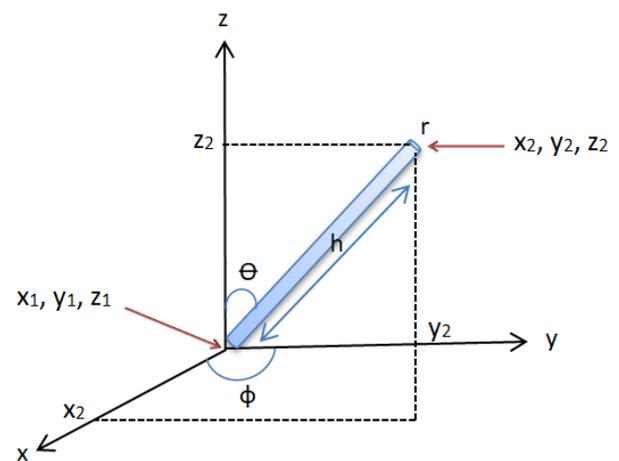
## 3. Objetivos Específicos

- Simular un sistema que represente los nanotubos de manera computacional.
- Encontrar el clúster infinito y la probabilidad crítica.
- Generar resultados para varias pruebas variando la longitud del cilindro.

## 4. Objeto Cilindro (Nanotubo)

Simulamos un cilindro en dimensiones nanométricas utilizando el esquema de programación orientada a objetos. Los valores importantes para poder representar un cilindro en nuestra rejilla son el radio  $r$  del cilindro, la longitud  $h$  del cilindro y su posición inicial así como su posición final, este último es determinado por los ángulos de orientación  $\theta$  y  $\varphi$ .

En la figura 2, se muestra un esquema de los valores que se necesitan para representar un nanotubo dentro del sistema, en donde  $x_1$ ,  $y_1$  y  $z_1$  son valores aleatorios que determinaran el punto inicial del cilindro,  $r$  y  $h$  son valores determinados por el usuario y la orientación  $\theta$  y  $\varphi$  son valores aleatorios.



**Figura 2** Esquema del nanotubo con sus parámetros y variables correspondientes.

Fuente: *Elaboración Propia*

Para obtener los valores  $x_2$ ,  $y_2$  y  $z_2$ , es necesario aplicar las ecuaciones 1, 2 y 3, ya que estos valores son determinados a partir de los puntos iniciales ( $x_1$ ,  $y_1$  y  $z_1$ ), ángulos de orientación ( $\theta$  y  $\varphi$ ) y longitud  $h$  del nanotubo [7].

$$z_2 = z_1 + h \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

$$y_2 = y_1 + h \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \quad (2)$$

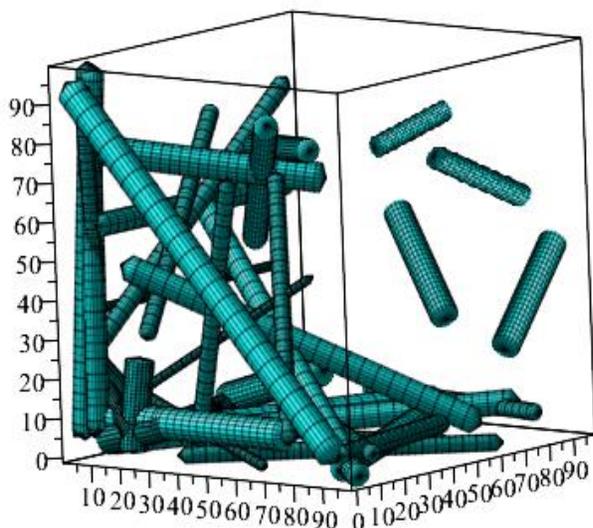
$$x_2 = x_1 + h \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \quad (3)$$

Se generarán varios cilindros en un arreglo tridimensional o rejilla 3D con valores aleatorios en sus posiciones y ángulos para cada uno de ellos, como se aprecia en la figura 2.

### 5. Percolacion y clústeres

Un clúster se genera cuando existe contacto entre dos o más nanotubos dentro de la rejilla [8], mientras que la percolación es el fenómeno que se da cuando la agrupación de estos nanotubos forma un clúster suficientemente grande que es capaz de atravesar la rejilla desde un punto hasta el otro extremo de la rejilla, a este clúster que atraviesa la rejilla de un extremo a otro es llamado clúster infinito.

En la figura 3, Se muestra una agrupación de cilindros formando un clúster, mientras que otros cilindros están separados y no forma parte de este clúster [9].



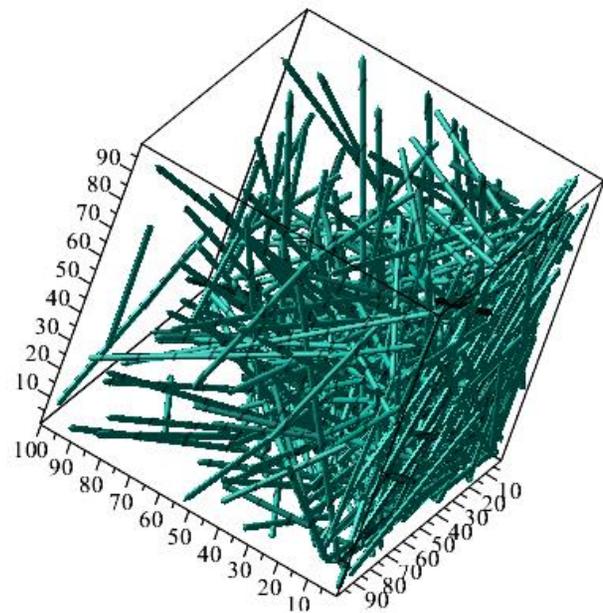
**Figura 3** Clúster formado por cilindros con  $P=0.01$

Fuente: *Elaboración Propia*

El número de cilindros está ligado directamente a la probabilidad  $P$ , que se asigne al generar el sistema, esta probabilidad puede tener un valor de 0 a 1, si asignamos un valor de probabilidad 0 a nuestro sistema, el arreglo estará vacío y ningún cilindro será generado, pero si asignamos el valor de 1, los arreglos contendrán un objeto cilindro para cada posición, mientras que si asignamos 0.5, en la mitad del arreglo contendrá un objeto cilindro y así sucesivamente para cada valor  $P$ , que se quiera estudiar.

El objetivo es encontrar una probabilidad con el cual se generen suficientes cilindros capaces de formar un clúster infinito que atraviese la rejilla y por lo tanto conducir la electricidad a través del sistema [10], esta probabilidad que es capaz de formar clústeres infinitos es también llamada Probabilidad crítica  $P_c$ .

En la figura 4, podemos observar un sistema conformado por cilindros agrupados formando un clúster infinito, donde a través de ella será conducida la corriente eléctrica. Los cilindros y clústeres que no forman parte de este clúster fueron eliminados para poder visualizar solo el clúster predominante, del cual podemos observar como algunos cilindros tocan el otro extremo de la rejilla [11].



**Figura 4** Clúster infinito con  $P=0.2$

Fuente: *Elaboración Propia*

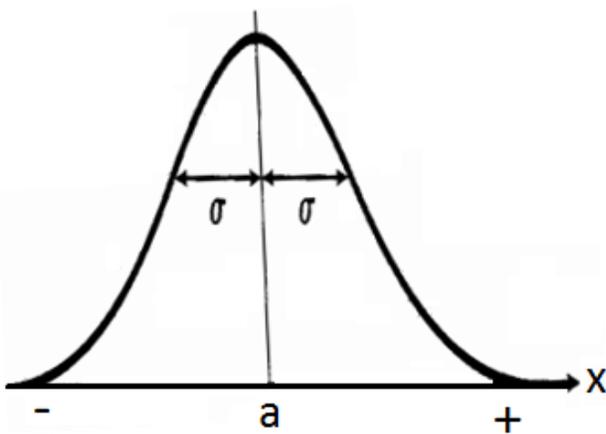
En la ingeniería, crear nanotubos de carbono con el mismo grosor y longitud no es posible, al menos no con la tecnología con la que ahora se cuenta, y al crearlas siempre existen un error en su uniformidad [12], es por ello que en este estudio aplicamos la distribución normal o distribución Gauss.

### 6.-Distribución Gauss

Aplicamos la distribución Gauss para nuestro estudio, ya que nos permite generar objetos con cierta desviación de error [13].

Nosotros aplicamos esta desviación al parámetro del radio  $r$  denominado como  $\mu r$  y al parámetro longitud  $h$ , denominado como  $\mu h$  y las desviaciones para estos parámetros son denominadas como  $\sigma r$  y  $\sigma h$ , respectivamente, estas últimas serán las desviaciones de error que se les aplicará a cada uno de los objetos cilindro, al crearlas en el sistema.

En la gráfica 1, se observa la distribución Gaussiana que se implementó para nuestro estudio, en donde  $a$ , es la medida idónea con el cual deben ser generados los nanotubos y  $\sigma$ , es el error que ocurre al crear nanotubos más chicos o más grandes respecto a la media.



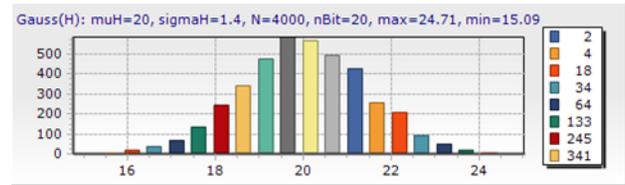
**Gráfico 1** Distribución Gauss  
Fuente: Elaboración propia

La distribución Gauss está regida por la siguiente ecuación:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

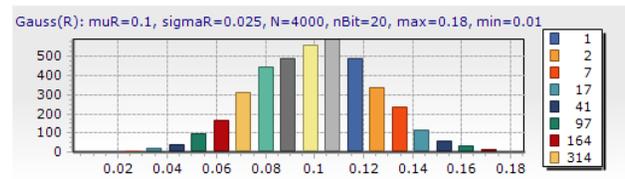
Dónde:  $a = (h, r)$  y  $\sigma$  es aplicable para “a”.

En las gráficas 2 y 3, se muestran los histogramas de los tamaños y longitudes de los nanotubos simulados como resultado de la ecuación 4 (Ecuación de Gauss). Podemos observar un máximo y un mínimo para su longitud y su grosor, estas serán el rango de medidas en las que se estarán generando los nanotubos simulados.



**Gráfico 2** Histograma de la distribución de Gauss de la longitud  $h$  de los nanotubos generado por  $\mu h = 20$  y  $\sigma h = 1.4$ , con una longitud máxima  $h_{max} = 24.71$  y una longitud mínima  $h_{min} = 15.09$ , se observa una distribución homogénea.

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 3** Histograma de la distribución de Gauss del grosor  $r$  de los nanotubos generado por  $\mu r = 0.1$  y  $\sigma r = 0.025$ , con un grosor máximo  $r_{max} = 0.18$  y un grosor mínimo de  $r_{min} = 0.01$ , se observa también una distribución homogénea.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se agregaron los nanotubos a la rejilla con sus correspondientes desviaciones, es necesario saber que cilindros pertenecen al clúster infinito, para ello es necesario analizar cada uno de los contactos que existen entre todos los cilindros en el sistema y eliminar los cilindros que no tengan contacto con algún clúster o clúster infinito.

### 7.-Contactos entre nanotubos

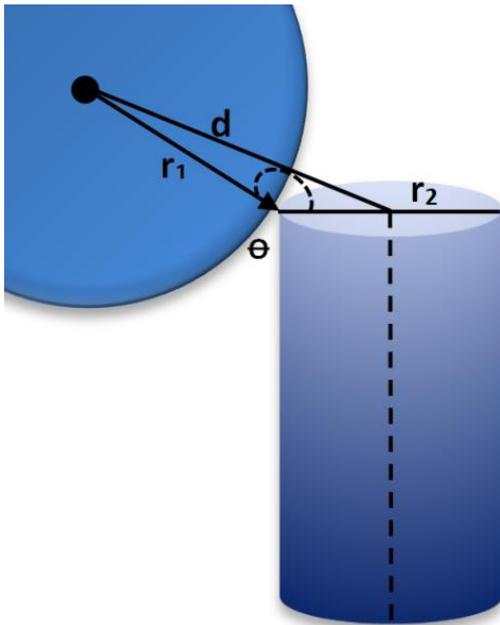
Para determinar los contactos entre los cilindros, se analiza un cilindro y se compara con todos los otros cilindros en el sistema, y se analiza si tiene un contacto entre sus radios  $r$  a través de toda su longitud  $h$  y determinada por la ecuaciones 5, 6 y 7.

$$d^2 = r_1^2 + 2r_1r_2 \cdot \cos(\theta) + r_2^2 \quad (5)$$

$$r_1^2 + r_2^2 - d^2 = -d \cdot r_1r_2 \cdot \cos(\theta) < 2r_1r_2 \quad (6)$$

$$r_1^2 + r_2^2 - d^2 < 2r_1r_2 \quad (7)$$

Dónde:  $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$ , para rangos de ángulos  $\cos(\theta)$ . En la figura 5, podemos observar un ejemplo esquemático entre el contacto entre dos cilindros,



**Figura 5** Contacto entre dos cilindros  
Fuente: *Elaboración Propia*

Se observa un primer cilindro con vista horizontal y con vista frontal con radio  $r_1$  y otro segundo cilindro vertical y perpendicular al primer cilindro con radio  $r_2$ , observamos que el contacto entre ellos generan un ángulo theta  $\theta$  y una distancia  $d$  entre los radios de los cilindros. Si la suma de los radios de los cilindros menos la distancia que existe entre sus radios es mayor a  $2r_1r_2$ , entonces existirá contacto entre estos dos objetos, tal como se determinan en la ecuación 7.

Se formarán varios clústeres agrupados por contactos entre los cilindros pero solo aquellos clústeres que tengan un contacto desde la posición inicial del arreglo  $L$ , y un contacto en la altura máxima del mismo arreglo se visualizara en la simulación del sistema y por lo tanto existirá percolación en el sistema.

## 8. Estructura de programación

Para la programación y generación de los resultados utilizamos como lenguaje de programación, Microsoft Visual C#, en su versión 2017. Se crearon 4 clases principales; la primera clase **Cilindro**, donde se construye el objeto cilindro que simulará cada uno de los CNT, la segunda clase **ArrayCilindros**, la cual contiene varios objetos en la rejilla, en esta clase se define si existe o no percolación para una determinada probabilidad  $P$  y también se obtiene el volumen de clúster infinito sobre total de los cilindros en el sistema  $P(p)$ .

La tercera clase, **ParallCilindros** se encarga de realizar varias calculaciones para una distribución de  $P$  en paralelo usando la librería TPL (Task Parall Label) de C# [14], ya que para cada probabilidad puede existir o no clústeres infinitos, es por ello que se necesitan calcular varias pruebas variando  $P$ , en donde se tienen que definir una probabilidad inicial, una probabilidad final y el número pruebas que se quieren distribuir en la probabilidad, de esta manera se distribuyen  $N$  probabilidades en un rango de probabilidad a estudiar.

## 9. Resultados

Un ejemplo de la distribución de  $N$  probabilidades sobre una distribución Probabilidad inicial-Probabilidad final se muestra en la tabla 1, donde existe una probabilidad inicial de 0.01 hasta 0.2, y 10 ejecuciones en paralelo, cada ejecución corresponde a un sistema o rejilla  $L$  con el mismo tamaño, pero diferente probabilidad  $P$  entre ellas. En donde  $L$  es un arreglo cubico de  $n \times n \times n$ .  $P_b$  es la correspondencia que existe del volumen total de los cilindros entre el volumen que hay en los cilindros agrupados en el clúster infinito que es determinada por la ecuación 8.

$$P(p) = \frac{\sum_0^L v}{\sum_C^C v} \quad (8)$$

Dónde:  $L$ =Tamaño del arreglo,  $C$ =Tamaño del clúster y  $v$ =Volumen del cilindro.

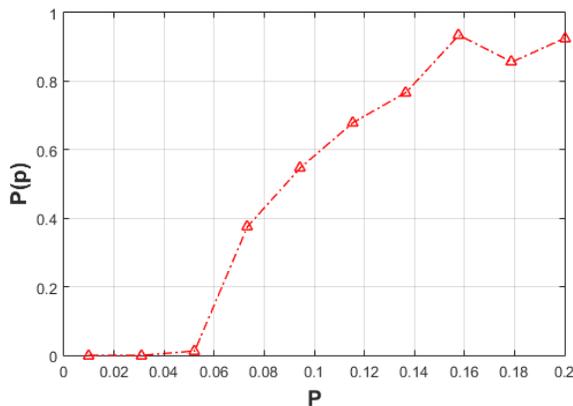
N	Probabilidad	Pb
1	0.01	0.00422535211267606
2	0.0311111111	0.0726643598615917
3	0.0522222222	0.334449884050502
4	0.0733333333	0.686885549990725
5	0.0944444444	0.844773960216998
6	0.1155555556	0.952211338676165
7	0.1366666667	1.00441944556047
8	0.1577777778	1.00013037809648
9	0.1788888889	1.00600046157397
10	0.2	1.01206854936037

**Tabla 1** Se muestran los resultados hechos para un rango de probabilidad de 0.01 hasta 0.2 con 10 probabilidades distribuidas en ese rango

Fuente: *Elaboración Propia*

De la tabla 1, podemos observar que existe percolación a partir del valor de probabilidad de 0.0522222222, que se encuentra sombreada de azul en la tabla, para los valores posteriores a este, existen clústeres infinitos.

Los valores utilizados para las dimensiones del cilindro fueron: longitud del cilindro:  $\mu_h=20$  nm, grosor del cilindro:  $\mu_r=0.1$  nm, y con desviaciones de  $\sigma_h=1.4$  en su longitud y  $\sigma_r=0.025$  en su grosor, donde nm es la unidad básica para 1 nanómetro [15]. En el gráfico 4, también se puede apreciar el volumen del clúster para cada prueba que está asociada a la conductividad eléctrica “S” [16]. Podemos observar que conforme aumenta la probabilidad, el volumen en el clúster aumenta.



**Gráfico 4** Se muestra el comportamiento de  $P(p)$  volumen de los cilindros en la rejilla para 10 calculaciones, entre las probabilidades: 0.01 hasta 0.2  
Fuente: *Elaboración Propia*

Las pruebas realizadas para cada calculación en paralelo fueron aproximadamente de 45 minutos a 1 hora en una computadora Dell Intel (R) core (TM) i7-6700HQ de 64 bits, a 2.60 GHZ con 8 GB de RAM de almacenamiento.

**10. Ajuste de los resultados**

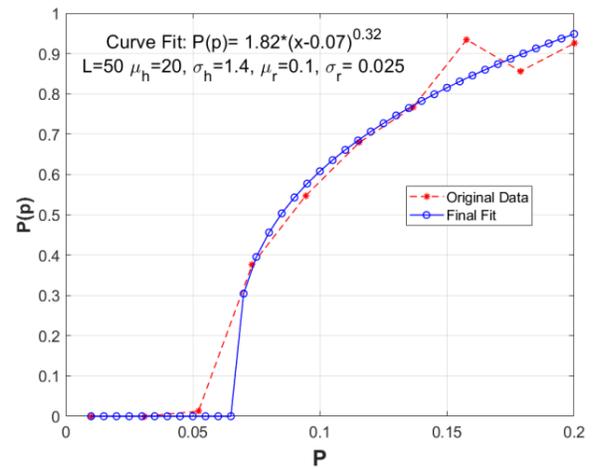
A partir de los datos de la tabla 1, podríamos tener una idea de que valor para  $P$  que es necesario para poder obtener clústeres infinitos, y conseguir metales conductores, más sin embargo, en el rango de calculación entre cada probabilidad existen muchos valores que no se analizaron, ya que  $P$  puede ser demasiado finito como cualquier número.

Es por ello que se realizó un ajuste numérico de los datos [17], utilizando la función *Fit* en Matlab a los resultados anteriores determinados por la ecuación:

$$P(p) = b(p - pc)\beta \tag{9}$$

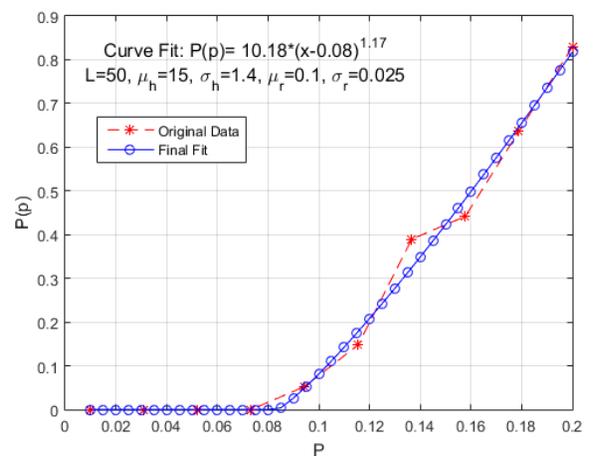
Dónde:  $b$ ,  $pc$  y  $\beta$ , son constantes.

En la gráfica 2 podemos apreciar la aplicación de la función *Fit* a los valores de la gráfica 1.

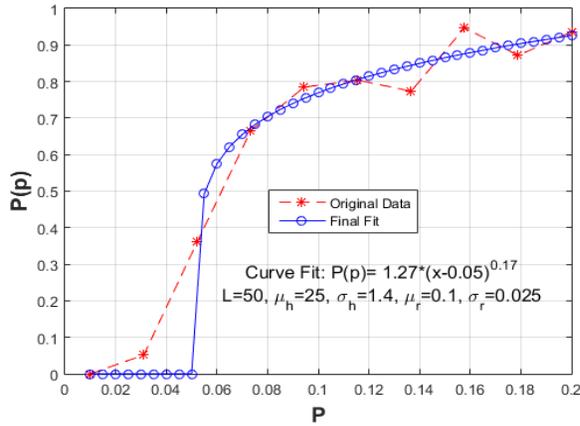


**Gráfico 5** Datos ajustados de la gráfica 4, en un rango de probabilidad  $P=0.1$  a  $0.2$ , con valores de:  $L=50$ ,  $\mu_h=20$ ,  $\sigma_h=1.4$ ,  $\mu_r=0.1$  y  $\sigma_r=0.025$   
Fuente: *Elaboración Propia*

De la gráfica 5, podemos observar la aplicación de la función *Fit*, en donde obtenemos los resultados para la función:  $P(p)=b(p-pc)\beta$ , donde  $b=1.82$ ,  $pc=0.07$  y  $\beta=0.32$ . En la gráfica 6, observamos otro ejemplo de la aplicación de la función *Fit*, pero para un  $\mu_h$ , más pequeña:  $\mu_h=15$ , mientras que en el gráfico 7, aplicamos la misma función *Fit* pero para un valor  $\mu_h$  más grande:  $\mu_h=25$ , se puede observar que las tres graficas tienen una variación diferente dependiendo del valor de  $\mu_h$ .



**Gráfico 6** Datos ajustados en un rango de probabilidad  $P=0.1$  a  $0.2$ , con valores de:  $L=50$ ,  $\mu_h=15$ ,  $\sigma_h=1.4$ ,  $\mu_r=0.1$  y  $\sigma_r=0.025$ .  
Fuente: *Elaboración Propia*



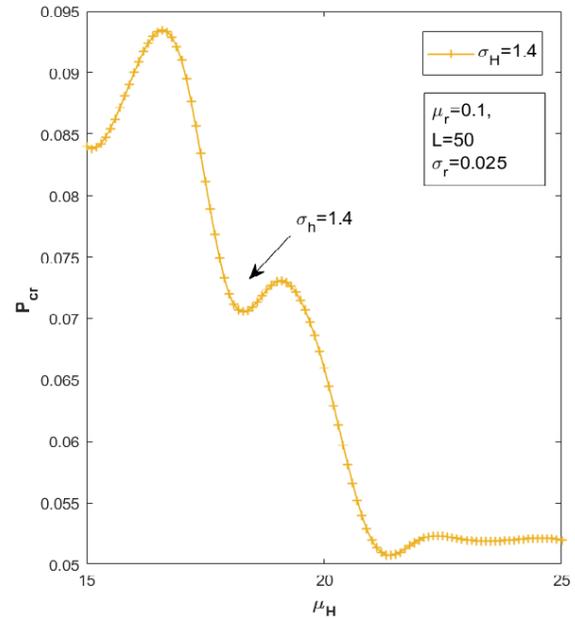
**Gráfico 7** Datos ajustados en un rango de probabilidad  $P=0.1$  a  $0.2$ , con valores de:  $L=50$ ,  $\mu_h=25$ ,  $\sigma_h=1.4$ ,  $\mu_r=0.1$  y  $\sigma_r=0.025$   
 Fuente: *Elaboración Propia*

Realizamos una serie de pruebas variando el valor de la longitud del nanotubo simulado de 15 a 25 nanómetros (rangos típicamente usados en la generación de nanotubos en la ingeniería) en una rejilla con dimensiones  $L=50 \times 50 \times 50$ , conservando los mismos valores para el grosor del nanotubo  $\mu_r=0.1$  y su desviación  $\sigma_r=0.025$ , mientras que el valor para la desviación de su longitud es  $\sigma_h=1.4$ . En la tabla 2, podemos observar que para cada valor de  $\mu_r$ , obtenemos un valor de probabilidad crítica  $P_{cr}$ , que disminuye conforme aumentamos la longitud del nanotubo, esto es lógico, pues mientras más largo y grueso sea el nanotubo, hay más posibilidad de generar intercepción entre los nanotubos y por lo tanto clústeres infinitos, recordemos que la probabilidad crítica, entre más pequeña sea, será más el ahorro que podemos tener en cuanto a materiales, es por ello que es bastante importante encontrar una probabilidad crítica satisfactoria para  $\mu_h$  y  $\mu_r$ , para este artículo nosotros enfocamos este estudio hacia la longitud del cilindro  $\mu_h$  y para algunas desviaciones de sus desviaciones  $\sigma_r$ .

$\mu_h$	$L$	$\sigma_h$	$\mu_r$	$\sigma_r$	$P_{cr}$
15	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.084</b>
16	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.09</b>
17	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.091</b>
18	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.072</b>
19	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.073</b>
20	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.066</b>
21	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.052</b>
22	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.052</b>
23	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.052</b>
24	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.052</b>
25	50	1.4	0.1	0.025	<b>0.052</b>

**Tabla 2** Se muestran diferentes variaciones de longitudes del cilindro ( $\mu_h=15$  nanómetros hasta  $\mu_h=25$  nanómetros), que pueden simular en nuestro sistema  
 Fuente: *Elaboración Propia*

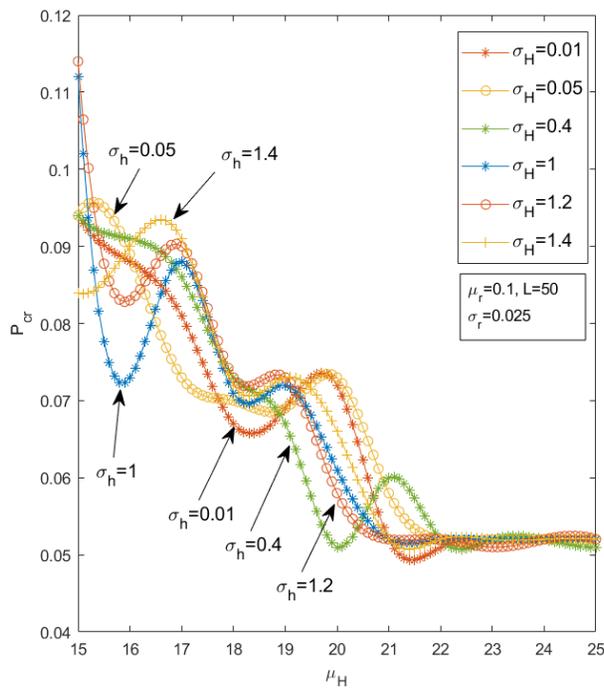
En el gráfico 8, se muestra el comportamiento de la tabla 2 aplicando un *Spline* de matlab [18], donde podemos observar una  $P_{cr}$ , que disminuye con nanotubos con longitudes mas largas. Podemos observar también que para longitudes cercanas a 25 nanómetros, se alcanza una  $P_{cr}$  más estable.



**Gráfico 8** Se muestra el comportamiento de  $P_{cr}$ , para varias pruebas en donde se varia la longitud del cilindro  $\mu_h$  de 15 a 25 nanómetros, para una desviación  $\sigma_h=1.4$   
 Fuente: *Elaboración Propia*

Realizamos algunas pruebas variando las desviaciones para el rango de  $\mu_h$  de 15 a 25 nanómetros y con otras desviaciones de: 0.01, 0.05, 0.4, 1, 1.2 y 1.4 nanómetros, en el gráfico 9 podemos observar el comportamiento de estas desviaciones para rangos  $\mu_h=15$  a 25 nanómetros. Podemos apreciar que para los valores de 0.001, 0.05, 0.4 los valores convergen aproximadamente en un rango de probabilidad crítica  $P_{cr}$  de 0.09 a 0.1 cuando los nanotubos miden 15 nanómetros a diferencia de las desviaciones mayores a 1, donde los valores de  $P_{cr}$ , caen por debajo de 0.09 o por encima de 0.1.

A partir del valor  $\mu_h = 22$  y valores mayores a este podemos observar que la probabilidad crítica se estabiliza sin importar la desviación que se les aplique. También observamos que las fluctuaciones en las curvas son muy similares en picos para los puntos en el eje  $X \rightarrow \mu_h$ .



**Gráfico 9** Se muestran los resultados graficados para los rangos de  $\mu_h = 12$  a  $25$  nanómetros pero con 6 desviaciones diferentes:  $\sigma_h = 0.01, 0.05, 0.4, 1, 1.2$  y  $1.4$ , con grosores de radio  $\mu_r = 0.1$  y  $\sigma_r = 0.025$  en una rejilla de dimensión  $L=50$  para las 6 curvas

Fuente: Elaboración Propia

## 11. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos del último gráfico podemos decir que existe cierta tendencia para alcanzar una probabilidad crítica pequeña cuando los nanotubos son largos, aproximadamente mayores o iguales a  $\mu_h = 22$  nanómetros y que las desviaciones no influyen cuando los nanotubos tienen este valor, pero sí influyen cuando son menores a este.

El  $P_{cr}$  más estable para todas las desviaciones en nuestras pruebas es aproximadamente de  $0.05$  para nanotubos mayores o iguales a  $22$  nanómetros y como consecuencia en este rango no habrá fallas en la conductividad eléctrica “S”, ya que el número de nanotubos y su volumen es bastante grande como para poder formar clústeres infinitos que conduzcan la electricidad de un punto a otro del medio.

Como trabajo a futuro se pretende implementar de manera conjunta las desviaciones en el grosor “ $\sigma_r$ ” y de longitud “ $\sigma_h$ ” del nanotubo, y de esta manera obtener más variaciones para nuestro caso de estudio.

## 12. Referencia

- [1] Rahman, R., & Servati, P. (2012). Effects of inter-tube distance and alignment on tunnelling resistance and strain sensitivity of nanotube/polymer composite films. *Nanotechnology*, 5(055703), 23.
- [2] Kuo-Chi Lin., Daniel Lee., Linan An., Young Hoon Joo. (2013). Finite-Size Scaling Features of Electric Conductivity Percolation in Nanocomposites. *Nanoscience and Nanoengineering*, 1(1), 15-22.
- [3] Estrella Laredo., Alfredo Bello., Mario Grimau., Defeng Wu. (2011). PERCOLACIÓN, UNIVERSALIDAD Y PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE NANOCOMPUESTOS POLÍMEROS/NANOTUBOS DE CARBÓN, PCL/PLA/NTC. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales.*, 2-3.
- [4] Herrera-May, A., AGuilEra-Cortés, L. A., Manjarrez, E., & González-Palacios, M. (2010). Sistemas nanoelectromecánicos: Origen, aplicaciones y Desafíos. *Interciencia*, 35(3), 163-170.
- [5] Otero, T. F. (2003). POLÍMEROS CONDUCTORES: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES ELECTROQUÍMICAS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4(4), 1-50.
- [6] Heng, Gu., Jiaojiao, Wang., Choongho, Yu. (2016). Three-dimensional Modeling of Percolation Behavior of Electrical Conductivity in Segregated Network Polymer Nanocomposites Using Monte Carlo Method. *Advances in Materials*, 1(1-8), 5.g
- [7] Bao, W. S., Meguid, S. A., Zhu, Z. H., & Meguid, M. J. (2011). Modeling electrical conductivities of nanocomposites with aligned carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 22(48), 485704.
- [8] Du, N., Zhang, H., Chen, B. D., Wu, J. B., Ma, X. Y., Liu, Z. H. & Tu, J. P. (2007). Porous Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanotubes Derived From Co<sub>4</sub>(CO)<sub>12</sub> Clusters on Carbon Nanotube Templates: A Highly Efficient Material For Li-Battery Applications. *Advanced Materials*, 19(24), 4505-4509.

- [9] Grujicic, M., Cao, G., & Roy, W. N. (2004). A computational analysis of the percolation threshold and the electrical conductivity of carbon nanotubes filled polymeric materials. *Journal of materials science*, 39(14), 4441-4449.
- [10] Lysenkov, E. A., Yakovlev, Y. V., & Klepko, V. V. (2013). Percolation properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes. *Ukrainian journal of physics*, 58(4), 378-384.
- [11] Kyrylyuk, A. V., Hermant, M. C., Schilling, T., Klumperman, B., Koning, C. E., & Van der Schoot, P. (2011). Controlling electrical percolation in multicomponent carbon nanotube dispersions. *Nature nanotechnology*, 6(6), 364.
- [12] Zdenko, Spitalskya., Dimitrios, Tasisb., Konstantinos, Papagelisb., Costas Galiotis. (2010). Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 357-401.
- [13] Hongqing ZHENG, Yongquan ZHOU. ((2012). A Novel Cuckoo Search Optimization Algorithm Base on Gauss Distribution. *Journal of Computational Information Systems*, 8(10), 4193-4200.
- [14] Sierra, F. J. (2013). *Enciclopedia de microsoft visual C# - 4a ed, 4 ed., Ra-Ma Editorial, S.A., 2013. . Ra-Ma Editorial.*
- [15] Zhao, X. B., Ji, X. H., Zhang, Y. H., Zhu, T. J., Tu, J. P., & Zhang, X. B. (2005). Bismuth telluride nanotubes and the effects on the thermoelectric properties of nanotube-containing nanocomposites. *Applied Physics Letters*, 86(6), 062111.
- [16] Asiaei, S., Khatibi, A. A., Baniasadi, M., & Safdari, M. (2010). Effects of carbon nanotubes geometrical distribution on electrical percolation of nanocomposites: a comprehensive approach. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(6), 818-829.
- [17] Peñuñuri F., Zambrano M., Acosta C., Zaragoza N. (2010). Ajuste de datos a modelos físicos usando Mathematica. *Ingeniería*, 14(1), 55-66.
- [18] Rodríguez, M. G. (2003). *Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.

## Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica

### Design of an intelligent photomechanical system with two degrees of freedom for the orientation of a photovoltaic panel for optimize the production of electrical energy

LÓPEZ-XELO, Hilario†\*, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Hilario, López-Xelo* / ORC ID: 0000-0001-6597-6598, CVU CONACYT ID: 732365

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *José Juan, Hernández-Medina* / ORC ID: 0000-0003-4625-2660, CVU CONACYT ID: 5227576

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Ma. Natividad, Romano-Rodríguez* / ORC ID: 0000-0002-3415-8629, CVU CONACYT ID: 640296

Recibido Mayo 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

#### Resumen

En la actualidad existe la imperiosa necesidad de optar por fuentes alternativas de energía a fin de lograr aminorar el impacto negativo de las actividades humanas en el medio ambiente. Una de estas fuentes lo constituyen los paneles solares fotovoltaicos. En este sentido, para que un panel solar produzca de forma óptima energía eléctrica debe estar orientado siempre de manera perpendicular al sol. La mayoría de los paneles instalados no tienen movilidad y están fijos orientados en una sola dirección, lo que ocasiona que solo produzcan energía eléctrica de manera óptima durante un muy breve periodo de tiempo. Ya existen metodologías y dispositivos para orientarlos, pero son caros y no siempre disponibles. En este sentido, lo que se busca en este proyecto, es que se aproveche la tecnología disponible en nuestro medio, de manera económica, así como un control difuso para el seguidor fotomecánico, que permita sincronizar el movimiento aparente del sol y tener un desempeño óptimo sin usar recursos complejos o caros. Este proyecto es bioinspirado en el vegetal "Helianthus Annuus" que presenta heliotropismo para optimizar la fotosíntesis (también llamado girasol, calom, jáquima, maravilla, tlapololote, maíz de teja o acahual).

#### Energías Alternativas, Sistema Inteligente, Seguidor Solar

#### Abstract

Nowadays, there is an urgent need to opt for alternative sources of energy in order to reduce the negative impact of human activities on the environment. One of these sources is the photovoltaic solar panels. Accordingly, for a solar panel to optimally produce electrical energy, it must always be oriented perpendicular to the sun. The majority of the installed panels do not have mobility and are fixed, ever oriented in a single direction, which causes that they only produce electrical energy in an optimal way during a very short period of time. There are already methodologies and devices to guide them, but they are expensive and not always available. In this sense, what is sought in this project, is to take advantage of the technology available in our place, economically, as well as a fuzzy control for the photomechanical tracker, which allows to synchronize the apparent movement of the sun and have an optimal performance without using complex or expensive resources. This project is bio-inspired in the vegetable "Helianthus Annuus" that presents heliotropism to optimize the photosynthesis (also called sunflower, and in Mexico known also as "girasol", "jáquima", "maravilla", "tlapololote", "maíz de teja or acahual").

#### Alternative Energies, Intellygent System, Sun Tracker

**Citación:** LÓPEZ-XELO, Hilario, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad. Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 27-32.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (hil\_lx@hotmail.com)

## Introducción

Las aplicaciones de las celdas FV (fotovoltaicas) son variadas desde usos domésticos, rurales, sistemas autónomos de bombeo de agua y de comunicaciones, sistemas de protección catódica, luces de indicación para tráfico aéreo y ferrocarriles, entre otras. Los paneles FV tienen un punto de operación en el cual producen la máxima potencia de salida. Sin embargo, este punto de operación es variante en función del tiempo y depende del grado de insolación y de la temperatura, de modo que se debe adoptar un sistema rastreador del Sol que optimice la producción de energía eléctrica.

Debido al movimiento aparente del sol, si la celda permaneciera estática no alcanzaría su punto óptimo, sino solamente una vez al día. La energía total producida en un día despejado puede optimizarse hasta en un 35% a 40% más para un colector móvil rastreador, que para un colector estático del mismo tipo. El objetivo es que el dispositivo rastreador garantice que siempre la fotocelda esté orientada hacia el sol de manera perpendicular incluso cuando se nubla. En este sentido, los sistemas de seguimiento solar permiten incrementar su rendimiento, la fiabilidad y permiten reducir costos. Además, al utilizar la energía solar reducirá la demanda de electricidad del sector convencional (Kumar et al, 2015).

Las celdas fotovoltaicas (FV) no aprovechan al máximo la energía solar incidente, de hecho, tienen una eficiencia relativamente baja. Los mejores paneles monocristalinos superan apenas el 20%, aunque el promedio es de 16%. Por su parte, los paneles amorfos apenas superan el 10%. Para los satélites y las naves espaciales se fabrican módulos de arseniuro de galio (GaAs) que alcanzan una eficiencia de 30%. La maximización de la potencia solar obtenida en un panel FV es de especial interés, en virtud de su baja eficiencia (Kharb et al, 2014)

Pero regresando al tema del seguidor solar, para orientar los paneles FV, hay dos propuestas: una de las alternativas es hacer un seguidor que se mueva según un calendario. Para ello, se deben conocer las coordenadas terrestres para saber hacia donde se va a ubicar dicho panel, así como el movimiento aparente con respecto al Sol, por cada fecha durante todo el año. Con esta información se puede orientar al panel FV durante todo el año.

La alternativa aquí propuesta es la de un sistema de energía solar de seguimiento solar de dos ejes utilizando la lógica difusa para controlar el proceso de manera inteligente. Uno de los ejes es necesario para seguir al sol en su recorrido diario aparente de oriente a poniente y el segundo eje para garantizar seguir siempre al sol de forma perpendicular de manera estacional. Por su parte, el programa sirve para controlar la parte mecánica. El hardware o parte mecánica, comprende las celdas solares, un microcontrolador, baterías de plomo-ácido, un motor paso a paso y el circuito de detección de luz (Huang et al, 2016), incluso en condiciones nubosas, lluviosas e imprevistas como un eclipse.

## Mercado Objetivo del proyecto

Los sistemas seguidores son una opción viable, en virtud de las relativamente bajas eficiencias de estos sistemas de conversión de energía (Verma et al, 2016). Desde el punto de vista del impacto social, en México existen más de 190 000 poblados con menos de 5,000 habitantes, de las citadas poblaciones alrededor de 7% (13,330 localidades) no cuentan con energía eléctrica, lo que representa una población de más de 2,200,000 personas (INEGI, 2010).

Este sistema debe funcionar durante al menos 10 años, sin grandes gastos ni maniobras, pues sólo requerirá lubricación e inspecciones periódicas. Además, debe soportar la intemperie, sobre todo la lluvia y granizo, así como el viento y la temperatura en un rango de -15 °C a 50°C.

## La lógica difusa

La lógica difusa es una teoría de conjuntos, en el que cada elemento tiene un número infinito de grados de pertenencia que oscilan entre cero y uno. En contraste, en los conjuntos tradicionales (también se llaman booleanos o duros) solo se tienen cero o uno (verdadero o falso) como grado de pertenencia. Por ejemplo, en términos de un conjunto duro, una persona, puede pertenecer al conjunto de los altos o de los medianos de estatura, pero de manera exclusiva: la persona es alta o es mediana y no hay más alternativas.

Pero, en los términos de los conjuntos difusos la misma persona puede pertenecer al conjunto de los altos en un 0.7, y a los medianos en 0.4, de una gama de valores entre 0 y 1 (Zadeh, 1965). Observe que la suma no es uno. Lofty Zadeh fue quien propuso esta metodología en 1965 (Huang et al, 2016).

### Controlador inteligente por lógica difusa

La lógica difusa permitió diseñar los controladores inteligentes difusos o FLC, por sus siglas en inglés (*Fuzzy Logic Controllers*), capaces de tratar con situaciones ambiguas, complejas o difíciles de modelar matemáticamente. El FLC tiene como herramienta la lingüística más que en un modelo matemático (Aguirre et al, 2018). El diseño del controlador se basa en algunas reglas difusas. Dichas reglas son el compendio del conocimiento de un experto humano en el sistema que se desea controlar.

Dicho experto debe saber cómo se comporta el sistema, de acuerdo a las variables a controlar y cuál es la respuesta a las variaciones: de hecho el sistema depende totalmente de la experiencia del experto (Patel y Shewale, 2015). Este sistema es más exacto, ya que es más fácil y preciso de controlar el ángulo y se ajusta mejor por la características del control debido a las variaciones del ambiente externo (Huang et al, 2016) y la lógica difusa es una excelente opción de control para esta aplicación (Suganthi, 2015). Cada variable representa a un conjunto difuso. El criterio del experto se expresa en términos de dichas variables en reglas empíricas arbitrarias para describir un sistema. Dichas reglas determinan las interacciones entre las variables difusas y se plantean como un silogismo lógico de la forma **si... entonces...** Por ejemplo:

**Si** hace mucho calor **entonces** enciende a toda intensidad el clima artificial.

**Si** está muy oscuro **entonces** enciende todas las luces.

El FLC se compone de cuatro etapas: la fuzzificación, la base de reglas, el mecanismo de inferencia y la defuzzificación, mismas que a continuación se describen (Usta et al, 2011).

El valor de los conjuntos AM y PM se deben normalizar antes de ser tratados por el FLC y la salida debe ser convertida en un valor duro antes de ser usados por el control y por el motor respectivamente (El-Sayed y Leeb, 2015). Para normalizar se meten los valores en cinco funciones de pertenencia.

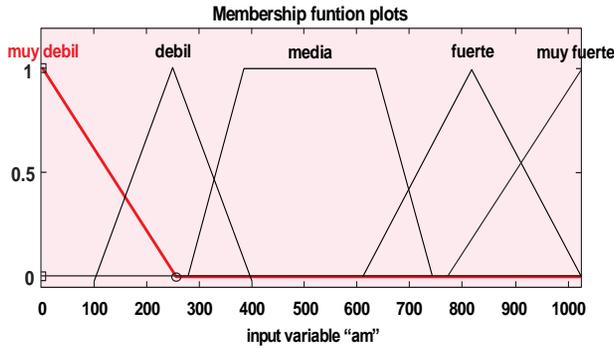
### Etapa 1: La fuzzificación

La fuzzificación es el proceso que convierte los valores numéricos de entrada en términos de los grados de pertenencia de los miembros de los conjuntos difusos, a través de una función de pertenencia (Aguirre et al, 2018). Como ya se mencionó, dichos valores de pertenencia oscilan entre 0 y 1. Para determinar el rango de valores que pueden tomar las entradas, también llamado universo de discurso, para realizar una representación de estas señales *versus* el voltaje del panel FV para diferentes niveles de irradiación solar (Robles y Hómez, 2011)

Para construir el FLC, el primer paso es definir las funciones de pertenencia para las variables **iluminación en la mañana**, mismas que en este trabajo, se llama **AM** y la **iluminación en la tarde**, que lleva el nombre de **PM**. Los nombres de estas variables fueron elegidas de manera arbitraria y representan la cantidad de luz recibida en la mañana y en la tarde por el módulo FV.

A su vez, la variable AM (iluminación por la mañana), se dividió en los siguientes conjuntos difusos arbitrarios: muy\_débil, débil, media, fuerte, muy\_fuerte, como lo muestra el Gráfico 1. Un comentario aparte merece el hecho de que los nombres son breves y descriptivos, aunque no se ajustan a las reglas ortográficas.

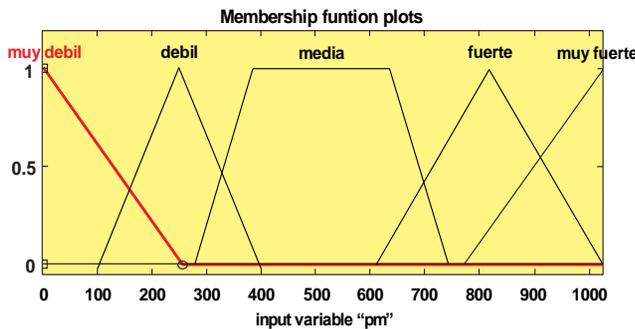
Las mejores funciones para esta aplicación son las triangulares, le siguen las gaussianas y las de Cauchy, y al final las de tipo campana (Usta et al, 2011). Adicionalmente, las triangulares son las más sensibles, lo que aumenta la velocidad del tiempo de respuesta y reduce los errores. Adicionalmente, la forma de triángulo, es la más fácil de programar (Robles y Hómez, 2011).



**Gráfico 1** Variable de entrada iluminación por la mañana (AM)

Fuente: Elaboración Propia

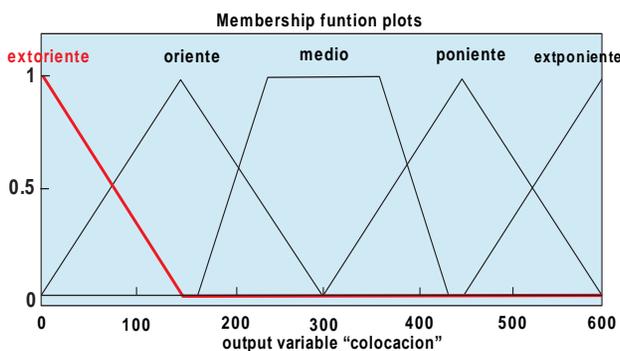
Por otra parte, la variable PM como se muestra en el grafico 2, se dividió en los siguientes conjuntos difusos arbitrarios: muy\_débil, débil, media, fuerte, muy\_fuerte, como lo muestra la siguiente figura.



**Gráfico 2** Variable de entrada iluminación por la tarde (PM)

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a la variable de salida como se muestra en el grafico 3, tiene el nombre de **colocación**, precisamente representa el lugar en el que se va a colocar el panel FV y consta de cinco conjuntos difusos, que tienen los nombres de ext\_oriente, oriente, medio, poniente, ext\_poniente.



**Gráfico 3** Variable de salida iluminación por la tarde (PM)

Fuente: Elaboración Propia

En este sentido, el motor de inferencia difusa proporciona los valores de entrada y define el uso de conjuntos difusos, y se cuantifican las funciones de pertenencia. Estas variables establecen la relación entre la luz recibida y el voltaje que detecta la fotocelda.

**Etapa 2: La base de reglas difusas**

El segundo paso del diseño del controlador difuso consiste en enumerar todas las reglas relevantes para el sistema. Estas reglas difusas establecen la relación de la corriente de salida de la célula solar con la iluminación del sol (Morales y Espinosa, 2018). Las reglas de control se evalúan mediante un mecanismo de inferencia y se representan como un conjunto de silogismos del tipo SI... ENTONCES... que se representan como una tabla de datos que incluyen la información relacionada al sistema (Robles y Hómez, 2011). Se tienen un total de 25 reglas, mismas que se pueden visualizar en la siguiente tabla.

El tablero de inferencia propuesto representa gráficamente la combinación deseada de entradas/salidas y el comportamiento del algoritmo de control para el sistema (Morales y Espinosa, 2018). El controlador difuso determina a partir de la tabla de reglas qué ajustes se debe hacer a fin de que el ciclo opere de manera adecuada (Abouobaida y Said, 2017).

AM PM	Muy débil	Débil	Media	Fuerte	Muy Fuerte
Muy débil	Medio	Oriente	Ext Oriente	Ext oriente	Ext oriente
Débil	Poniente	Medio	Oriente	Ext Oriente	Ext oriente
Media	Poniente	poniente	Medio	oriente	oriente
Fuerte	Ext poniente	Ext poniente	poniente	medio	oriente
Muy Fuerte	Ext poniente	Ext poniente	Ext poniente	poniente	medio

**Tabla 1** Las reglas de inferencia del seguidor solar

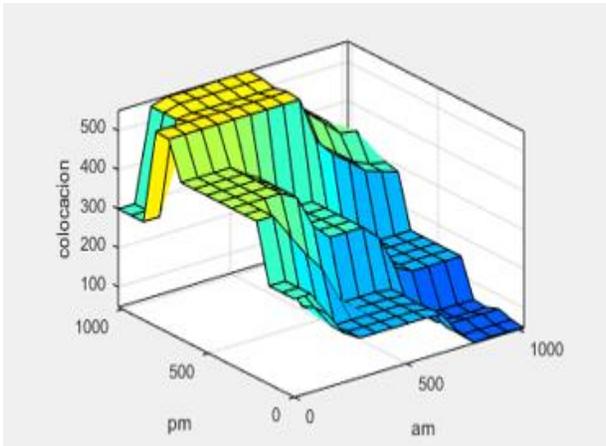
Fuente: Elaboración Propia

Por ejemplo, si se toma la primera columna, el conjunto de reglas derivadas de la tabla se plantea tomando primero el valor de **AM**, con la conjunción y el valor del conjunto o variable **PM**, con el consecuente obtenido leyendo la intersección entre ambas. A continuación se presentan en forma de silogismo, las dos primeras reglas de la primera columna: Si la iluminación en **am** es muy **débil** y la iluminación **pm** es **muy débil**, entonces la **posición** debe ser **medio**.

Si la iluminación en **am** es muy **débil** y la iluminación pm es **débil**, entonces la **posición** debe ser hacia el **poniente**.

**Etapa 3: La inferencia difusa**

El tercer paso del diseño del controlador difuso es decidir qué tipo de mecanismo o motor de inferencia difusa se debe utilizar como se muestra en el grafico 4. El mecanismo de inferencia verifica la toma de decisiones al interpretar y aplicar el conocimiento experto empírico. Para este sistema, se considera una relación máximo - mínimo como el método de inferencia difusa. La salida del conjunto difuso se toma como la intersección y el conjunto difuso final será la unión de los conjuntos difusos y así poder determinar su valor de salida para lograr la orientación de los paneles FV.

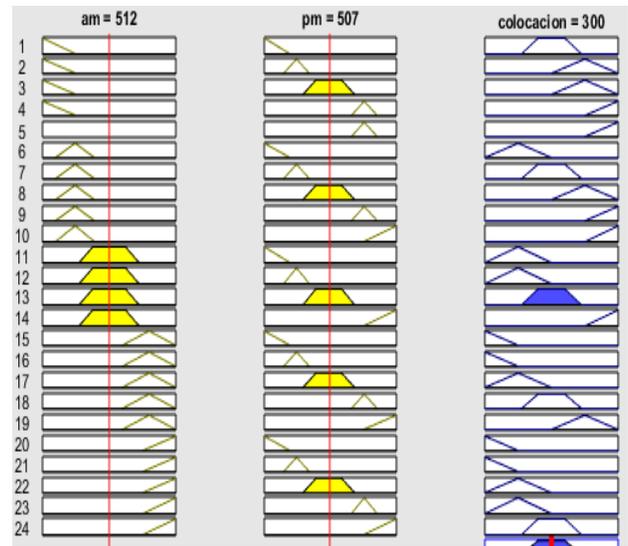


**Gráfico 4** Área de control de sistema de interrelación de variables: entrada, AM y PM y variable de salida, COLOCACIÓN  
Fuente: Elaboración Propia

Cada regla se evalúa en forma secuencial, de izquierda a derecha; pero todas ellas son tratadas como si fueran evaluadas simultáneamente. Durante la evaluación de reglas tienen lugar dos operaciones lógicas **and** y **or**. La operación difusa **and** se usa para conectar los antecedentes dentro de una misma regla. El operador difuso **and** corresponde a la operación difusa MIN, que sirve para sacar el valor mínimo y la operación difusa **or** que corresponde a MAX, operador que saca el valor máximo. El tratamiento de las reglas sucesivas se realiza mediante la operación difusa **or**. A este procedimiento difuso, AND - OR se le llama razonamiento de tipo Mamdani.

**Etapa 4: La defuzzificación**

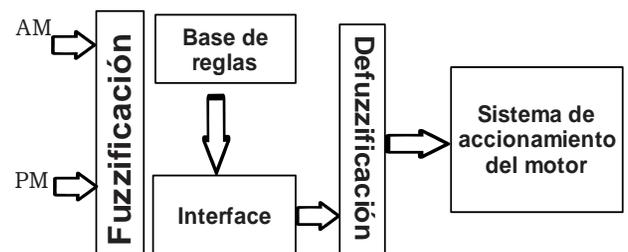
La parte de interfaz de defuzzificación permite que las decisiones del mecanismo de inferencia se concreten en términos de salidas duras (0 ó 1) que definitivamente representen una acción para el sistema. Se puede afirmar que la operación inversa a la fuzzificación es la defuzzificación. De hecho existen diferentes métodos para realizar esta operación (Patel y Shewale, 2015):



**Gráfico 5** Interacción entre conjuntos de entrada, y salida  
Fuente: Elaboración Propia

**Análisis de resultados**

Se usa un motor paso a paso para hacer girar el panel solar en la dirección del sol. La posición del sol se monitorea por parte del programa difuso con dos elementos de entrada (AM y PM) y un conjunto de salida llamado **posición** (que se traduce en el movimiento del motor paso a paso). El voltaje de cada sensor se convierte a formato digital usando un convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés, *analog digital conversor*) y se pasan al FLC para alinear el panel en la dirección del sol.



**Figura 1** Cuatro fases de control difuso en el sistema.  
Fuente: Elaboración Propia

El control de lógica difusa utiliza la corriente producida en los paneles solares por la luz del sol para determinar el tiempo para activar el motor paso a paso para conducir los paneles solares a la posición correcta. Al usar el control de lógica difusa para detectar la luz del sol y la del panel solar cada cinco minutos durante doce horas, el motor de pasos opera 144 veces en un día. El software inteligente le permite al sistema tomar mejores decisiones para posicionarse incluso si el día está nublado, lluvioso, o si ocurriera un evento como un eclipse.

Por otra parte, cuenta con una rutina para aumentar el tiempo al doble cuando la luminosidad del sol es baja, lo que nos permitiría reducir el número de veces que el motor arranca y así abatir el dispendio de energía. Otra parte importante es que llegando la noche, el sistema tiene una rutina programada que le permite posicionarse para esperar la salida del sol con un solo arranque del motor. Aunque el microcontrolador tiene algunas ventajas como su bajo precio y su facilidad para programarse, puede presentar algunos problemas al tratar con sistemas de control complejos. Un trabajo a futuro es tratar este problema con algún recurso de cómputo paralelo como FPGA o una tarjeta NVIDIA (Patel y Shewale, 2015).

## Conclusiones

A nivel mundial se visualizan aportaciones importantes en el uso y desarrollo de energías alternativas, de manera que el aporte al cuidado del ambiente sea efectivo pero también se tenga un impacto significativo en la producción de energía y en la optimización de la producción de la misma. En México, la sinergia entre las instituciones que administran, investigan y trabajan con energías alternativas, es parte fundamental del desarrollo de tecnologías propias que fomenten y fortalezcan su implementación en el país.

Las fotoceldas son dispositivos que permiten obtener energía eléctrica con el criterio de optimización de costos *versus* energía. Se usa control difuso para aplicaciones en las que los datos de entrada son fragmentarios y ambiguos y tiene que funcionar en tiempo real. Por otra parte, también se trata de diseñar este sistema con los medios fácilmente disponibles para su fabricación y mantenimiento y adaptándolo al entorno del Centro de México.

El sistema tendrá dos grados de libertad a fin de lograr adaptarse a las estaciones del año y al recorrido aparente diario del Sol por el horizonte. Se pretende tener una fuente de energía confiable, de mejor calidad, lograr un uso óptimo, mejor conservación y desempeño de los dispositivos que se pudiesen conectar a este sistema.

## Referencias

Abouobaida, H., & Said, E. B. (2017). *Practical Performance Evaluation of Maximum Power Point Tracking Algorithms in a Photovoltaic System. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 8(4), 1744-1755.

Aguirre, J. C. P., Agundis, A. R., Segura, E. J. R., & Nolasco, J. J. M. (2018). *CONTROL DIFUSO PARA UN CONVERTIDOR CD-CD APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LOS MODOS MPPT Y CV. Pistas Educativas*, 39(128).

El-Sayed, M. A., & Leeb, S. (2015, April). *Fuzzy logic based maximum power point tracking using boost converter for solar photovoltaic system in Kuwait. In International conference on renewable energies and power quality, Spain (Vol. 14, No. 13, pp. 433-443).*

Huang, C. H., Pan, H. Y., & Lin, K. C. (2016). *Development of intelligent fuzzy controller for a two-axis solar tracking system. Applied Sciences*, 6(5), 130.

Kharb, R. K., Shimi, S. L., Chatterji, S., & Ansari, M. F. (2014). *Modeling of solar PV module and maximum power point*

Kumar, A. P., Parimi, A. M., & Rao, K. U. (2015, February). *Implementation of MPPT control using fuzzy logic in solar-wind hybrid power system. In Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015 IEEE International Conference on (pp. 1-5). IEEE.*

Lee, C. Y., Chou, P. C., Chiang, C. M., & Lin, C. F. (2009). *Sun tracking systems: a review. Sensors*, 9(5), 3875-3890.

Morales Ospina, D. A., & Espinosa Romero, F. A. (2018). *Lámpara Led Inteligente Alimentada Por Paneles Solares.*

Patel, R. R., & Shewale, M. A. N. (2015). *Intelligent Sun Tracking System Using FLC Implemented On FPGA*. *Int. J. Adv. Found. Res. Comput.*, 2(10), 260-263.

Robles, C., & Hómez, G. A. V. (2011). *Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa*. *Télématique: Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, 10(2), 54-72.

Sánchez Chávez, S., & Mosquera Jiménez, J. T. (2017). *Suministro de energía basada en celdas solares a una red de sensores inalámbrica orientada al internet de las cosas por medio de un control de lógica difusa*.

Suganthi, L., Iniyar, S., & Samuel, A. A. (2015). *Applications of fuzzy logic in renewable energy systems—a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 585-607.

Usta, M. A., Akyazi, Ö., & Altaş, İ. H. (2011, December). *Design and performance of solar tracking system with fuzzy logic controller used different membership functions*. In *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011 7th International Conference on* (pp. II-381). IEEE.

Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). *Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018-1034.

Zadeh, L.A. *Fuzzy sets*. *Inf. Control* 1965, 8, 338–353. [CrossRef]

# Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

---

## [Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1<sup>er</sup> Autor†\*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1<sup>er</sup> Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2<sup>do</sup> Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3<sup>er</sup> Coautor

*Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)*

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1<sup>er</sup> Autor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1<sup>er</sup> Autor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1<sup>er</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1<sup>er</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 2<sup>do</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 2<sup>do</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 3<sup>er</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 3<sup>er</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

### Resumen (En Español, 150-200 palabras)

Objetivos  
Metodología  
Contribución

**Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Español)**

### Resumen (En Inglés, 150-200 palabras)

Objetivos  
Metodología  
Contribución

**Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Inglés)**

---

**Citación:** Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor†\*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor. Título del Artículo. Revista de Ingeniería Eléctrica. Año 1-1: 1-11 (Times New Roman No. 10)

---

---

\* Correspondencia del Autor (ejemplo@ejemplo.org)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Artículo

## Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

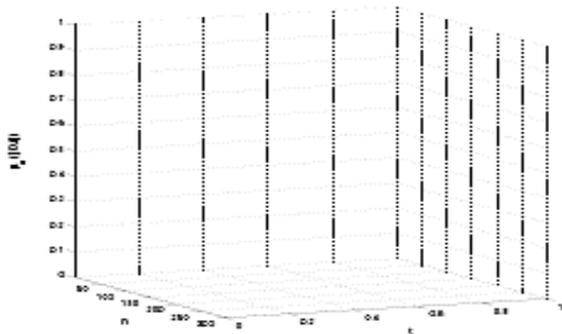
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

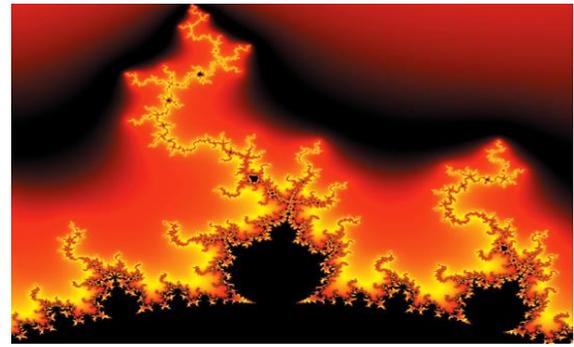
En el *contenido del Artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No. 10 y Negrita]



**Gráfico 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Cada Artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

## Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

## Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

## Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Artículo.

## Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

# Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

---

## Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

## Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

## Referencias

Utilizar sistema APA. No deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Artículo.

Utilizar Alfabeto Romano, todas las referencias que ha utilizado deben estar en el Alfabeto romano, incluso si usted ha citado un Artículo, libro en cualquiera de los idiomas oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (Inglés, Francés, Alemán, Chino, Ruso, Portugués, Italiano, Español, Árabe), debe escribir la referencia en escritura romana y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

## Ficha Técnica

Cada Artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

## Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

## **Reserva a la Política Editorial**

Revista de Ingeniería Eléctrica se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los Artículos a la Política Editorial del Research Journal. Una vez aceptado el Artículo en su versión final, el Research Journal enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del Artículo.

## **Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales**

### **Declaración de Originalidad y carácter inédito del Artículo, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución**

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de Artículos que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes del Artículo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia del Artículo propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título del Artículo:

- El envío de un Artículo a Revista de Ingeniería Eléctrica emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en este Artículo ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en el Artículo, así como las teorías y los datos procedentes de otros Artículos previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Perú considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de este Artículo se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en el Artículo.

## Copyright y Acceso

La publicación de este Artículo supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding Perú para su Revista de Ingeniería Eléctrica, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada del Artículo y la puesta a disposición del Artículo en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título del Artículo:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

## Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

### Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre Artículos enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

### Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio al Artículo el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

### Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de los Artículos. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con los Artículos que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter el Artículo a evaluación.

### **Responsabilidades de los Autores**

Los Autores deben garantizar que sus Artículos son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Artículos definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza del Artículo presentado a arbitraje.

### **Servicios de Información**

#### **Indización - Bases y Repositorios**

RESEARCH GATE (Alemania)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

HISPANA (Información y Orientación Bibliográfica-España)

#### **Servicios Editoriales:**

Identificación de Citación e Índice H.

Administración del Formato de Originalidad y Autorización.

Testeo de Artículo con PLAGSCAN.

Evaluación de Artículo.

Emisión de Certificado de Arbitraje.

Edición de Artículo.

Maquetación Web.

Indización y Repositorio

Traducción.

Publicación de Obra.

Certificado de Obra.

Facturación por Servicio de Edición.

#### **Política Editorial y Administración**

244 - 2 Itzopan Calle. La Florida, Ecatepec Municipio México Estado, 55120 Código postal, MX. Tel: +52 1 55 2024 3918, +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 4640 1298; Correo electrónico: [contact@ecorfan.org](mailto:contact@ecorfan.org)  
[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

**ECORFAN®**

**Editora en Jefe**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

**Redactor Principal**

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

**Asistente Editorial**

ROSALES-BORBOR, Eleana. BsC

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

**Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

**Editor Ejecutivo**

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD

**Editores de Producción**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

**Administración Empresarial**

REYES-VILLAO, Angélica. BsC

**Control de Producción**

RAMOS-ARANCIBIA Alejandra. BsC

DÍAZ-OCAMPO Javier. BsC

**Editores Asociados**

OLIVES-MALDONADO, Carlos. MsC

MIRANDA-GARCIA, Marta. PhD

CHIATCHOUA, Cesaire. PhD

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD

CENTENO-ROA, Ramona. MsC

ZAPATA-MONTES, Nery Javier. PhD

ALAS-SOLA, Gilberto Américo. PhD

MARTÍNEZ-HERRERA, Erick Obed. MsC

ILUNGA-MBUYAMBA, Elisée. MsC

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. MsC

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

**Publicidad y Patrocinio**

(ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- Taiwan ),sponsorships@ecorfan.org

**Licencias del Sitio**

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

**Oficinas de Gestión**

244 Itzopan, Ecatepec de Morelos–México.

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre–Bolivia.

38 Matacerquillas, CP-28411. Morazarzal –Madrid-España.

18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas I - Santa Elena-Ecuador.

1047 La Raza Avenue -Santa Ana, Cusco-Peru.

Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.

Southwest Avenue, San Sebastian – León-Nicaragua.

6593 Kinshasa 31 – Republique Démocratique du Congo.

San Quentin Avenue, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.

16 Kilometro, American Highway, House Terra Alta, D7 Mixco Zona 1-Guatemala.

105 Alberdi Rivarola Captain, CP-2060. Luque City- Paraguay.

Distrito YongHe, Zhongxin, calle 69. Taipei-Taiwán.

# Revista de Ingeniería Eléctrica

“Estudio para detección de Defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia”

**SALAZAR-PERALTA, Araceli, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda**  
*Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán*

“Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica”

**MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma**  
*CIATEQ A.C.*

*Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex)*

“Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados”

**MEDINA-ÁNGEL, Gustavo & BURLAK, Gennadiy**  
*CIICAp*

*Universidad Autónoma del Estado de Morelos*

“Diseño de un sistema fotomecánico inteligente con dos grados de libertad para la orientación de un panel fotovoltaico que optimice la producción de energía eléctrica”

**LÓPEZ-XELO, Hilario, HERNÁNDEZ-MEDINA, José Juan y ROMANO-RODRÍGUEZ, Ma. Natividad**

