

ISSN 2523-2517

Volumen 4, Número 12 — Enero — Junio — 2020

# Revista de Ingeniería Eléctrica

**ECORFAN®**

## **ECORFAN-Perú**

### **Editor en Jefe**

QUINTANILLA-CÓNDOR, Cerapio. PhD

### **Directora Ejecutiva**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

### **Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

### **Diseñador Web**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

### **Diagramador Web**

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

### **Asistente Editorial**

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

### **Traductor**

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

### **Filóloga**

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

## **Revista de Ingeniería Eléctrica,**

Volumen 4, Número 12, de Enero a Junio, 2020, es una revista editada semestralmente por ECORFAN-Perú. La Raza Av. 1047 No. -Santa Ana, CuscoPerú. Postcode: 11500. WEB: [www.ecorfan.org/republicoferu](http://www.ecorfan.org/republicoferu), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editor en Jefe: QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio. 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, 2020.

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**

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD  
Massachusetts Institute of Technology

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

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

FERNANDEZ - ZAYAS, José Luis. PhD  
University of Bristol

LÓPEZ - HERNÁNDEZ, Juan Manuel. PhD  
Institut National Polytechnique de Lorraine  
MEDELLIN - CASTILLO, Hugo Iván. PhD  
Heriot-Watt University

TIRADO - RAMOS, Alfredo. PhD  
University of Amsterdam

VAZQUEZ - MARTINEZ, Ernesto. PhD  
University of Manitoba

AYALA - GARCÍA, Ivo Neftalí. PhD  
University of Southampton

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

## **Comité Arbitral**

TECPOYOTL - TORRES, Margarita. PhD  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

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

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

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

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

GUTIÉRREZ - VILLEGAS, Juan Carlos. PhD  
Universidad de Guadalajara

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

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

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

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

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

## **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, *Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones*, por SHIH, Meng Yen, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel, con adscripción en la Universidad Autónoma de Campeche, como siguiente artículo presentamos, *Películas de SRO-HFCVD como dieléctrico en estructuras MIS y sus propiedades eléctricas*, por MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David y CASCO-VASQUEZ, José Federico, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Apizaco y Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, respectivamente, como siguiente artículo presentamos, *Diseño y construcción de un colorímetro para identificar el desgaste de fusibles comerciales usando sensores fotoeléctricos*, por TORRES-FLORES, M. Azucena, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos, con adscripción en la Universidad Autónoma del Estado de México, como último artículo presentamos *Diseño e implementación de un sistema de control a lazo cerrado PID para manipular la temperatura en el proceso de termoformado*, por ROSALES-DAVALOS, Jaime, GIL-ANTONIO, Leopoldo, MASTACHE-MASTACHE, Jorge Edmundo y LÓPEZ-RAMÍREZ, Roberto, con adscripción en el Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán.

## Contenido

Artículo	Página
<b>Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones SHIH, Meng Yen, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel</b> <i>Universidad Autónoma de Campeche</i>	1-9
<b>Películas de SRO-HFCVD como dieléctrico en estructuras MIS y sus propiedades eléctricas</b> MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David y CASCO-VASQUEZ, José Federico <i>Instituto Tecnológico de Apizaco</i> <i>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</i>	10-15
<b>Diseño y construcción de un colorímetro para identificar el desgaste de fusibles comerciales usando sensores fotoeléctricos</b> TORRES-FLORES, M. Azucena, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos <i>Universidad Autónoma del Estado de México</i>	16-23
<b>Diseño e implementación de un sistema de control a lazo cerrado PID para manipular la temperatura en el proceso de termoformado</b> ROSALES-DAVALOS, Jaime, GIL-ANTONIO, Leopoldo, MASTACHE-MASTACHE, Jorge Edmundo y LÓPEZ-RAMÍREZ, Roberto <i>Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán</i>	24-29

## Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones

### Development of the genetic heuristic algorithm for the coordination of protections

SHIH, Meng Yen†\*, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel

*Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cardenas y Unidad Habitacional Ecológica Ambiental, Col. Ex-Hacienda Kala, CP 24085, San Francisco de Campeche, Cam., México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Meng Yen, Shih* / **ORC ID:** 0000-0001-7475-6458, **CVU CONACYT ID:** 408617

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Francisco Román, Lezama-Zárraga* / **ORC ID:** 0000-0003-3397-7881, **Researcher ID Thomson:** U-1229-2018, **CVU CONACYT ID:** 205493

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Jorge de Jesus, Chan-Gonzalez* / **ORC ID:** 0000-0002-8638-1646

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *José Gadiel, Che-Puch* / **ORC ID:** 0000-0002-5779-9533

**DOI:** 10.35429/JEE.2020.12.4.1.9

Recibido Enero 10, 2020; Aceptado Junio 30, 2020

#### Resumen

La coordinación de relevadores de sobrecorriente es una tarea fácil cuando se trata de una línea de distribución radial. Sin embargo, cuando se complementa con unidad direccional para proteger a redes malladas, el problema se vuelve muy complejo. Este es debido a que el dispositivo de protección tiene que ofrecer operación primaria y respaldo para la misma línea o líneas múltiples utilizando el mismo ajuste de protección. Además, considerando dos parámetros como son el ajuste de la palanca de tiempo dial y ajuste de la corriente de arranque, hace que el problema de coordinación sea aún más complejo para ser realizado de forma manual. Por lo anteriormente expuesto, en este artículo, el estudio de la coordinación de protección es formulado como un problema de optimización para ser solucionado usando Algoritmo Genético heurístico. Este no solamente ahorra tiempo para el ingeniero de protección, también transfiere el burden a la computadora usando inteligencia artificial y asegura que los resultados sean más cercanos a lo óptimo.

**Algoritmo genético, Optimización heurístico, Coordinación de relevador de sobre corriente direccional**

#### Abstract

The coordination of overcurrent relays is an easy task when dealing with a radial distribution line. However, when directional units are in place to protect meshed networks, the problem becomes very complex. This is because the protection device must offer primary and backup operation for the same or multiple lines using the same protection setting. Moreover, considering two parameters namely the time dial setting and the current pickup setting make the coordination problem even more complex to be achieved manually. Therefore, in this article, the protection coordination study is formulated as an optimization problem to be solved using a heuristic Genetic Algorithm. This not only saves time for the protection engineer; it also transfers the burden to a computer using artificial intelligence and guarantee that the results are close to optimal

**Genetic algorithm, Heuristic optimization, Directional overcurrent relay coordination**

**Citación:** SHIH, Meng Yen, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel. Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2020. 4-12:1-9.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: smengyen@uacam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los dispositivos de protección son ampliamente utilizados en los diferentes niveles de voltajes en el sistema eléctrico de potencia: generación, transmisión, subtransmisión y distribución. Tienen como objetivo detectar y aislar la sección de la red eléctrica dañada, causada por diversos fenómenos tales como: relámpagos, vientos, nieve, sismos, explosiones, contactos por animales, contaminaciones, operaciones erróneas humanas, arcos eléctricos (Blackburn & Domin 2006, sección 1.1), evitando accidentes mayores y pérdidas de los equipos primarios costosos. Estos dispositivos necesitan ser ajustados para ofrecer protección primaria y respaldo para las líneas o elementos eléctricos (Gers & Holmes 2011, p.5-6).

El Relevador de Sobre Corriente (OCR) es un tipo de protección ampliamente usado en las redes de subtransmisión y distribución debido a su costo competitivo. Las corrientes de carga y de falla pueden circular hacia dentro o afuera de la zona de protección del relevador de sobre corriente dependiendo de las condiciones operativas y/o ubicación de fallas.

Por lo tanto, los Relevadores de Sobre Corriente Direccional (DOCR) son utilizados para discriminar si la falla se ubica dentro o afuera de la zona de protección (Gers & Holmes 2011, p.125).

El propósito de coordinar los DOCRs es encontrar ajustes que minimicen el tiempo de operación para fallas ubicados en la zona de protección y al mismo tiempo proporcionen una operación demorada con tiempo preestablecido como función respaldo para relevadores que se encuentra en zonas adyacentes (Blackburn & Domin 2006, sección 1.1).

## Justificación

La coordinación de OCRs en una línea de distribución radial es bastante sencilla y puede realizarse en forma manual. Sin embargo, para redes malladas se requiere utilizar DOCR que puede discriminar la ubicación de la falla. Este incrementa la complejidad del trabajo de coordinación a menudo de que la red eléctrica es más grande y mallada (Gers & Holmes 2011, p.96).

Si se coordinan los DOCRs para una red mallada de forma manual, se puede ser muy complicado y tiempo consumido (Gers & Holmes 2011, p.96-97).

El realizar la coordinación de forma manual puede demorar días y en el peor caso no llegar al conjunto de ajustes que satisface todas las restricciones de cada dispositivo de protección para garantizar la coordinación entre sí. Dicho de otra manera, algunas líneas no dispondrán de la función de protección de respaldo de DOCRs. Por lo tanto, se desea desarrollar e implementar un Algoritmo Genético (GA) en Matlab para llevar a cabo el trabajo de alta complejidad.

Como han propuesto Urdaneta, et al (1996), ellos resolvieron el problema de coordinación de DOCRs usando programación lineal (p.1); Noghabi, et al (2010) proponen resolver el problema de coordinación de DOCRs empleando programación lineal considerando topologías múltiples (p.1); Sueiro, et al (2012) proponen el uso de la combinación de programación lineal con algoritmo evolutivo para el problema de coordinación (p.1); Amrae (2012) propone la implementación del algoritmo buscador para la optimización de los DOCRs (p.1); y Singh, et al (2013) proponen la coordinación óptima de DOCRs empleando la optimización basado en enseñanza y aprendizaje (p.1).

Los diferentes investigadores aspiran a aprovechar las capacidades de las computadoras para solucionar el problema de coordinación de protecciones.

## Objetivo

Desarrollar e implementar un método heurístico GA para solucionar el problema de coordinación de DOCRs.

## Hipótesis

Si se logra programar los códigos del método heurístico GA para solucionar el problema de coordinación de DOCRs en redes mallados, se espera que se puedan obtener mejores resultados, con cero violaciones de restricciones y en menos tiempo con respecto al que se emplea en la industria en forma manual o apoyado por software.

**Modelado matemático del relevador de sobre corriente direccional**

Los DOCRs funcionan de acuerdo con las curvas características de tiempo inverso. Las curvas de tiempo inverso operan en menos tiempo mientras que la magnitud de falla incrementa y operan con mayor tiempo cuando la magnitud de falla decremента. La ecuación 1 presenta el modelado de DOCR de tiempo inverso según el estándar IEEE C37.112-1996.

$$t = \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_{sc^{3\phi_{max}}}}{I_p} \right)^n - 1} + B \right] * dial \tag{1}$$

Donde  $t$  es el tiempo de operación del relevador,  $I_{sc^{3\phi_{max}}}$  es la corriente de falla trifásica máxima,  $I_p$  es la corriente de arranque del relevador normalmente ajustado entre 1.4 hasta 2 veces la corriente de carga máxima,  $dial$  es el ajuste de palanca de tiempo o familia de curvas, y  $A, B, n$  son los constantes del estándar IEEE.

Los constantes de IEEE de los relevadores están presentado en la Tabla 1. Estas son curvas convencionales: moderadamente inversa (MI), muy inversa (VI) y extremadamente inversa (EI).

Norma	Curva	A	B	n
IEEE	MI	0.0515	0.114	0.02
	VI	19.61	0.491	2
	EI	28.2	0.1267	2

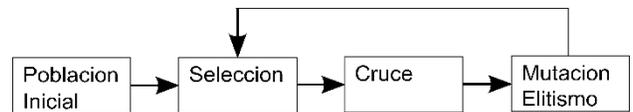
**Tabla 1** Constantes del Estándar IEEE

Fuente: IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, IEEE std C37.112-1996

**Metodología de optimización del problema de coordinación usando algoritmo genético**

El GA es una parte de la computación evolutiva; es un algoritmo de búsqueda adaptativa heurístico basado en ideas evolutivas de selección natural de genes.

El GA fue desarrollado por John Holland en 1975 que es una rama del cómputo evolutivo. Es una técnica de inteligencia artificial imitando y basando en la idea de “Selección Natural de los más Aptos” del Darwin. Tiene como objetivo de resolver problemas complejos que requiere optimización. Las etapas principales de GA se ilustran en la Figura 1.



**Figura 1** Las etapas principales del GA  
Fuente: Elaboración propia

La población inicial se presenta en la ecuación 2 y sigue la regla de la ecuación 3:

$$P = \begin{bmatrix} dial_{(1,1)} & \dots & dial_{(1,NR)} & Ip_{(1,NR+1)} & \dots & Ip_{(1,NR+2)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dial_{(NC,1)} & \dots & dial_{(NC,NR)} & Ip_{(NC,NR+1)} & \dots & Ip_{(NC,NR+2)} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$P(p,q) = L_{inferior} + (L_{superior} - L_{inferior}) * P(p,q)_{rand} \tag{3}$$

Donde NR es el número de relevadores, NC es el número de cromosomas,  $L_{inferior}$  es el límite inferior,  $L_{superior}$  es el límite superior y  $P(p,q)_{rand}$  es un número aleatoriamente generado.

En este artículo, la selección se basa principalmente en la rueda de ruleta donde se asigna una probabilidad a cada cromosoma según su aptitud. Los cromosomas con mejores aptitudes tendrán mayor probabilidad a ser elegido para reproducirse posteriormente. Este se presenta en ecuación 4:

$$p(x) = \frac{1}{\frac{f(x)}{\sum_1^{NC} f(x)}} \tag{4}$$

Donde  $p(x)$  es la probabilidad del cromosoma “x”,  $f(x)$  es la aptitud de cromosoma “x” y  $\sum_1^{NC} f(x)$  es la sumatoria total de todas las aptitudes de la población.

La reproducción o el cruce en este artículo se basa en la recombinación aritmética simple que se presenta en la ecuación 5. Sólo los cromosomas padres seleccionados según la probabilidad, tendrán derecho a realizar el esquema de reproducción de algunas partes de sus genes.

$$P(x,y)_{G+1} = \frac{(P(x,y)_G + P(z,y)_G)}{2} \tag{5}$$

Donde  $P(x,y)_{G+1}$  es el gen “y” del cromosoma “x” de la población nueva en formación,  $P(x,y)_G$  es el gen “y” del cromosoma “x” de la población vieja y  $P(z,y)_G$  es el gen “y” del cromosoma “z” de la población vieja.

La mutación de genes se realiza con el fin de proveer diversidad a la población actual y explorar diferentes posibilidades. Sin embargo, el elitismo ha sido empleado simultáneamente con la mutación en este artículo debido a que se observa que se obtiene mejores resultados. Éste se ejecuta una sola vez cuando se contabiliza que no se mejoran los resultados por ninguna vez en 10 generaciones consecutivos y se presenta en la ecuación 6:

$$P(x)_{G+1} = \begin{cases} P(U\%)_{G+1} = (B_C)_G \\ P(V\%)_{G+1} = \text{rand}(P(\text{lower}, \text{upper})) \end{cases} \quad (6)$$

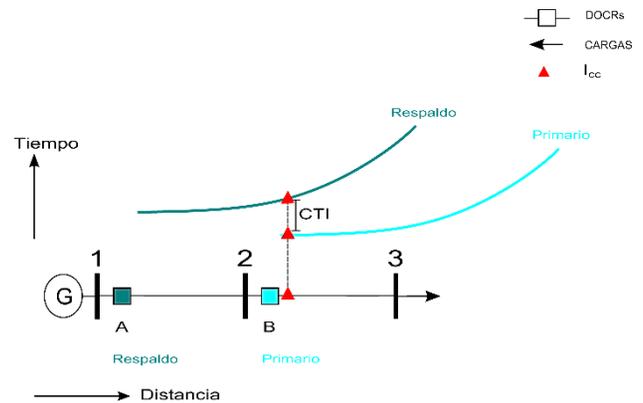
Donde  $U$  y  $V$  son porcentajes que afecta a la población y  $(B_C)_G$  es el mejor cromosoma de la presente población. El porcentaje de  $U$  realiza el elitismo y el porcentaje de  $V$  realiza la mutación. Es importante señalar que los cromosomas de elitismo también son candidatos para ser mutados según el porcentaje  $V$ .

En este trabajo, las generaciones de la población evolucionan manteniendo su tamaño original sin incrementarlo. La función de aptitud para evaluar si el cromosoma es buen o mal candidato para ser elegido padre y ejecutar la reproducción está dado en la ecuación 7. La función de aptitud propuesta consta de la sumatoria del número de violaciones de restricciones, los tiempos de operación primario y respaldo y los errores de Intervalo de Tiempo de Coordinación (CTI). Esta función de aptitud es la clave para determinar y comparar qué tan bueno es un cromosoma con respecto a los otros.

$$f(x) = \left(\frac{NV}{NCP}\right) + \left(\frac{\sum_{a=1}^{NCP} t_{pa}}{NCP}\right) * \alpha + \left(\frac{\sum_{b=1}^{NCP} t_{bb}}{NCP}\right) * \beta + \left(\sum_{L=1}^{NCP} E_{CTI_L}\right) * \delta \quad (7)$$

Donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$  son factores que incrementan o decremantan la influencia de cada subfunción de aptitud.  $NV$  es el número de violación de restricción de coordinación,  $NCP$  es el número de parejas de coordinación,  $t_{pa}$  es el tiempo de operación primaria del relevador a,  $t_{bb}$  es el tiempo de operación respaldo del relevador b, y  $E_{CTI_L}$  es el error de CTI de la L-ésima pareja de coordinación.

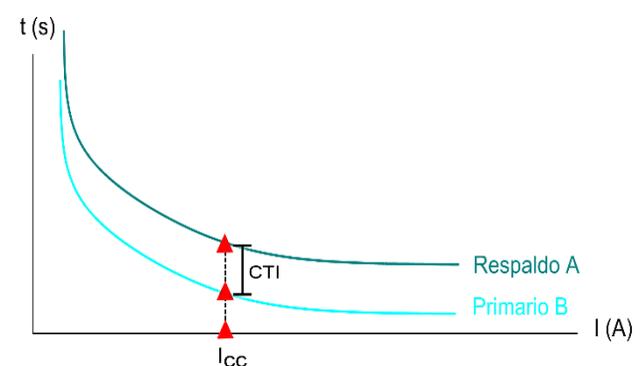
La coordinación de DOCRs se establece cuando se cumple el CTI entre el relevador primario y el respaldo. Se ilustra la idea de protección primario y respaldo en la Figura 2.



**Figura 2** Protección primaria y respaldo en una línea radial de una sola fuente

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Figura 2 que el relevador B ofrece una protección primaria para la falla que se ubica entre los buses 2 y 3. Mientras el relevador A ofrece protección respaldo para la misma falla que se ubica entre los buses 2 y 3. Sin embargo, para evitar disparos simultáneos, el relevador de respaldo A está coordinado con el B de tal forma que se espera el CTI antes de entrar en operación. Esta coordinación de CTI tiene la intención de dejar al relevador primario B intentar liberar la falla y cuando por alguna razón no logra liberar la falla, el relevador de respaldo A entra en acción para liberar dicha falla después de esperar el CTI.



**Figura 3** Concepto de protección primaria y respaldo con las curvas de tiempo inverso

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se presentan las curvas de tiempo inverso de los relevadores primario y respaldo. En un plano tiempo-corriente, el eje “y” representa el tiempo de operación en segundos mientras el eje “x” representa el amperio de corrientes de falla.

Esta curva normalmente se representa en hojas logarítmicas. La esencia de analizar la Figura 3 es entender que para alguna falla que se origine entre los buses 2 y 3 de la Figura 2, el relevador primario B debe ser el primero en entrar en operación. Sin embargo, cuando la falla persiste sin ser liberado por el relevador primario B, entonces el relevador respaldo A entra en operación para liberar la falla después del tiempo predefinido CTI. En este artículo, el CTI seleccionado es de 0.3 segundos.

Este concepto de coordinación mediante el uso de CTI es una restricción matemática que se puede ser presentado a través de la ecuación 8:

$$CTI_{real} = t_b - t_p \quad (8)$$

Donde  $t_b$  es el tiempo de operación del relevador de respaldo y  $t_p$  es el tiempo de operación del relevador primario. Pero para el proceso de optimización, se anexa la ecuación 9 como un indicador del error del CTI, la cual se utiliza en la evaluación de la función de aptitud.

$$CTI_{error} = CTI_{real} - CTI_{preestablecido} \quad (9)$$

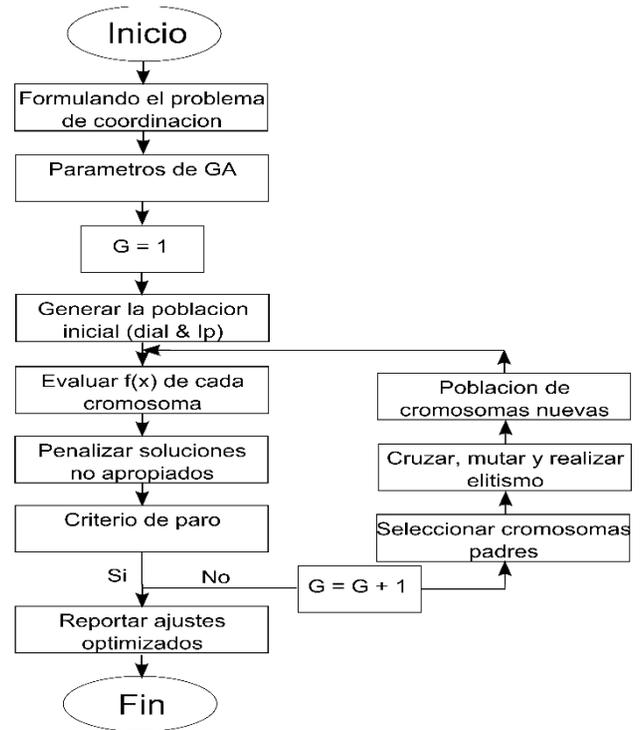
Los límites físicos inferiores y superiores de los ajustes de los DOCRs también se representan como restricciones de optimización en ecuaciones 10 y 11:

$$dial_{min} \leq dial \leq dial_{max} \quad (10)$$

$$I_{pmin} \leq I_p \leq \min(I_{scmin}, I_{pmax}) \quad (11)$$

Donde  $dial$  es el ajuste del DOCR entre el intervalo máximo  $dial_{max}$  y mínimo  $dial_{min}$ .  $I_p$  es la corriente de arranque en los intervalos máximos  $I_{pmax}$  y mínimos  $I_{pmin}$  e  $I_{scmin}$  es la corriente de falla mínima.

El diagrama de flujo para la coordinación de DOCRs usando GA se presenta en la Figura 4.



**Figura 4** Diagrama de flujo de coordinación de DOCRs usando GA

Fuente: Elaboración propia

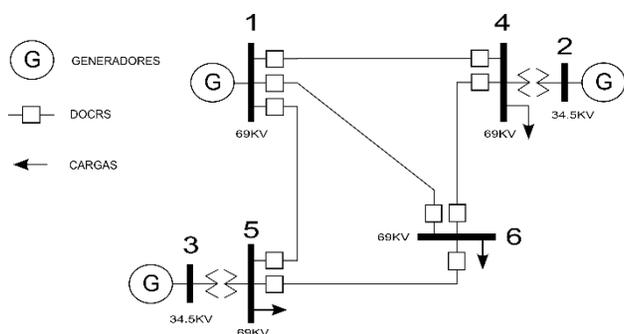
Los pasos para seguir para implementar un GA para la coordinación de DOCRs se presenta a continuación:

- Generar aleatoriamente la población inicial de “ $NC$ ” cromosomas donde cada gen es una posible solución al problema.
- Calcular el tiempo de operación primario y respaldo de cada relevador de acuerdo con cada cromosoma.
- Evaluar la función de aptitud  $f(x)$  de cada cromosoma “ $x$ ” en la población.
- Crear una nueva población en cada iteración/generación:
  - Selección: elegir cromosomas padres de la población de acuerdo con su aptitud a través de la rueda de ruleta, rangos y elitismo.
  - Reproducción: usar probabilidad de cruce para formar cromosomas de hijos nuevos. Realizar cruce no-uniforme.
  - Mutación: usar un porcentaje de mutación para mutar genes de los cromosomas.

- Posición: colocar los resultados de reproducción, mutación y elitismo en la población nueva manteniendo el tamaño de población original.
- Ejecutar el algoritmo de nuevo usando la población nueva.
- Terminar el algoritmo si se satisface el criterio de paro. De lo contrario, ejecutar todos los pasos desde 2 a 5 hasta satisfacer el criterio de paro. El único criterio de paro en este estudio es el llegar a las dos mil iteraciones.

### Datos de simulación y del sistema mallado

Se implementa el GA en el sistema mallado de 6 buses. Este sistema consta de 10 DOCRs de fase y 16 parejas de coordinación. Se presenta el sistema en la Figura 5.



**Figura 5** El sistema de 6 buses mallado

Fuente: Hadi Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-561634-3, 1999.

Los nombres de los relevadores son asignados como una cadena de números de dos dígitos formados de tal forma que revela su ubicación.

Como por ejemplo el DOCR que está conectado en el bus 1 viendo hacia bus 4 se le asigna el nombre de [1 4].

El DOCR que está conectado en el bus 5 viendo hacia bus 1 se le asigna el nombre de [5 1] y así sucesivamente.

Los parámetros de líneas, resistencias, reactancias y admitancias en derivación se presentan en la Tabla 2 como R, X y 1/2B, respectivamente.

Bus	Bus	R	X	1/2 B
1	4	0.035	0.225	0.0065
1	5	0.025	0.105	0.0045
1	6	0.040	0.215	0.0055
2	4	0.000	0.035	0.0000
3	5	0.000	0.042	0.0000
4	6	0.028	0.125	0.0035
5	6	0.026	0.175	0.0300

**Tabla 2** Parámetros de las líneas

Fuente: Hadi Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-561634-3, 1999

Los parámetros de los generadores y las cargas se presentan en la Tabla 3. Se modificó levemente las cargas y generación con el fin de adecuar más a nivel de subtransmisión donde se emplea los DOCRs.

Bus	X'd	V	Generación		Carga		
			MW	Limites Mvar	MW	Mvar	
				Min	Max		
1	0.20	1.060					
2	0.15	1.040	50	0	40		
3	0.25	1.030	30	0	20		
4						100	70
5						30	5
6						20	5

**Tabla 3** Parámetros de los generadores y las cargas levemente modificados

Fuente: Hadi Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-561634-3, 1999

Los parámetros para ejecutar la optimización de coordinación de protecciones empleando GA se presentan en la Tabla 4.

Parámetros	GA
CTI	0.3
dial	[0.5:2.0]
Ip	[1.4:1.6]*Icarga
$\alpha, \beta, \delta$	2, 1, 2
Población/cromosomas	100
Iteración/generaciones	2,000

**Tabla 4** Parámetros de optimización

Fuente: Elaboración propia

### Resultados

En la Tabla 5, se presenta los tiempos primarios, respaldos, CTI, las corrientes de falla primaria y respaldo, y las parejas de coordinación de DOCRs.

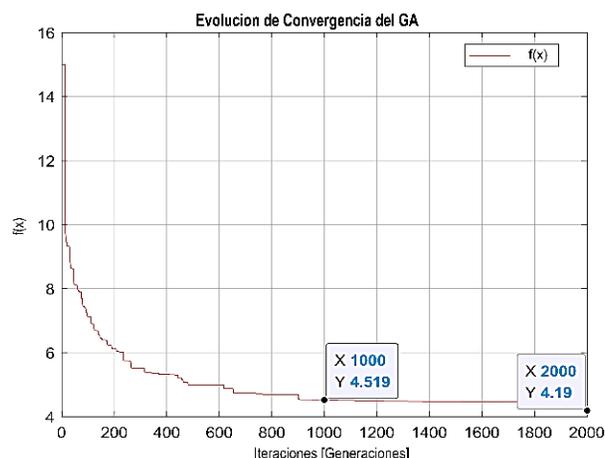
Primario	Respaldo	GA			Primario Icc(A)	Respaldo Icc(A)
		tp(s)	tb(s)	CTI(s)		
4 6	1 4	0.59	1.47	0.88	7493	2338
1 5	4 1	0.90	2.15	1.25	7676	1900
1 6	4 1	0.52	2.10	1.59	8572	1921
5 6	1 5	0.55	1.08	0.52	6554	3676
1 4	5 1	0.42	1.52	1.10	7955	2363
1 6	5 1	0.52	1.45	0.93	8572	2508
6 4	1 6	0.95	1.30	0.35	4370	2127
6 5	1 6	0.75	1.22	0.47	5366	2231
1 4	6 1	0.42	2.53	2.11	7955	1451
1 5	6 1	0.90	2.06	1.17	7676	1633
6 1	4 6	0.62	1.17	0.55	5620	3186
6 5	4 6	0.75	1.21	0.45	5366	3104
4 1	6 4	0.43	1.96	1.54	7590	2433
6 1	5 6	0.62	1.14	0.52	5620	2405
6 4	5 6	0.95	1.26	0.31	4370	2216
5 1	6 5	1.04	1.35	0.32	5291	2413
<b>Promedio</b>		<b>0.68</b>	<b>1.56</b>	<b>0.88</b>	--	--

**Tabla 5** Tiempos de operación primario, respaldo, CTI y las corrientes de falla de las parejas de coordinación  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que los tiempos primarios y respaldos son muy aceptables y el los CTIs revela que todas las parejas de protección están coordinadas ya que no se presenta ninguna violación de restricciones. El promedio del tiempo primario, respaldo y CTI del sistema de 6 buses en una corrida de simulación son de: 0.68, 1.56, 0.88 segundos respectivamente. También se presenta a continuación, en la Tabla 6, los ajustes de los DOCRs optimizados de la misma corrida de simulación. Se observa que el GA intenta satisfacer la coordinación y las restricciones a través de encontrar ajustes del parámetro dial mínimos. El uso de parámetro dial menores conlleva a obtener tiempos de operación más rápidos. De esta forma, liberando las posibles fallas en las líneas en el menor tiempo posible. Al mismo tiempo, el GA está programado para contemplar la optimización del parámetro de la corriente de arranque. La Figura 6 presenta la evolución de la convergencia de GA promediada para la coordinación de DOCRs en 100 simulaciones. Se observa que la función de aptitud va disminuyendo, ya que se trata de un problema de optimización, encaminada a la minimización.

DOCR	GA	
	dial	$I_p$
1 4	0.66	664
4 1	0.66	666
1 5	1.72	304
5 1	1.88	298
1 6	0.96	438
6 1	1.00	445
4 6	0.95	607
6 4	1.08	614
5 6	0.94	452
6 5	1.24	417

**Tabla 6** Ajustes de dial y corriente de arranque para los relevadores de sobre corriente  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 6** Convergencia del GA promediada para el sistema de 6 buses mallado en 100 corridas de simulaciones independientes  
Fuente: Elaboración propia

También se observa que, a lo largo de las 2,000 iteraciones o generaciones, existen mejoras leves en cuanto al resultado después de las 1,000 iteraciones que promediaba la aptitud 4.519 a las mil iteraciones hasta 4.190 a dos mil iteraciones. Esto significa que realmente el problema de coordinación ya casi ha convergido aproximadamente a las 1,000 iteraciones. En otras palabras, el tiempo de ejecución del algoritmo para la optimización puede reducirse a la mitad si lo deseamos, estableciendo 1,000 como la máxima iteración de convergencia. Sin embargo, el límite de iteraciones ha sido establecido como 2,000 (valor de umbral) ya que el tiempo de ejecución es bastante rápido (sólo se requiere aproximadamente 2 minutos) con respecto a la forma manual y además puede haber una ligera mejora en los resultados.

A continuación, se presenta en la Tabla 7 los valores promedios y desviación estándar del GA en 100 corridas de simulaciones independientes. Cabe señalar que cada corrida inicia con una población aleatoria para evaluar la robustez y la capacidad de convergencia del GA.

	GA				
	f(x)	t(seg)	tp(seg)	tb(seg)	CTI(seg)
Max	5.12	127	0.81	1.70	0.89
Min	3.30	125	0.51	1.28	0.77
Promedio	4.19	127	0.63	1.50	0.87
SD	0.41	4.11	0.07	0.15	0.10

**Tabla 7** Resultados máximos, mínimos, promedios y desviación estándar en 100 corridas de simulaciones independientes  
Fuente: Elaboración propia

Se observa de la Tabla 6 que a pesar de iniciar con poblaciones aleatorias logra converger todas las simulaciones ya que tiene una desviación estándar (SD) de la función de aptitud de 0.41; es decir, la herramienta es muy confiable. Además, se observa que los valores máximos, mínimo y promediado de la función de aptitud están muy cercanos. Lo cual expresa que el GA no se ha perdido o no se ha presentado convergencias prematuras en las 100 búsquedas de las soluciones de satisfacer todas las restricciones (coordinación) del sistema.

Por otro lado, se observa que el GA ocupa aproximadamente 127 segundos con una desviación estándar de 4.11 segundos para ejecutar las 2 mil iteraciones. En otras palabras, se requiere solamente 2 minutos para encontrar resultados cercanos al óptimo. Esto habla bien de la herramienta ya que aparte de encontrar resultados con alta calidad, lo hace en un tiempo muy corto.

El resto de la Tabla 7 presenta los resultados promedios de los tiempos primarios, respaldos y CTIs. Los cuales se observa que son resultados muy prácticos.

### Agradecimiento

Los autores agradecen el apoyo y el esfuerzo de la Universidad Autónoma de Campeche para que sus investigadores y estudiantes difundan los temas de investigación en los cuales están inmersos.

### Conclusiones

El diseño y la programación del GA para la optimización de coordinación de DOCRs puede llevar meses, sin embargo, ofrece un resultado muy aceptable. Si un Ingeniero de Protecciones requiere coordinar un conjunto de DOCRs en un sistema eléctrico de potencia mallado, este puede optar por usar esta herramienta desarrollada, la cual puede encontrar los ajustes apropiados y solucionar el problema de coordinación de protecciones en minutos de tiempo con resultados cercanos al óptimo.

Si el Ingeniero coordina el mismo sistema de forma manual podrá tardar días o semanas dependiendo de la conectividad y complejidad y no necesariamente obtendrá resultados cercanos al óptimos o no necesariamente logrará coordinar todos los DOCRs (cumplir todas las restricciones). Con los resultados obtenidos se concluye que se ha cumplido el objetivo y la hipótesis es afirmativa. Los sistemas con DOCRs que requiere un estudio de coordinación de protecciones pueden ser: el mismo sistema en diferentes estaciones del año (diferente capacidad de generación-demanda); el sistema, pero con ciertos cambios topológicos debido a la naturaleza de la operación del sistema (por mantenimiento, por costos o por contingencias); o simplemente otro sistema nuevo donde se requiere realizar dicho estudio para ajustar las protecciones.

### Referencias

Amraee T. (July 2012). Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27 (3), 1415-1422.

Blackburn J. L. & Domin T. J. (2006). *Protective relaying, principles and applications*. (3<sup>rd</sup> edition). CRC Press Taylor & Francis Group.

Gers J. M. & Holmes E. J. (2011). *Protection of Electricity Distribution Networks*. (3<sup>rd</sup> edition). IET.

*IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, IEEE std C37.112-1996*.

Noghabi A. S., Sadeh J. & Mashhadi H. R. (July 2010). Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (3), 1348-1345.

Saadat H. (1999). *Power system analysis*. McGraw-Hill.

Singh M., Panigrahi B.K. & Abhyankar A.R. (2013). Optimal coordination of directional over-current relays using Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm. *Elsevier International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 50, 33-41.

Sueiro J. A., Diaz-Dorado E., Miguez E. & Cidras J. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using evolutionary algorithm and linear programming. *Elsevier International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 42, 299-305.

Urdaneta A. J., Restrepo H., Marquez S. & Sanchez J. (January 1996). Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11 (1), 122-129.

## Películas de SRO-HFCVD como dieléctrico en estructuras MIS y sus propiedades eléctricas

### SRO-HFCVD films as dielectric in MIS structures and their electrical properties

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia†, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David y CASCO-VASQUEZ, José Federico\*

*Instituto Tecnológico de Apizaco, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México/Carretera Apizaco-Tzompantepec, esquina con Av. Instituto Tecnológico S/N. C.P. 90300. México.*

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 sur, Edificios IC5 y IC6, C.U., Col. San Manuel, Puebla, Pue. 72570, México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Haydee Patricia, Martínez-Hernández / ORC ID: 0000-0001-8863-4689, CVU CONACYT ID: 353253

ID 1<sup>er</sup> Coautor: José Alberto, Luna-López / ORC ID: 0000-0002-7647-3184, CVU CONACYT ID: 200808

ID 2<sup>do</sup> Coautor: José Álvaro David, Hernández-De la luz / ORC ID: 0000-0002-7913-0240, CVU CONACYT ID: 240901

ID 3<sup>er</sup> Coautor: José Federico, Casco-Vásquez / ORC ID: 0000-0002-9593-9760, CVU CONACYT ID: 74965

DOI: 10.35429/JEE.2020.12.4.10.15

Recibido Enero 15, 2020; Aceptado Junio 30, 2020

#### Resumen

Este trabajo presenta los resultados de la caracterización electro-óptica de una estructura MIS obtenida al depositar una película de un Óxido de Estaño dopado con Indio (ITO) sobre una película de Óxido de Silicio Rico en Silicio (SRO) usando el sistema de depósito químico en fase vapor activado por Filamento Caliente (HFCVD). Las películas SRO-HFCVD fueron depositadas considerando dos flujos de hidrógeno de 25 y 100 sccm, para crecer películas sencillas y dobles (bicapas) siendo ambas tratadas térmicamente a 1100°C para mejorar sus características ópticas y estructurales. Con las técnicas de Espectroscopia nula, XPS y fotoluminiscencia se hace el estudio que determina los espesores de las películas SRO, cuantifica el exceso de silicio presente en ellas y analiza sus espectros correspondientes. Estas películas funcionan como la capa activa en estructuras del tipo Metal-Aislante-Semiconductor (MIS), y fueron caracterizadas eléctricamente a través de las curvas I-V. Del resultado de estas caracterizaciones se hace una comparación entre las estructuras MIS con películas vírgenes (V) y con las películas tratadas térmicamente (T-T). Los resultados obtenidos indican que las películas SRO-HFCVD con T-T modifican significativamente las propiedades ópticas y eléctricas de las estructuras MIS, lo que es prometedor para el diseño de sensores ópticos integrados.

#### Abstract

This paper presents the results obtained by the electro-optical characterization of a MIS structure built by depositing a film of an *Indium Tin Oxide* (ITO) on a Silicon Rich Oxide (SRO) film using the Chemical Vapor Deposition Hot Filament (HFCVD) system. The SRO-HFCVD films were deposited considering two hydrogen fluxes levels at 25 and 100 sccm, under these conditions we grow single and double films, both being heat treated at 1100 ° C to improve their optical and structural characteristics. Through of the techniques of Null Spectroscopy, XPS and Photoluminescence, it was possible to determine the thickness of the SRO films, quantify the silicon excess present in them and analyze their spectra. These films are used as the active layer in Metal-Insulating-Semiconductor (MIS) structures, such structures were electrically characterized through the I-V curves. From the result of these characterizations a comparison is made between the MIS structures with films virgin (V) and with ones heat-treated (T-T). Characterizations indicate that SRO-HFCVD films with T-T significantly modify the optical and electrical properties of MIS structures, which is promising for the design of integrated optical sensors.

Fotoluminiscencia, XPS, Estructuras MIS, Curvas I-V

Photoluminescence, XPS, MIS structures, I-V Curves

**Citación:** MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David y CASCO-VASQUEZ, José Federico. Películas de SRO-HFCVD como dieléctrico en estructuras MIS y sus propiedades eléctricas. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2020. 4-12:10-15.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: haydee.mh@apizaco.tecnm.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El uso de películas y dispositivos procesados a base de silicio son una ventaja clave, debido a su fabricación de alto rendimiento y bajo costo [1-3]. Así, aquellas estructuras que absorben y emiten luz a partir del silicio resultan ser de gran importancia en el campo de la electro-fotónica. En particular, uno de estos materiales es el óxido de silicio rico en silicio (SRO) el cual se considera como un material multifase constituido por una mezcla de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxidos no estequiométricos ( $\text{SiO}_x$ ,  $x < 2$ ) y silicio elemental. Este material ha evolucionado a partir de que DiMaria et al. [4] observó electroluminiscencia en SRO por primera vez, así mismo Leight Caham [5] mediante un grabado electroquímico obtuvo emisión visible de silicio poroso.

El SRO ha sido fabricado por diferentes sistemas, siendo los más comunes los que usan la Deposición de Vapor Químico, como el LPCVD (Deposición de Vapor Químico a Baja Presión) [6, 8-10], el HFCVD (Deposición de Vapor Químico de Filamento Caliente) [6], y el PECVD (Deposición de Vapor Químico mejorada por plasma) [6-8], además de aquellos que usan el sol-gel [10], implante de silicio en  $\text{SiO}_2$  [11], y sputtering [6]. Todos estos sistemas son compatibles con la tecnología de fabricación de circuitos integrados y han dado lugar a novedosos dispositivos tales como guías de onda, memorias no volátiles, supresores de picos, detección de luz y dispositivos de emisión.

Las estructuras MIS para su fabricación, utilizan las películas SRO como la capa activa depositada sobre el sustrato de silicio y en la parte posterior de éste se deposita algún metal como Oro (Au) o Aluminio (Al) que se utiliza como contacto posterior. Mientras que sobre la capa activa se deposita una película de óxido de estaño dopado con indio (ITO), como óxido conductor transparente (TCO) en lugar de compuertas metálicas [12,20].

Para la realización de este trabajo, las estructuras MIS están conformadas por películas SRO-HFCVD depositadas sobre silicio con contactos metálicos de Au y de ITO las cuales son energizadas eléctricamente, con el objetivo de analizar sus curvas I-V.

Dos flujos de hidrógeno molecular ( $\text{H}_2$ ) de 25 y 100 sccm fueron utilizados para la obtención de películas sencillas  $\text{SRO}_{25}$  y  $\text{SRO}_{100}$  y la combinación de estos flujos para las de doble película  $\text{SRO}_{25/100}$  y  $\text{SRO}_{100/25}$ . Cabe señalar que las estructuras MIS de película sencilla y doble del tipo (V), presentan limitaciones de transporte para un alto voltaje de encendido el cual está cerca del voltaje de ruptura dieléctrica y brincos de corriente, después de los cuales se rompe el dieléctrico. Como una alternativa para mejorar las características ópticas, morfológicas y eléctricas en la estructura MIS, se aplicó el tratamiento térmico [12]. Observando en las estructuras con T-T que después del primer rompimiento la corriente aumenta lentamente con el voltaje, es decir, sigue controlando la corriente. También es notorio que originalmente el mínimo de la corriente a bajos voltajes esta desplazada de cero volts, probablemente debido al atrapamiento de carga en el SRO.

## Objetivo

Correlacionar las caracterizaciones ópticas de las películas SRO-HFCVD sencillas y dobles con las curvas I-V de las estructuras MIS conformadas con estas películas sin y con tratamiento térmico.

## Desarrollo y metodología

Las películas SRO fueron depositadas por el sistema HFCVD (Deposito Químico en fase Vapor activado por Filamento Caliente), donde se usaron sustratos de silicio, tipo P (100), de 2" de diámetro, con una resistividad de 1-5  $\Omega$  y 300 micras de espesor, estos sustratos se limpiaron previamente mediante el proceso estándar MOS [12]. El sistema HFCVD, utiliza flujo de hidrógeno molecular el cual se disocia a 2000°C, esta temperatura se alcanza con 11 filamentos de tungsteno energizados a 74 voltios con una corriente de 38.4 amperios, lo cual genera hidrógeno atómico altamente reactivo, decapando 11 fuentes de cuarzo colocadas abajo de los filamentos incandescentes a una distancia (dff) de 6 mm, obteniendo de esta manera los precursores volátiles que se depositan y adsorben en la superficie del sustrato que se encuentra debajo de las fuentes de cuarzo a una distancia (dfs) de 8 mm [7,8,11].

En el presente trabajo se utilizaron dos flujos de hidrógeno molecular ( $H_2$ ) de 25 y 100 sccm para crecer dos muestras de película sencilla (P-S) etiquetadas como SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>100</sub>, y dos muestras de doble película (D-P) etiquetadas como SRO<sub>25/100</sub> y SRO<sub>100/25</sub>. El tiempo de depósito ( $t_d$ ) para depositar una película sencilla fue de 3 minutos y el tiempo para depositar doble película fue de 5 minutos [7, 8, 11, 13, 14]. Los depósitos de SRO se llevaron a cabo sobre sustratos de silicio (Si). Posteriormente fueron tratadas térmicamente a 1100°C durante 60 minutos en un ambiente de  $N_2$ .

El espesor y el índice de refracción de las películas SRO depositadas sobre sustratos de Si del tipo (V) y con (T-T) se caracterizaron con el elipsómetro Fairfield Modelo NJ 07004-2113. Por otro lado, el exceso de silicio en la composición de las películas SRO se midió con un XPS, PHI ESCA-5500 usando una fuente de radiación monocromática de Al con una energía de 1486 eV. Los espesores promedio, los índices de refracción y los excesos de silicio, se muestran en la Tabla 1. Mientras que los espectros FL de las películas de SRO se midieron con el espectro fluorómetro Fluoromax-3 Horiba Jobin Yvon Fluoromax-3 a temperatura ambiente en el que las muestras se excitaron utilizando una línea de excitación de 300 nm y la señal de emisión se recogió en el rango de 400 a 900 nm.

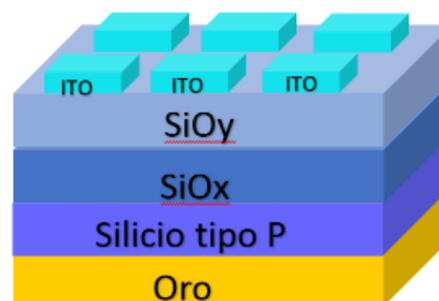
Del tipo (V)			
Muestra	Espesor nm	Índice de refracción $\eta$	Exceso de Silicio %
Si/SRO <sub>25</sub>	322.9	2.46±0.03	9.9
Si/SRO <sub>100</sub>	319.6	2.03±0.35	10.6
Si/SRO <sub>25/100</sub>	592.3	1.46±0.06	
Si/SRO <sub>100/25</sub>	578.9	1.51±.002	
Del tipo (T-T)			
Muestra	Espesor nm	Índice de refracción	Exceso de Silicio %
Si/SRO <sub>25</sub>	296.3	1.30±0.04	5.5
Si/SRO <sub>100</sub>	283.5	1.02±0.08	5
Si/SRO <sub>25/100</sub>	583.3	1.43±0.31	
Si/SRO <sub>100/25</sub>	560.5	1.05±0.65	

**Tabla 1** Espesores, índices de refracción y excesos de silicio de las películas SRO

Para la fabricación de la estructura MIS (Au/Si/SRO<sub>P-S</sub> y D-P/ITO) como se muestran en la Figura 1. Se utilizó como contacto superior óxido de estaño dopado con indio (ITO), debido a que estas películas presentan buena transparencia y conductividad, el método de depósito utilizado fue spray pirolisis ultrasónico [2-5], mediante un nebulizador a una temperatura de depósito de 450°C.

Mientras que para el contacto posterior se depositó Au mediante la técnica de Sputtering utilizando el equipo Denton Vacuum Desk V [2-6], con los parámetros de depósito de presión de vacío de 50 mTorr y una corriente DC de 25 mA y el blanco usado con una pureza 4N.

El espesor del contacto obtenido con un tiempo de depósito de 600 s fue de 90 nm.

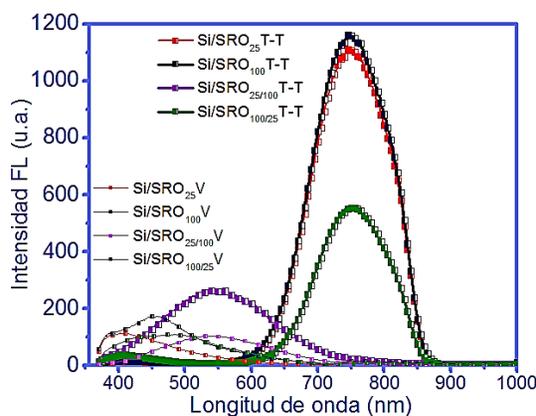


**Figura 1** Estructura MIS construida con películas de SRO como capa activa depositadas por el sistema HFCVD

## Resultados

La Tabla 1 exhibe una disminución en el espesor en el índice de refracción y en el exceso de silicio de las películas SRO<sub>T-T</sub> con respecto al de las películas SRO<sub>V</sub>, tal hecho se debe al reordenamiento a escala atómica de las películas provocado por la energía térmica generada por tratamiento térmico, así como a la desorción de las especies O-H, Si-O-Si, Si-H que están débilmente ligadas a las películas SRO y también a la formación de nanocristales de silicio (ncs-Si) y nanoclusters-Si que actúan como centros emisores radiativos, todo lo anterior es generado debido a un cambio en la estequiometría del material que lo lleva a un cambio de fase con estructura molecular similar al SiO<sub>2</sub> [2].

En los espectros fotoluminiscentes (FL) observados en el Gráfico 1, es muy notorio como se incrementa la fotoluminiscencia en las películas de  $\text{SRO}_{\text{T-T}}$  con respecto a las películas  $\text{SRO}_{\text{V}}$ , este incremento es más notorio en la banda roja (750 nm) atribuido a la existencia de confinamiento cuántico generado por los centros radiativos de baja dimensión (nanoestructuras) [6] en la estructura de las películas SRO, destacando más en las de películas sencillas que en las de doble película. Además, se observa que la película  $\text{SRO}_{25/100}$  T-T aunque presenta la menor fotoluminiscencia de las películas de este tipo T-T ésta se ubica en la banda azul (450 nm), el origen de este comportamiento se atribuye a la influencia radiativa de los enlaces débiles de oxígeno (WOB), a las vacancias neutras de oxígeno (NOV) y a algunos centros  $\text{B}_2$   $(\text{SiO})_3=\text{Si}\bullet \bullet\text{Si}=(\text{SiO})_3$ , [34, 5] inmersos en la conformación de la película  $\text{SRO}_{25}$  y  $\text{SRO}_{100}$ , lo que se correlaciona con las curvas I-V de las estructuras MIS que se muestran en el Gráfico 3.



**Gráfico 1** Fotoluminiscencia de películas de una capa y doble capa de  $\text{SRO}_{\text{V}}$  y  $\text{TT}$

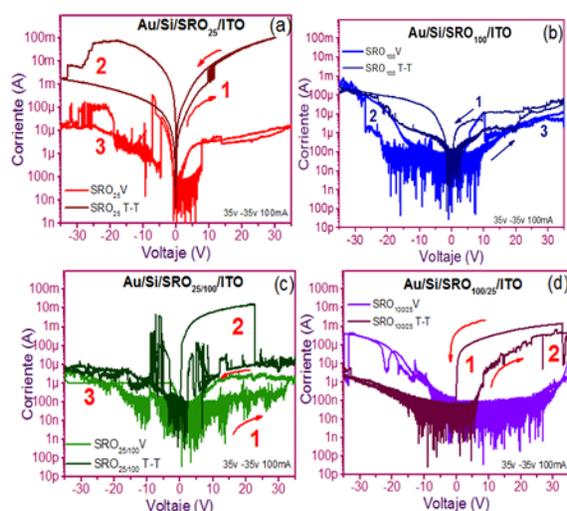
En el Gráfico 2 se muestran las curvas I-V pristinas obtenidas de las estructuras MIS, todas fueron medidas con el mismo barrido de voltaje siguiendo la secuencia de 0v a 35v, de 35v a 0v, de 0v a -35v y de -35v a 0v, con 100mA de protección. Un aspecto relevante que se observa es que las estructuras con películas  $\text{SRO}_{\text{V}}$  muestran curvas disruptivas a corrientes y voltajes muy bajos, en ambas polarizaciones directa (PD) e inversa (PI), posteriormente se incrementa su corriente dependiendo del voltaje aplicado. Para las estructuras con películas  $\text{SRO}_{\text{T-T}}$  todas las curvas I-V alcanzan mayor corriente, se muestra mayor incremento en las estructuras (a y c), coincidentemente las dos tienen la película  $\text{SRO}_{25}$ .

Por otro lado, identificamos comportamientos diferidos contrastantes en las curvas etiquetadas con números. La curva (1) identifica el efecto de la primera medición en la cual se presenta mayor resistencia al flujo de corriente, sin embargo, en el regreso de la curva I-V se observa un estado de menor resistencia al de la curva de ida, este comportamiento se debe a la formación y anulación de caminos conductivos en el material, además, debido a que el camino de regreso no es el mismo, es ahí donde se forma una histéresis por lo que a este comportamiento se le conoce como atrapamiento de carga [8-10].

Este comportamiento se observa en todas las estructuras, pero es notado mayormente en las estructuras con películas que han sido tratadas térmicamente. La curva (2) muestra el fenómeno eléctrico identificado como bloqueo Coulómbico, el cual se caracteriza por presentar aumentos y caídas rápidas de la corriente, esto es atribuido a la existencia de electrones atrapados en estados electrónicos generados por la estructura molecular del material, este hecho genera un bloqueo en la conducción eléctrica [10-15], así como la creación y aniquilación de caminos conductivos preferenciales generados posiblemente por la estructura molecular de los Si-nps estables adyacentes y nanoclusters de silicio inestables (Si-ncls) y la posible creación de defectos debido a la ruptura de enlaces Si-Si [9-10]. En las curvas I-V de todas las estructuras se presenta este efecto tanto en PD como en PI. La curva (3) casi siempre se observa después del Bloqueo Coulombico, se identifica como región de resistencia diferencial negativa (RDN).

La forma que presenta es una serie de brincos de corriente muy pequeños cercanos entre sí, llamado switcheo resistivo, pues según Wang, Y. et al., [10-13] esto significa que, para un rango de valores del voltaje aplicado, un aumento en el voltaje hace que la corriente disminuya en lugar de aumentar y se lleva a cabo cuando los electrones viajan a la misma velocidad de arrastre, el dominio de carga espacial ya no crece más, pero los electrones siguen su viaje y como el campo eléctrico efectivo presente en el material no es suficientemente intenso para formar dominios adicionales [10-12], entonces se forma una región de resistencia diferencial negativa, este fenómeno se observa en las estructuras que tienen las películas  $\text{SRO}_{\text{V}}$ .

Donde la resistividad eléctrica es mayor debido a que el desorden estructural es más acentuado.



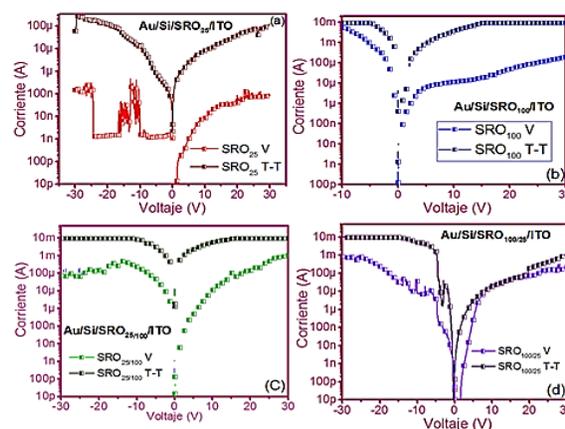
**Gráfico 2** Curvas pristinas I-V de las estructuras MIS de películas sencilla y doble de SRO  $v_{yTT}$

Después de varias mediciones a temperatura ambiente de las estructuras MIS aquí estudiadas y mostradas en el Gráfico 3, estas presentan curvas típicas I-V de las películas con ncs-Si incrustados en una matriz de SiO<sub>2</sub> con un barrido en PI y en PD, como se corrobora en los espectros FL que se observan en la banda roja. Observamos que la corriente de las estructuras MIS del tipo (V) en PD y PI, excepto la de PI del (a), crece muy rápido con el voltaje de inicio como si fuera un corto circuito.

Sin embargo, al llegar entre los 10 y 15 volts la pendiente se reduce y el SRO ahora controla la corriente, la cual es menor que las corrientes que alcanzan las estructuras MIS con T-T. Estas estructuras MIS con T-T muestran también incrementos de corriente a bajos voltajes hasta alcanzar el régimen de alta conducción como es esperado en estos dispositivos [9-13], lo que indicaría que el tener altas corrientes desde el inicio se debe al tratamiento térmico proporcionado a las películas SRO.

Algunos autores [8-10] atribuyen el régimen de alta conducción al transporte de carga en las películas SRO, que contienen Si-ncs y forman caminos de conducción.

Además, señalan que la carga y descarga de los capacitores nanocristalinos equivalentes tienen un gran impacto en los estados de encendido y apagado de los estados de conducción, estos efectos lo han relacionado con el efecto de bloqueo Coulombico (CB) [12,13], mismo que se observa muy poco en estas curvas I-V con T-T debido a que los caminos conductivos fueron formados. No obstante, existen dos mecanismos que pueden producir estos cambios en los estados de conducción ambos relacionados a la carga y descarga de los nanocristales los cuales son responsables de las oscilaciones y saltos abruptos en las curvas de corriente contra voltaje. Uno de ellos debido a la formación de un “efecto de campo” en los caminos de conducción y el otro debido a efectos capacitivos en ellos [10-15].



**Gráfico 3** Curvas I-V de las estructuras MIS de película sencilla y doble de SRO  $v_{yTT}$

## Conclusiones

El análisis electro-óptico de las estructuras MIS muestra que están conformadas por películas nanométricas de SRO-HFCVD sencillas y dobles sin y con tratamiento térmico, las cuales muestran efectos luminiscentes en regiones del espectro que son de interés tecnológico.

Con estos resultados podemos inferir que el sistema HFCVD utilizado para obtener películas de SRO con excelentes propiedades ópticas y estructurales resulta ser una relevante alternativa. Las estructuras de doble película de SRO mejoran la respuesta fotoluminiscente en comparación con las de película sencilla.

Así mismo, las propiedades eléctricas de las estructuras cuantificadas a través de la conductividad eléctrica mejoran cuando las películas con alto contenido de exceso de silicio fueron intercaladas como películas emisoras, generando estructuras MIS con curvas I-V características, en las cuales se han observado fenómenos eléctricos peculiares debido a la compleja estructura molecular de las películas-SRO los cuales no están presentes en materiales dieléctricos homogéneos ordinarios, y estos son: anulación de caminos conductivos en el material, brecha de bloqueo Coulómbico y resistencia diferencial negativa (RDN).

### Reconocimientos

Este trabajo ha sido parcialmente soportado por CONACyT-CB-255062, PROFOCIE 2019 y VIEP-LULJ-EXC-2019. Los autores agradecen a CIDS

### Referencias

- [1] Benítez-Lara, A. et al., (2015). Silicon rich oxide powders by HWCVD: Its optical and morphological properties. *Adv. Powder Technol.* 26, 163–168.
- [2] H. P. Martínez-Hernández, et al., (2020). Spectroscopic and Microscopic Correlation of SRO-HFCVD Films on Quartz and Silicon. *Crystals* 2020, 10, 127; 19.
- [3] Valerdi, D.E.V.; et al., (2014). Twofold SiOx Films deposited by HFCVD: It is Optical, Compositional and Electrical Properties. *Procedia Eng.*, 87, 168–171.
- [4] DiMaria, et al., (1983). Charge transport and trapping phenomena in  $\sigma_0$ -stoichiometric silicon dioxide films. *J. Appl. Phys.* 1983, 54, 5801–5827.
- [5] Canham, L. T. (1990). Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046
- [6] E. Quiroga, et al., (2009). Structural characteristics of a multilayer of silicon rich oxide (SRO) with high Si content prepared by LPCVD, *Phys. Status Solidi A*, 206, n° 2, 263-269.
- [7] Chang, Y. F., et al., (2014). Intrinsic SiOx-based unipolar resistive switching memory. I. Oxide stoichiometry effects on reversible switching and program window optimization. *Journal of Applied Physics*, 116(4), 043708.
- [8] Wang, Y., et al., (2013). Resistive switching mechanism in silicon highly rich SiOx ( $x < 0.75$ ) films based on silicon dangling bonds percolation model. *Applied Physics Letters*, 102(4), 042103.
- [9] Zhou, F., et al., (2015). Stabilization of multiple resistance levels by current-sweep in SiOx-based resistive switching memory. *Applied Physics Letters*, 106(6), 063508.
- [10] Wang, Y., et al., (2014). The x dependent two kinds of resistive switching behaviors in SiOx films with different x component. *Applied Physics Letters*, 104(1), 012112.
- [11] Fu-Chien Chiu (2014) A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films
- [12] J. Juvert, et al., (2009) Electroluminiscencia bajo tensión continua de dispositivos MOS basados en nanocristales de silicio obtenidos por LPCVD.
- [13] J. Alberto Luna López, et al., (2003) “Efecto de la Carga Atrapada obtenida mediante Inducción de Alto Voltaje en la Fotocorriente del Dispositivo Al/SRO/Si”, publicado en las Memorias del Congreso de Ingeniería Eléctrica CIE2003. Pag.177-180, CINVESTAV, 3 al 5 de septiembre del 2003.
- [14] Zhenrui Yu, et al., (2003), Charge trapping phenomenon in Al/SRO/Al on Si structure by lateral electrical stress”, *Superficies y Vacío*, Vol 16(4), pp.25-29.
- [15] F. H Hielsher et al., (1969). “Non equilibrium C-V and I-V Characteristics of Metal-Insulator-Semiconductor Capacitors, *Solid State Electronics*, Vol. 22, pp. 527-538.

## Diseño y construcción de un colorímetro para identificar el desgaste de fusibles comerciales usando sensores fotoeléctricos

### Design and construction of a colorimeter to identify the condition of commercial fuses using photoelectric sensors

TORRES-FLORES, M. Azucena†, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma\* y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos

*Universidad Autónoma del Estado de México, México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: M. Azucena, Torres-Flores / ORC ID: 0000-0003-4367-9431

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Irma, Martínez-Carrillo / ORC ID: 0000-0002-7952-4418, Researcher ID Thomson: B-9264-2016, CVU CONACYT ID: 39914

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Carlos, Juárez-Toledo / ORC ID: 0000-0002-7440-3246, Researcher ID Thomson: C-1368-2016, CVU CONACYT ID: 39912

DOI: 10.35429/JEE.2020.12.4.16.23

Recibido Enero 20, 2020; Aceptado Junio 30, 2020

#### Resumen

El color es una propiedad que podemos observar gracias a nuestra percepción visual; sin embargo, es necesario de un instrumento para realizar la cuantificación en la escala RGB. El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un colorímetro para identificar el grado de desgaste de las terminales de un fusible residencial convencional, que ha sido expuesto a su desgaste normal. El estudio se realiza por medio de la cuantificación de la reflexión de la luz en la escala RGB. El sensor desarrollado consta de:

- Una base cilíndrica elaborada en una impresora 3D, la cual permite aislar la luz externa y la introducción de la parte superior el casquillo del fusible.
- Un circuito electrónico conformado básicamente en un led emisor de luz RGB y una fotorresistencia.
- Un programa en Arduino que mide la reflexión del fusible en la escala RGB.

La implementación del sensor permite la identificación de los fusibles en mal estado y los cuales pueden provocar fallos en el sistema eléctrico, trabajos futuros estarán encaminados a la cuantificación del aumento del consumo energético debido al uso de fusibles en mal estado trasladados al espacio RGB.

#### Escala RGB, fusible residencial, impresión 3D

#### Abstract

Color is a property that we are able to observe thanks to our visual perception; however, an instrument is necessary to perform the quantification on the RGB scale. The purpose of this work is to design and build a colorimeter to identify the wear degree of a conventional residential fuse, the fuse has been exposed to normal wear. The study is carried out using the quantification of light reflection on the RGB scale. The developed sensor consists of:

- A cylindrical base made on a 3D printer, which allows the external light to be isolated and the upper part of the fuse socket inserted.
- An electronic circuit made up of RGB light emitting led and a photoresistor.
- An Arduino program that measures the reflection of the fuse on the RGB scale.

Implementing the sensor will allow the identification of fuses in poor condition, which can cause failures in the electrical system. Future work will be aimed at quantifying the increase of energy consumption due to the use of fuses in poor condition transferred in RGB space.

#### RGB scale, residential fuse, 3D printing

**Citación:** TORRES-FLORES, M. Azucena, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos. Diseño y construcción de un colorímetro para identificar el desgaste de fusibles comerciales usando sensores fotoeléctricos. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2020. 4-12:16-23.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: imartinezca@uaemex.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

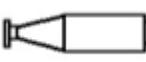
**Introducción**

El uso eficiente de la energía eléctrica ha sido uno de los temas de interés mundial, donde la sociedad en general podemos colaborar activamente desde cualquiera de nuestras actividades cotidianas, como lo instituye en el Marco Político de Largo Plazo para la Eficiencia Energética que establece dentro de la línea transversal el realizar campañas de información, capacitación y mejores prácticas (SENER, 2016).

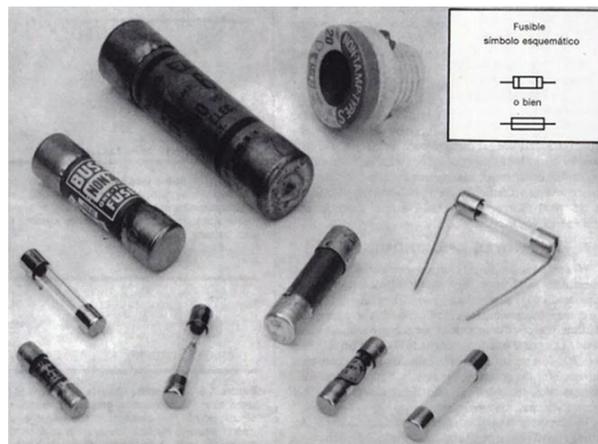
En relación con el uso eficiente de la energía, grandes medidas se han realizado para disminuir el consumo energético eléctrico innecesario, por ejemplo: por medio de un mantenimiento y supervisión del buen funcionamiento de circuitos, cambio de cables, mejora de equipos monitoreo de estado de fusibles, uso de interruptores diferenciales y cambio de dispositivos en mal estado.

El fusible residencial convencional es un dispositivo que tiene como principal función proteger las instalaciones eléctricas de sobrecargas o corto circuito, cuenta con una lámina de metal en la parte interior que al recibir un aumento de corriente este se abre y corta el paso de corriente evitando posibles daños a los equipos, esto ocurre dentro de un tiempo determinado (Eaton, 2018).

Existen diversos tipos de fusibles y están catalogados de acuerdo con la cantidad de energía que deben dejar pasar, con la finalidad de cubrir diferentes necesidades de protección como se indican en la tabla 1. En la figura 1 se muestran los fusibles más utilizados en la protección residencial.

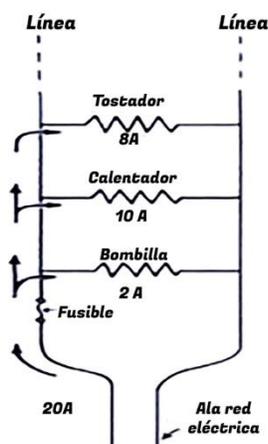
Tipo de fusible		Tamaño
Cuchillas		0.00
		1
		2
		3
		4
Tipo D		D01
		D02
		D03
Cilíndricas		10x30 mm
		14x51 mm
		22x58 mm

**Tabla 1** Tipos de fusibles  
Fuente: (García, 2008)



**Figura 1** Aspecto de fusibles comunes  
Fuente: (Rinaldo, 1995)

Un fusible es el elemento más sensible de la instalación eléctrica, su función es que, en caso de sobrecarga, sea el componente que deba de cortar la corriente eléctrica, un ejemplo de su instalación se muestra en la figura 2.



**Figura 2** Diagrama eléctrico de una instalación doméstica convencional  
Fuente: (Hewitt, 2002)

Como se muestra en la fig. 2, el fusible se encuentra en el suministro de la red eléctrica en el cual al ocurrir un fallo en el sistema este abrirá para cortar el suministro de energía con lo que se protege el sistema. Sin embargo, se ha identificado que cuando un fusible permanece en una instalación trabajando en los límites para los que fue diseñado o bajo condiciones de humedad para los cuales no fue diseñado tiende a perder sus propiedades de baja resistencia eléctrica y pasa a ser una carga conectada en serie del sistema. Es por lo que en este trabajo se realiza un análisis del color de los fusibles comerciales residenciales para identificar el grado de desgaste de los fusibles.

Un fusible se consigue a bajo precio, con una vida útil de aproximadamente 20 años sin sobrepasar sus capacidades nominales, no genera costos de mantenimiento (Guzmán, 2012).

Cuando el fusible se ha fundido es necesario reemplazarlo por uno nuevo que tenga las mismas características y así asegurar la protección de los conductores, no se debe intentar componer la falla o puentear al cartucho para evitar incendios (Bastián et al., 2001). Por otro lado, están los fusibles renovables, que cuenta con una lámina insertada en la parte interior la cual se fundirá si recibe una sobrecarga, sin embargo, esta lamina puede ser sustituida por una nueva sin tener que cambiar el resto del fusible (Harper, 2004).

Esto es posible con la aplicación de la tecnología en un dispositivo que sea capaz de identificar la concentración de color en un elemento como el fusible, mismo que forma parte de las instalaciones domésticas, al conocer la concentración de color es posible saber si está funcionando de forma correcta.

El objetivo del presente trabajo es diseñar y construir un dispositivo (colorímetro) que sea capaz de reconocer e identificar el color de los casquillos de metal de los fusibles de cartucho tipo h para conocer el estado y cambiarlos como mantenimiento preventivo.

### Diseño de sistema Autónomo de identificación de color

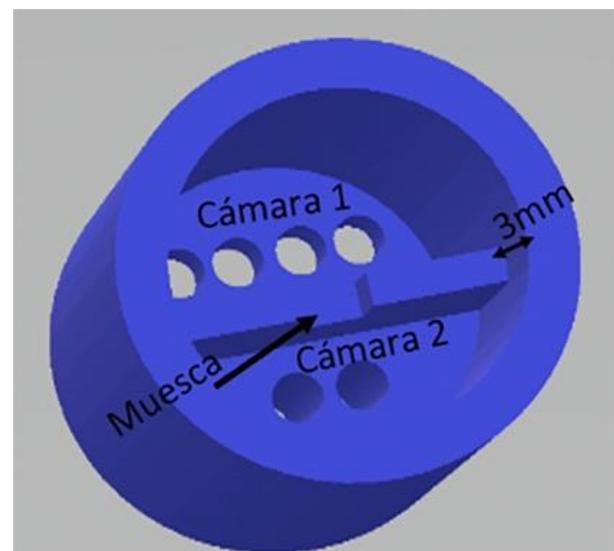
El diseño y desarrollo de un sistema autónomo que identifique el color permitirá conocer la saturación de color que tienen los fusibles de cartucho tipo H, con respecto a lo quemados que se encuentran.

El ahorro de energía es responsabilidad de todos y desde casa tenemos la oportunidad de hacerlo, actualmente existen diferentes sistemas inteligentes que trabajan gracias a la energía eléctrica y en favor de su ahorro.

En el presente trabajo se ha desarrollado el prototipo de un colorímetro que es capaz de identificar el tono y la saturación de color en fusibles de cartucho.

Su diseño está especialmente creado en SolidWorks, impreso en una impresora 3D y tomando en cuenta los fusibles de cartucho tipo H, las principales características de la cámara son (ver figura 3):

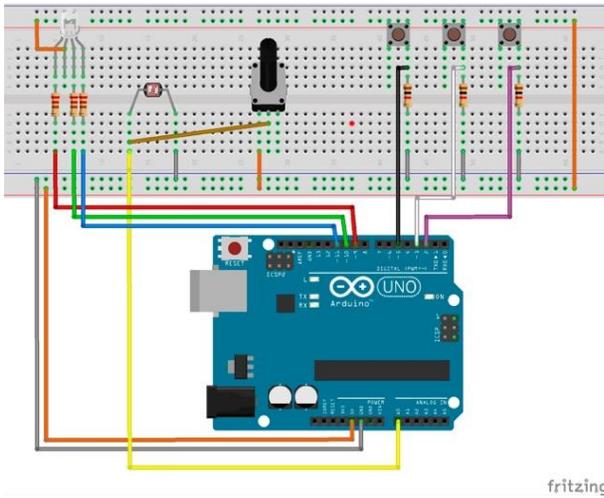
- Tiene una profundidad para insertar el casquillo metálico del fusible de 3mm.
- Cuenta con una cámara 1 para albergar el led RGB.
- La cámara 2 contiene el sensor fotoeléctrico.
- Tiene una muesca o hueco entre las cámaras para dejar pasar la luz de reflexión del casquillo metálico.



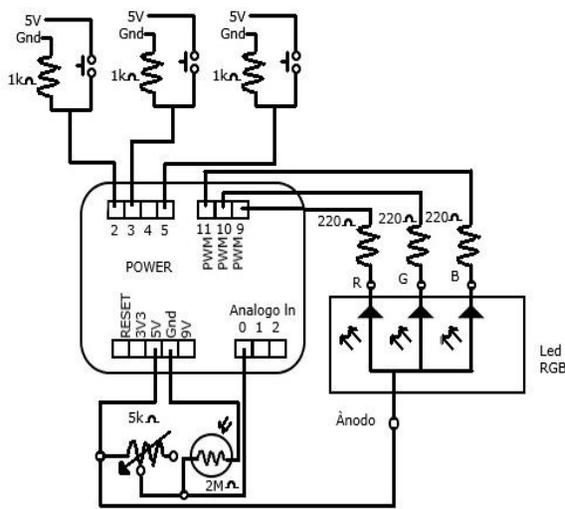
**Figura 3** Base diseñada en SolidWorks e impresa en una impresora 3D para toma de lecturas del colorímetro

*Fuente: Elaboración propia*

El sistema electrónico cuenta con dos botones de calibración del dispositivo y un botón actuador para iniciar el sistema de cuantificación del color. En las figuras 4 y 5 se muestra el diagrama físico y eléctrico respectivamente del circuito de control de color.



**Figura 4** Diagrama físico  
Fuente: Elaboración propia

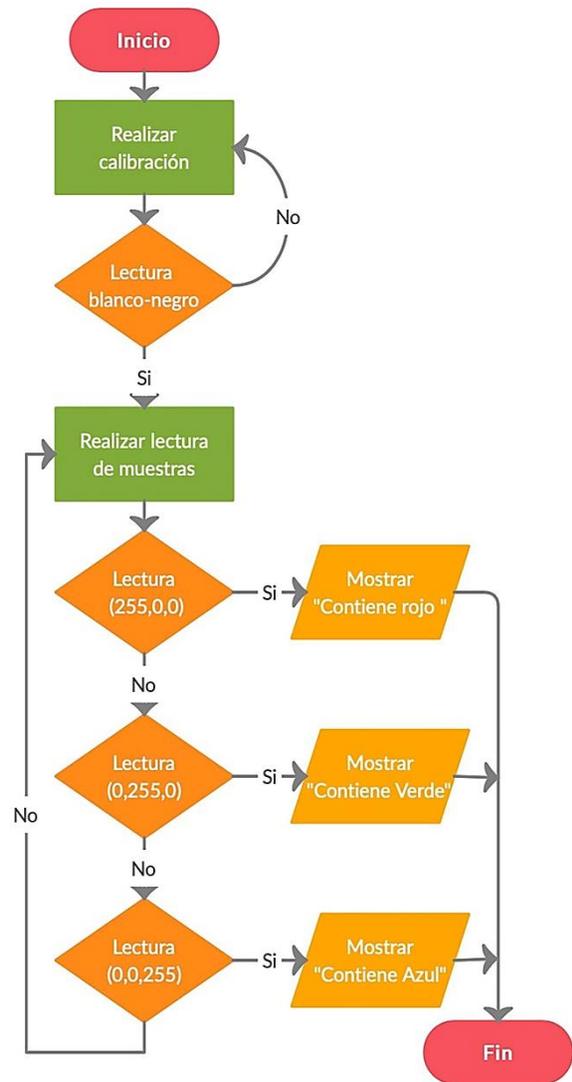


**Figura 5** Diagrama eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

El sistema también cuenta con un potenciómetro de calibración de la fotorresistencia un led RGB protegido por tres resistencias.

El circuito electrónico básicamente consiste en emitir tres luces (Rojo, Verde y Azul) sincronizadas y tomar las lecturas de reflexión por medio de la fotorresistencia.

La programación en Arduino consiste en un bloque de calibración y tres bloques de accionamientos los cuales envían diferentes valores de referencia para obtener los colores Rojo (255,0,0), Verde (0,255,0) y Azul (0,0,255), los cuales son monitoreados por la fotorresistencia, los valores del sensor son almacenados en memoria y mostrados en el monitor serie del software. La figura 6, muestra el diagrama de flujo para la programación del código para obtener las mediciones de color.



**Figura 6** Diagrama de flujo de la programación de medición de color  
Fuente: Elaboración propia

El prototipo desarrollado es de aproximadamente 14 centímetros y con un peso no mayor a 400 gramos, características que lo hacen portátil. En la figura 7 se muestra el prototipo desarrollado mostrando los botones de calibración, botón de accionamiento, cámara la cual contiene la fotorresistencia y el led RGB y el potenciómetro de calibración.

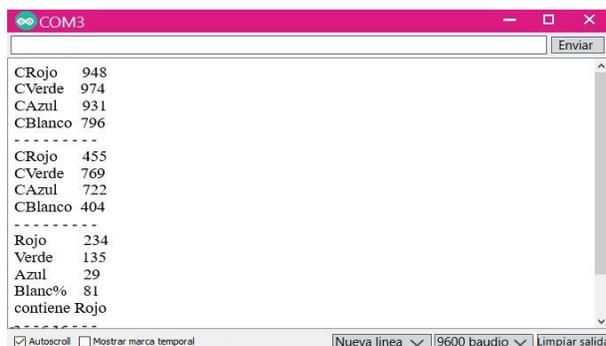


**Figura 7** Prototipo de colorímetro encapsulado  
Fuente: Elaboración propia

Durante la toma de lectura es necesario mantener conectado el prototipo por medio de la tarjeta Arduino a la computadora, la cual se describe de la siguiente manera:

- Abrir el software de Arduino comprobando el puerto COM de conexión.
- Conectar la tarjeta Arduino a la computadora, verificando el estado de parpadeo del led.
- Cargar el código en la tarjeta tomando en cuenta que no presente errores durante el proceso.
- Abrir el monitor serial para poder visualizar las lecturas cotejando que la velocidad de transmisión sea la adecuada.
- Calibrar el prototipo: colocar una tarjeta blanca sobre la superficie cilíndrica y oprimir el botón blanco, posteriormente pasar una tarjeta negra y oprimir el botón negro, con este proceso se almacena en memoria la máxima y mínima reflexión posible de un objeto, después de realizar la calibración, el dispositivo está listo para tomar la lectura y determinar el tono que predomina en la muestra.
- Tomar la lectura del fusible: colocar la parte metálica del fusible en la parte cilíndrica del prototipo y oprimir el botón de accionamiento

Una vez realizados los siguientes pasos, es posible visualizar los resultados en la consola de Arduino como se muestran en la figura 8.



**Figura 8** Monitor serial de Arduino y programa cargado en el dispositivo

*Fuente: Elaboración propia*

Después de tomar la lectura de la muestra es posible obtener la siguiente tabla 2.

Muestra	Rojo	Verde	Azul
m1	245	185	90
m2	264	109	104
m3	254	167	66
m4	193	105	38
m5	94	41	19
m6	74	31	16
m7	93	37	12
m8	59	19	0

**Tabla 2** Saturación de colores identificados

*Fuente: Elaboración propia*

Se observa la saturación de color detectada por el colorímetro, con diferentes resultados respecto a su uso, en todas las muestras prevalece con mayor saturación el color rojo, el verde disminuye proporcionalmente con respecto al rojo y en la mayoría de los casos el azul hace lo mismo con respecto al color verde, también es posible observar que el color verde y azul en algunos casos tiene el mismo valor.

## Resultados

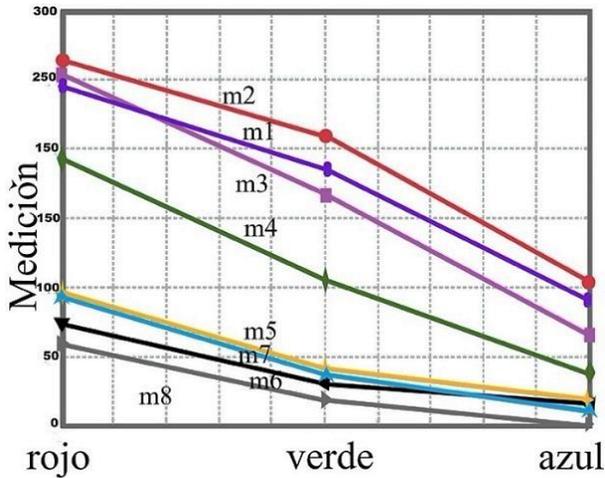
Los fusibles utilizados para el desarrollo de este trabajo son fusibles de cartucho tipo H de 30 Amperes de baja tensión, para uso residencial. En la figura 9 se pueden apreciar los cuatro fusibles analizados, midiendo la parte superior e inferior de cada uno. En la figura 9 se puede observar a simple vista el desgaste de los fusibles, y es importante mencionar que los valores de los casquillos 1, 2 corresponden a los fusibles con menor desgaste y los valores 7 y 8 son los de mayor desgaste.



**Figura 9** Muestras utilizadas en colorímetro

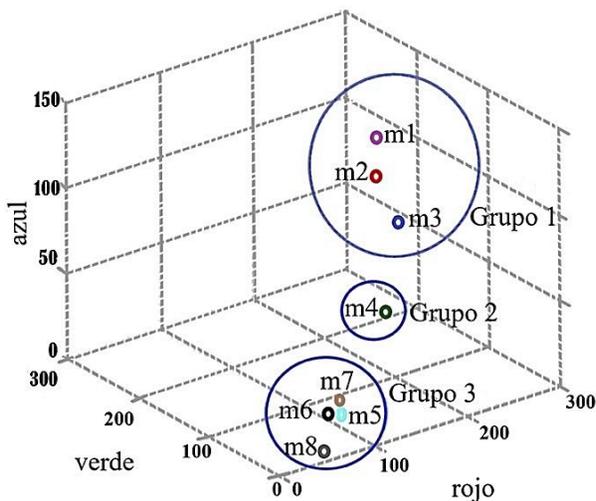
*Fuente: Elaboración propia*

Además, es posible observar que mientras más quemada está la muestra la saturación del color cambia. El gráfico 1 y el gráfico 2 muestran las mediciones obtenidas de color RGB.



**Gráfico 1** Medición en 2D de color RGB

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 2** Comportamiento de muestras en espacio RGB

Fuente: Elaboración propia

En los gráficos 1 y 2 se identifica tres grupos o clusters formados por:

- Grupo 1 casquillos con menor desgaste, m1, m2 y m3.
- Grupo 2 casquillos con mediano desgaste correspondiente al casquillo m4.
- Grupo 3 casquillos con mayor desgaste m5, m6, m7 y m8.

Para el caso de la muestra 1, 2 y 3, los niveles son más altos con respecto al resto de las muestras lo cual indica el bajo nivel de desgaste de los casquillos de este grupo.

En las muestras 3 y 4 a pesar de ser de un mismo fusible existe una variación significativa, lo cual indica que uno de los casquillos se encuentra más estrazado que su par.

A diferencia de las muestras 5, 6, 7 y 8 están notablemente alejadas del resto de los casquillos, los valores identificados se encuentran cercanos en esos casos, llegando a saturaciones más bajas de rojo, lo cual es congruente con el mayor tiempo que estuvieron en uso estos fusibles y además de que tuvieron que ser cambiados de la instalación por presentar un visible deterioro de las terminales.

## Conclusiones

Con la finalidad de determinar el grado de desgaste de un fusible residencial, en el trabajo se desarrolló un prototipo que cuantifica el espectro de reflexión RGB de los fusibles residenciales. Para la implementación de su funcionamiento, se realizaron pruebas en diferentes fusibles con diferentes grados de desgaste.

El dispositivo está elaborado en ambiente Arduino y con procesamiento de datos en Matlab, es capaz de tomar lecturas de fusibles formado grupos “clusters” con índices de patrones congruentes. Trabajos futuros estarán encaminados a cuantificar la variación del gasto energético, así como del cambio de resistencia de los fusibles debidos a su desgaste.

## Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de México, UAP Tianguistenco, recursos PFCE 2020.

## Referencias

Bastian, P., Eichler, W., Huber, F., Jaufmann, N., Manderla, J., Spielvogel, O., Springer, G., Stricker, F., Klaus, T. (2001). *Electrotecnia*, Akal.

Cervantes, J. R. (2000). *Protección en Sistemas Eléctricos*, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Cruz, A. J., Cardona, G. J. & Hernández, P. D. (2013). Aplicación electrónica para el ahorro de energía eléctrica utilizando una energía alternativa. *Entramado*, 9(2), 234-248.

Eaton. (2018). *Fundamentos acerca de la protección contra sobrecorriente*. Bussmann series, Powering Business Worldwide.

- García, T. J. (2008), *Instalaciones Eléctricas En Media y Baja Tensión* (6ta edición). Paraninfo.
- Guzmán, M. G. (2012), Manual para coordinación de fusibles en la red de media tensión [Manual de bachillerato], Escuela de Ingeniería Eléctrica, Costa Rica.
- Harper, E. (2004). Manual Práctico de Instalaciones Eléctricas, (2da Edición), Limusa.
- Hewitt, P. G. (2002), *Conceptual Physics*, Novena edición, Pearson Educación.
- Kamal Anoune., Mohsine Bouya., Abdelali Astito., Abdellatif Ben Abdellah. (2018). Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 652–673.
- Kamal T., Hassan S. Z., Li Hui., Mumtaz S., Khan L. (2016). Energy management and control of grid-connected wind/fuel cell/battery Hybrid Renewable Energy System. In: *International Conference on Intelligent Systems Engineering (ICISE)*, Islamabad; p. 161–6.
- Lagorse, J., Paire, D., Miraoui, A. (2010). A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy* 35, 174-182.
- Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., Ríos-Moreno, G. (2012). Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: a review of methodologies. *Solar Energy* 86, 1077-1088.
- Ma, T., Yang, H., Lu, L. (2014). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 3, 304-315.
- Morales, R. D. & Alvarado, L. E. (2014). Análisis del consumo de energía eléctrica domiciliar en Tampico, Tamaulipas. *Ciencia UAT*, 8(2), 62-67.
- Onar, O., Uzunoglu, M., Alam, M. (2008). Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system. *Journal of Power Sources* 185, 1273-1283.
- Panapakidis, I., Sarafianos, D., Alexiadis, M. (2012). Comparative analysis of different grid-independent hybrid power generation system for a residential load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 551-563.
- Pecen, R., Nayir, A. (2010). Design and implementation of a 12kW Wind-Solar distributed power instrumentation system as an educational testbed for electrical engineering technology students. *Proceedings of the international Symposium Modern Electric Power System (MEPS)*. Wroclaw, Polonia.
- Rinaldo, P. (1995), *Guía Internacional del Radioaficionado*, Marcombo.
- Secretaria de Energía (2016) Marco Político de Largo Plazo para la Eficiencia Energética.
- Skoplaki, E., Palyvos, J.A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy* 34, 23–29.
- Stuchlý, J., Vramba, J., Misák, S. (2013). Monitoring of hybrid system using Labview. 13 th international conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Wroclaw, Polonia.
- Uzunoglu, M., Onar, O., Alam, M. (2009). Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. *Renewable Energy* 34, 509-520.
- Vivas, F.J., De las Heras, A., Segura, F., Andújar, J.M. (2018). A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 126–155.
- Wang, Ch., Chen, W., Shao, S., Chen, Z., Zhu, B., Li, H. (2011). Energy management of stand-alone hybrid PV system. *Energy Procedia* 12, 471-479.
- Yang, H., Lu, L., Burnett, J. (2003). Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic-wind power generation systems in Hong Kong. *Renewable Energy* 28, 1813-1824.

Zahraee S.M., Khalaji Assadi M., Saidur R. (2016). Application of Artificial Intelligence Methods for Hybrid Energy System Optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66, 617–630.

Zahran, M., Atia Y., Al-Hussain, A., El-Sayed, I. (2010). Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation. Wisconsin USA.

## Diseño e implementación de un sistema de control a lazo cerrado PID para manipular la temperatura en el proceso de termoformado

### Design and implementation of a PID closed-loop control system to manipulate the temperature in the thermoforming process

ROSALES-DAVALOS, Jaime†\*, GIL-ANTONIO, Leopoldo, MASTACHE-MASTACHE, Jorge Edmundo y LÓPEZ-RAMÍREZ, Roberto

*Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Carretera Toluca-Atlaconulco KM 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín Jocotitlán, 50700 Jocotitlán, Estado de México, México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Jaime, Rosales-Davalos / ORC ID: 0000-0002-9059-6093, Researcher ID Thomson: MVQ9OX-GXKHUL, CVU CONACYT ID: 812961

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Leopoldo, Gil-Antonio / ORC ID: 0000-0002-7445-9426

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Jorge Edmundo, Mastache-Mastache / ORC ID: 0000-0001-6104-6764, Researcher ID Thomson: H-1187-2018, CVU CONACYT ID: 544943

ID 3<sup>er</sup> Coautor: Roberto, López-Ramírez / ORC ID: 0000-0001-8341-3684, CVU CONACYT ID: 233228, SNI CONACYT ID: 63850

DOI: 10.35429/JEE.2020.12.4.24.29

Recibido Enero 30, 2020; Aceptado Junio 30, 2020

#### Resumen

El propósito de este trabajo radicó en el diseño e implementación de un sistema de control de temperatura a lazo cerrado (SCTLC), para controlar la transferencia de temperatura en el molde de un sistema de termoprensado, donde se fabrican bloques a partir de los envases multicapa de posconsumo. Se caracterizó la planta (resistencia eléctrica), con los niveles de tensión de corriente alterna (30V, 60V, 90V y 120V) en un tiempo de 60 min. Cada uno de los niveles de voltaje se consideró como temperatura inicial del ambiente. Posteriormente se determinó el modelo de la planta utilizando el software Matlab® y un método analítico con los datos de la curva característica de la planta a una tensión de 120V<sub>AC</sub>, obteniendo la función de transferencia de primer orden. Así mismo, se sintonizó el controlador PID implementado el método Ziegler & Nichols y el software de Matlab® y finalmente se acopló la entrada de referencia, el control, la etapa de potencia, la planta y la retroalimentación. Este proyecto contribuye a controlar y estabilizar la temperatura de la resistencia, implementada en el proceso de termoformado, para la elaboración de bloques utilizando envases multicapas.

Sistema de control a lazo cerrado, Temperatura, Bloques

#### Abstract

The purpose of this work lies in the design and implementation of a closed-circuit temperature control system (SCTLC), to control the temperature transfer in the mold of the thermo-prepared system, where the blocks are manufactured from multilayer containers. post-consumer. The plant (electrical resistance) was characterized, with the AC voltage levels (30V, 60V, 90V and 120V) in a time of 60 min each of the voltage levels, considering the initial temperature (ambient temperature), in function of the step signal, then, the plant model was determined using Matlab software and the analytical method with the data of the plant characteristic curve at a voltage of 120Vac, obtaining the first-order transfer function, then The PID controller implemented the Ziegler & Nichols method and the Matlab software were tuned and finally the reference input, the control, the power stage, the plant and the feedback were coupled. This project contributes to control and stabilize the resistance temperature, implemented in the thermoforming process, for the production of blocks using multilayer containers.

Closed loop control system, Temperature, Blocks

**Citación:** ROSALES-DAVALOS, Jaime, GIL-ANTONIO, Leopoldo, MASTACHE-MASTACHE, Jorge Edmundo y LÓPEZ-RAMÍREZ, Roberto. Diseño e implementación de un sistema de control a lazo cerrado PID para manipular la temperatura en el proceso de termoformado. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2020. 4-12:24-29.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: jaime.rosales@tesjo.edu.mx)

## Introducción

Actualmente, los sistemas de control son importantes en el desarrollo, avance de la civilización y la tecnología; se encuentran en los sectores industriales, el control de calidad de los productos manufacturados, líneas de ensamble automático, control de máquinas y herramientas, tecnología espacial y sistemas de armas, control de computadoras, sistemas de transporte, sistemas de potencia, etc. (Kuo, 1996).

Desde entonces, se utilizan ampliamente en toda la industria, donde proporcionan un rendimiento satisfactorio y robusto para una variedad de procesos (Astróm & Hagglund, 1995).

Los hornos eléctricos son utilizados en la industria y hogar en diferentes aplicaciones, habitualmente el calentamiento de los hornos eléctricos se realiza con resistencias eléctricas colocadas en la parte inferior y superior de la superficie del horno. Su operación del controlador on-off es inestable y el controlador PID es utilizado en tratamientos térmicos muy sensibles. (Grassi & Tsakalis, 2000).

Además, se pretende que cada día los procesos sean más automatizados y con el mayor control posible que minimice los costos de operación y mantenimiento; pero a la vez, que brinde altos estándares de calidad. A su vez, dentro del control por realimentación, la estrategia basada en el algoritmo PID (Proporcional, Integral, Derivativo) (Alfaro, 2005).

La selección de los parámetros del controlador PID tiene un efecto significativo en el rendimiento del control (Yanmei, Yanzhu, & Baoyu, 2011).

También reducir los tiempos de retardo o tiempo muerto, son una parte fundamental de la dinámica de muchos procesos industriales, siendo una limitante para obtener un sistema de control (Vargas, 2012).

Finalmente, las oscilaciones de la temperatura en un horno eléctrico con el valor de referencia dependen del sistema a lazo cerrado a implementar; es decir, con el sistema control on-off se presentan más oscilaciones con respecto al valor de referencia y es inestable, hay un error de compensación menor a la técnica anterior y las oscilaciones disminuyen con control P(proporcional), PI y PID el error desaparece (Güney, Temizkan, Tekin, Samuk, & Cakir, 2020).

Por lo tanto, los sistemas de control se implementan para manipular las variables de control y de salida; que deben ser igual a los valores de referencia; los sistemas de control garantizan la estabilidad y son robustos a perturbaciones y errores en los modelos eficientes, que deben evitar comportamientos bruscos e irreales y fáciles de ejecutar y manipular en tiempo real. (Gutiérrez & Iturralde, 2017).

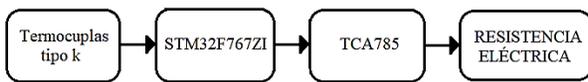
El diseño e implementación de un sistema de control a lazo cerrado PID para manipular la temperatura en el proceso de termoformado disminuye las oscilaciones respecto al valor de referencia, mejora la estabilidad del sistema y tiempo muerto del proceso. Así mismo, reduce el costo de mantenimiento y operación del sistema de control de temperatura on-off implementado en el proceso de termoformado para elaboración de bloque a partir de envases multicapas (Rosales, Enríquez, López, & Mastache, 2019).

Anteriormente, se tenía un sistema de control de temperatura a lazo cerrado On-Off, presentaba tiempos muertos y era inestable; es decir, el valor de temperatura varía con respecto al valor de referencia de 10°C a 30°C. Por eso, en este trabajo se reporta el diseño e implementación de la técnica de control PID para disminuir los componentes electrónicos y electromecánicos, también reducir el tiempo muerto y que sea estable el control de temperatura.

**Descripción del método**

Se determinó la curva característica de la planta (resistencia eléctrica 200 Watts a 120 Volts); es decir, se graficó la temperatura en °C (grados Celsius) en función del tiempo (minutos), donde se suministró 30, 60, 90 y 120 V<sub>AC</sub> (voltaje de corriente alterna) en un periodo de tiempo de 60 min, para cada uno de los niveles de tensión, considerando que la temperatura inicial es igual a la temperatura ambiente.

En la figura 1, se muestra el diagrama a bloques para la obtención de las curvas características de la planta, en otras palabras, el “termocuplas tipo K” obtiene la temperatura de la planta y la suministra al microcontrolador STM32F767ZI que la procesa. Por lo tanto, la salida del microcontrolador es un voltaje de 0 y 7 V<sub>DC</sub> (volts de corriente directa). Dependiendo, del voltaje suministrado por el microcontrolador al circuito TCA785 se manipula el ángulo de disparo que determina la potencia entregada a la planta.



**Figura 1** Diagrama de bloques para la caracterización de la planta

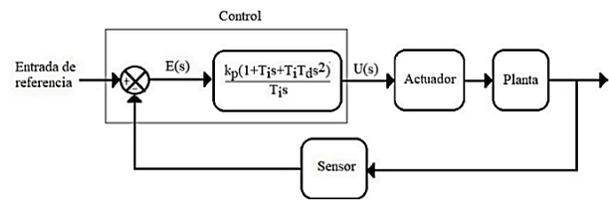
Fuente: Autoría propia

A continuación, de determino la función de transferencia de la planta con el software Matlab, considerando los datos de la curva característica de la resistencia eléctrica cuando se le aplico 120 V<sub>AC</sub> con un tiempo de 60 minutos, obteniendo una función de transferencia de orden uno, ver ecuación 1.

$$G(s) = \frac{k}{Ts+1} \tag{1}$$

Después, se sintonizo el controlador PID, que se simulo con el software de Matlab, en otras palabras, se determinaron los valores de las constantes proporcional (K<sub>p</sub>), integral (T<sub>i</sub>) y derivativo (T<sub>d</sub>). Por otro lado, se implementó el sistema de control a lazo cerrado PID, ver figura 2 (Ogata, 1998).

La entrada de referencia, el comparador y el controlador PID se implementaron a través del microcontrolador “STM32F767ZI”; los circuitos de aislamiento y control de fase se utiliza el circuito TCA785 y un optotriac y el actuador está constituido por el tiristor (triac), la planta es la resistencia eléctrica y para obtener la señal de retroalimentación se utiliza el termocupla tipo k su función es captar temperatura de la planta y enviarla al elemento de comparación.

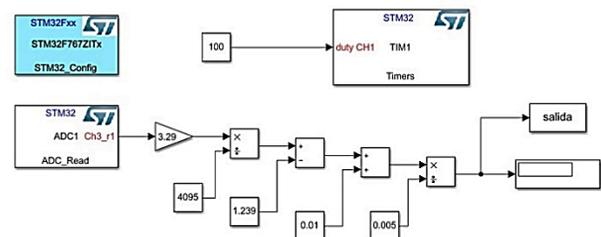


**Figura 2** Diagrama de bloques de un sistema de control industrial

Fuente: (Ogata, 1998)

**Resultados**

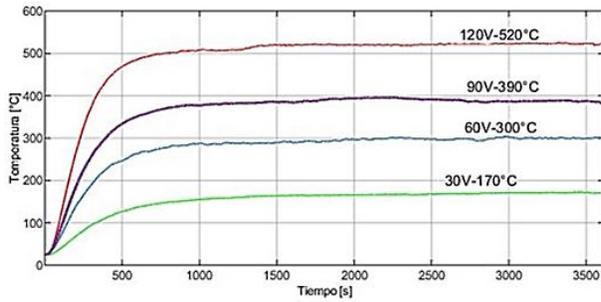
El algoritmo para caracterizar la planta, en otras palabras, determinar la curva de característica de la resistencia eléctrica en función de señal escalón, ver figura 3.



**Figura 3** Programa en Simulink® para adquisición de datos

Fuente: Autoría propia

Las curvas características de la planta para los diferentes niveles de voltaje de 30, 60, 90 y 120 V<sub>AC</sub>, en un tiempo de 60 min, se muestran en la figura 4. Con un tiempo de prueba entre 0 y 500 segundos la temperatura se incrementa y posteriormente de 500 a 3600 segundos se mantiene constante con algunas oscilaciones. Para cada una de las curvas características, se observa que al aumentar potencia en la resistencia eléctrica aumenta la temperatura de estabilización.

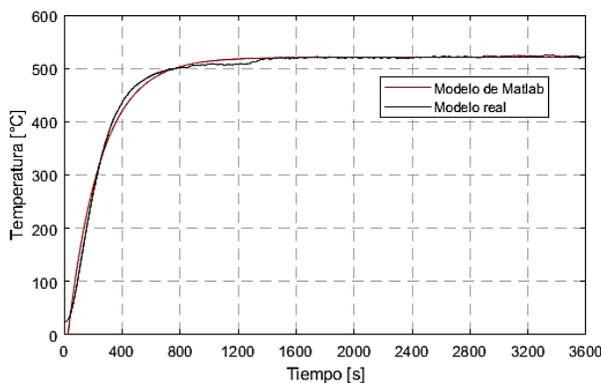


**Figura 4** Curvas características de la planta  
Fuente: Autoría propia

Posteriormente, se calcula la función de transferencia de la planta utilizando la herramienta “Plant Identification” del software Matlab®, utilizando los datos de la curva característica de 120 Vac y 520 °C y la señal escalón de 120 Volts, donde  $k = 4.339$ ,  $T = 227.9$ , finalmente sustituyendo en la ecuación 1 se obtiene la ecuación (2).

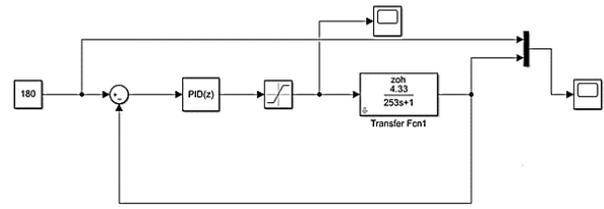
$$G(s) = \frac{4.339}{227.9s+1} \quad (2)$$

En la figura 5, se muestran las gráficas de respuesta de la función de transferencia de la planta simulado, así mismo se presenta la respuesta de la planta considerando las condiciones de la simulación de la función de transferencia real, se observa que la aproximación es de un 92%.



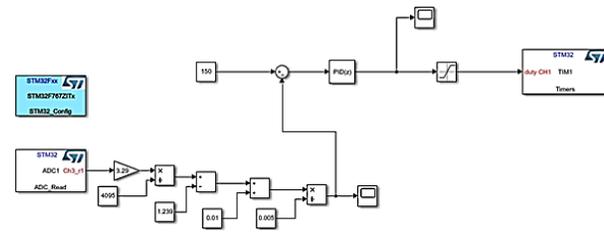
**Figura 5** Graficas de la función de transferencia del modelo real y simulado de la planta  
Fuente: Autoría propia

A continuación, se sintonizo el controlador PID, es decir, se determinaron las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  del controlador, con herramienta “PID tuner” del software de Matlab®, utilizando el diagrama, ver figura 6, Donde  $K_p = 0.4767$ ,  $T_i = 0.00371$  y  $T_d = 5.7580$ .



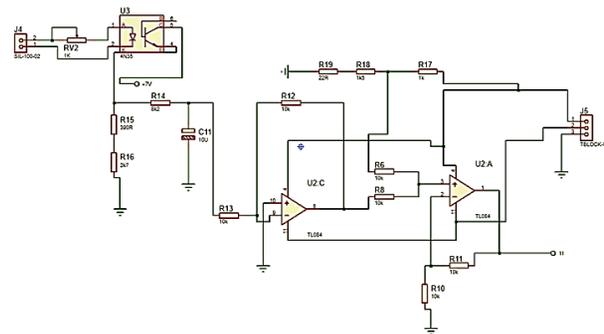
**Figura 6** Diagrama en Simulink® para sintonización de controlador PID  
Fuente: Autoría propia

Figura 7, se muestra el diagrama del controlador propuesto para el sistema de control de temperatura en lazo cerrado del sistema de termoformado. Primeramente, se obtiene el error que es la diferencia entre la entrada de referencia y la señal de retroalimentación que proviene del termocuplas tipo k. Esta señal de error es enviada al controlador PID realizando las correcciones necesarias en la potencia que se suministra a la resistencia. Cuando el error es igual a cero no realiza una ninguna corrección y en caso contrario el PID genera una señal y se envía al TM1 que genera un voltaje digital en la salida de la tarjeta de desarrollo.



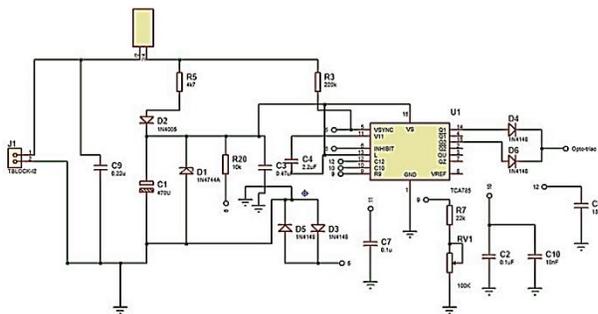
**Figura 7** Programa del controlador PID en Simulink®.  
Fuente: Autoría propia

La señal eléctrica que suministra el microcontrolador es digital, el circuito de control de fase utiliza una señal analógica, en la figura 8, se muestra el circuito para acoplarlos y realizar la conversión de la señal digital analógico.

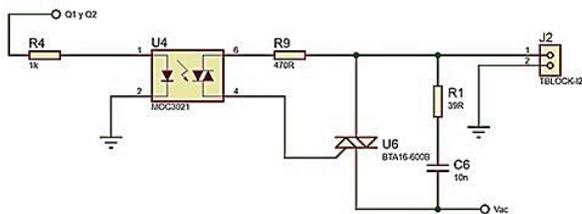


**Figura 8** Circuito de aislamiento y acoplamiento entre el controlador y circuito de control de fase.  
Fuente: Autoría propia

Para controlar la potencia de la planta, se implementó el circuito de control de fase (TCA785), es decir, dependiendo del nivel de voltaje que suministre el controlador al circuito de control de fase entrega dos pulsos uno para el intervalo 0°C a 180°C y de 180°C a 360°C, se muestra en la figura 9, después los dos pulso de salida del circuito de control de fase son enviados al optotriac para aislar la señal de disparo y la compuerta del triac; por lo tanto, se regula la potencia de la planta dependiendo del ángulo de disparo, en el semiciclo positivo y negativo de la señal de corriente alterna, ver figura 10.

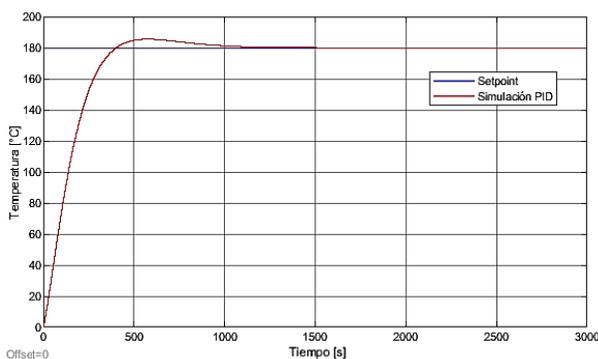


**Figura 9** Circuito de control de fase  
Fuente: (Group, s.f.)



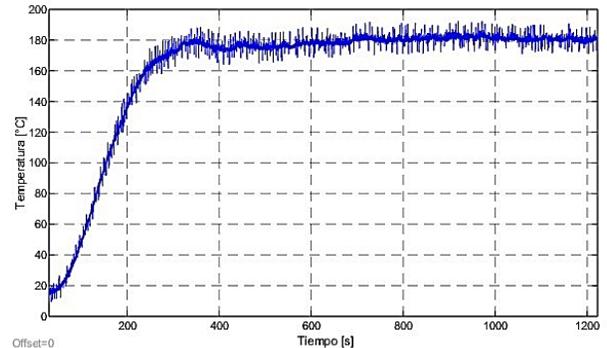
**Figura 10** Circuito regulador de potencia de corriente alterna a la planta  
Fuente: Autoría propia

La simulación del sistema de control PID, se muestra en la figura 11, donde el point es 180 °C, el máximo sobre impulso  $M_P = 3.02\%$ , el tiempo de establecimiento  $T_S = 1150$  segundo y el  $error = 0.1873^\circ\text{C}$ .



**Figura 11** Curva característica del resultado de la simulación del controlador PID  
Fuente: Autoría propia

En la figura 12, se muestra la salida del sistema de control a lazo cerrado, donde  $M_p=2.5\%$ ,  $T_s=500$  segundos y el  $error=0.1876^\circ\text{C}$ .



**Figura 12** Curva característica real del controlador PID  
Fuente: Autoría propia

En comparación con un sistema de control on-off se presentan oscilación 20°C con respecto a la más que la temperatura de referencia y 10 °C menos que el valor de referencia del sistema en un periodo de 200 segundos (Rosales, Enríquez , López, & Mastache , 2019)

**Agradecimientos**

Los autores agradecen a la M. en C. e I. Ma. de los Ángeles Enríquez Pérez por su colaboración en esta investigación.

Al Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán por el apoyo económico y sus instalaciones.

**Conclusiones**

Con el sistema a lazo cerrado considerando un controlador PID se obtuvo una respuesta más estable en comparación con el controlador ON-OFF; es decir, la amplitud de las oscilaciones es menor al sistema de control a lazo cerrado On-Off por esta razón se considera que la implementación del controlador PID es funcional para el control de temperatura del proceso de termoformado.

## Referencias

Alfaro , V. (2005). Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols. *Ingeniería*, 39-52.

Astróm, K., & Hagglund, T. (1995). *PID controllers: Theory, design and tuning*. USA: Instr. Soc. Of America.

Grassi, E., & Tsakalis, K. (2000). PID controller tuning by frequency loop-shaping application to diffusion furnace temperature control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 842-847.

Group, S. (s.f.). Obtenido de <http://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf>  
Güney, A., Temizkan, M., Tekin, S., Samuk, D., & Cakir, O. (2020). Temperature Control of an Electric Furnace with Intuitive Control Methods. *Science Literature*.

Gutiérrez , M., & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y control*. Ecuador: UPSE.

Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Nueva York: Prentice Hall Hispanoamericana S. A.

Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Prentice Hall.

Rosales, J., Enríquez , M. d., López, R., & Mastache , J. E. (2019). Sistema de control de temperatura on-off implementado en el proceso de termoformado para elaboración de bloque a partir de envases multicapas. *Revista de Ingeniería Eléctrica*, 17-21.

st. (s.f.). Obtenido de <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/933989/STMICROELECTRONICS/STM32F767ZI.html>

Vargas , B. (2012). Efectos del retardo en el control de lazo cerrado de plantas sobreamortiguadas. *Industrial Data*, 110-119.

Yanmei, W., Yanzhu, Z., & Baoyu, W. (2011). The control research of PID in heating-furnace system. *International Conference on Business Management and Electronic Information*.

# 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

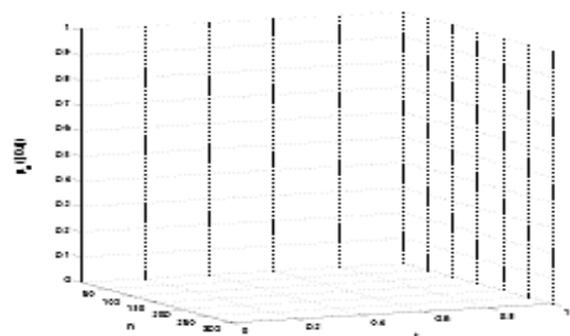
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

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**

1047 Avenida La Raza -Santa Ana, Cusco-Perú. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: [contact@ecorfan.org](mailto:contact@ecorfan.org) [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

**ECORFAN®**

**Editor en Jefe**

QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio. PhD

**Directora Ejecutiva**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

**Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

**Diseñador Web**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

**Diagramador Web**

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

**Asistente Editorial**

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

**Traductor**

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

**Filóloga**

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

**Publicidad y Patrocinio**

(ECORFAN® Republic of Peru), [sponsorships@ecorfan.org](mailto: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](mailto:financingprograms@ecorfan.org)

**Oficinas de Gestión**

1047 Avenida La Raza -Santa Ana, Cusco-Perú.

# Revista de Ingeniería Eléctrica

“Desarrollo del algoritmo genético heurístico para la coordinación de protecciones”

**SHIH, Meng Yen, LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco Román, CHAN-GONZALEZ, Jorge de Jesús y CHE-PUCH, José Gadiel**  
*Universidad Autónoma de Campeche*

“Películas de SRO-HFCVD como dieléctrico en estructuras MIS y sus propiedades eléctricas”

**MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David y CASCO-VASQUEZ, José Federico**  
*Instituto Tecnológico de Apizaco*  
*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

“Diseño y construcción de un colorímetro para identificar el desgaste de fusibles comerciales usando sensores fotoeléctricos”

**TORRES-FLORES, M. Azucena, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos**  
*Universidad Autónoma del Estado de México*

“Diseño e implementación de un sistema de control a lazo cerrado PID para manipular la temperatura en el proceso de termoformado”

**ROSALES-DAVALOS, Jaime, GIL-ANTONIO, Leopoldo, MASTACHE-MASTACHE, Jorge Edmundo y LÓPEZ-RAMÍREZ, Roberto**  
*Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán*

