



**REVISTA**

# IDENTIDAD ENERGÉTICA

**VOLUMEN 5**

**NÚMERO 1**



**AGOSTO 2022**

**ISSN: 2448- 7775**

## Editores en jefe

Dr. Iván Abel Hernández Robles,  
Universidad de Guanajuato,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
(DIE-UG), México.

Dr. José Merced Lozano García,  
Universidad de Guanajuato,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
(DIE-UG), México.

## Editores asociados

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo,  
Centro de Investigación y de Estudios  
Avanzados del IPN - Unidad Guadalajara  
(CINVESTAV GDL), México.

Dr. Juan Segundo Ramírez,  
Facultad de Ingeniería  
de la Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí, México.

Dr. Fredy Sanz Ramírez,  
Universidad Manuela Beltrán,  
Vicerrector de Investigación,  
Bogotá, Colombia.

Dr. Juan Carlos Olivares Galván,  
Universidad Autónoma Metropolitana  
Unidad Azcapotzalco(UAM),  
CDMX, México.

Dra. Gladys Caicedo Delgado  
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Universidad del Valle  
Cali, Colombia.

Dr. Serguei Maximov  
Instituto Tecnológico de Morelia  
Morelia, Michoacán, México.

## Consejo Editorial

Dr. Jesús Martínez Patiño,  
Universidad de Guanajuato,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
(DIE-UG), México.

Dr. Alejandro Pizano Martínez,  
Universidad de Guanajuato,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
(DIE-UG), México.

Dra. Xiomara González Ramírez,  
Universidad de Guanajuato,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
(DIE-UG), México.

Dra. Rafael Guzmán Cabrera,  
Universidad de Guanajuato,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
(DIE-UG), México.

## Coordinación Editorial

Dra. Xiomara González Ramírez,  
Coordinador Editorial y Seguimiento

L.A.D. Lucina Mosqueda Pérez  
Edición, Diseño y Cuidado de Edición

**Salamanca, Gto., México**

<https://cinergiaug.org/REVISTA.html>

---

**VOLUMEN 5    NÚMERO 1    AÑO 2022    ISSN: 2448- 7775**

**Convertidor CA-CA como alternativa para la generación eólica.**

Diego Gutiérrez Torres,  
José Lozano García,  
Juan M. Ramírez,  
Luis Merchán Villalba.  
CINVESTAV GDL, Zapopan, México.  
Universidad de Guanajuato, Salamanca, México.

**04**

**Diseño e implementación de una Arquitectura con orientación a servicios para sistemas tele-operados de captación de agua para generación hidráulica.**

John Alexander Camacho,  
Cristian David Chamorro,  
Nayiver Gladys Caicedo.  
Universidad del Valle, Cali, Colombia.

**10**

**Diseño de prueba sintética de cortocircuito para interruptores de media tensión.**

Juan Camilo Beltrán Solano,  
Juan Camilo Hernández Muñoz,  
Guillermo Aponte Mayor,  
Cesar Tulio Delgado.  
Universidad del Valle, Cali, Colombia.

**18**

**Clasificación automática de radiografías de tórax usando inteligencia artificial.**

Arón Hernández Trinidad,  
T. Cordova Fraga,  
R. Guzmán Cabrera.  
Universidad de Guanajuato, México.

**27**

Recibido 03 de noviembre de 2021. Aceptado 15 de febrero de 2022. Publicado 01 de agosto de 2022.

ISSN: 2448-7775

# Convertidor CA-CA como alternativa para la generación eólica

**DIEGO GUTIÉRREZ TORRES<sup>1\*</sup>, JOSÉ LOZANO GARCÍA<sup>2</sup>, JUAN M. RAMÍREZ<sup>1</sup>, LUIS MERCHÁN VILLALBA<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup>CINVESTAV del IPN – Unidad Guadalajara.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.

\*Autor de correspondencia: diego.gutierrez@cinvestav.mx.

**RESUMEN** En este trabajo se propone un convertidor con estructura matricial para servir de enlace entre la salida de un generador eólico y la red eléctrica, como alternativa al enlace convencional que utiliza corriente directa (CD). Se presentan las diferentes alternativas de convertidores que se han desarrollado para obtener señales eléctricas de corriente alterna (CA) a partir de señales de entrada corriente alterna (CA), destacando las ventajas operativas del convertidor matricial directo. Finalmente, se presenta el sistema WECS (Wind Energy Conversion System) propuesto y se muestran los primeros resultados de simulación del convertidor matricial directo (CMD) CA-CA, utilizando la estrategia de modulación Venturini - Alesina, aplicado en el contexto de la generación eólica, los cuales sirven para validar la efectividad de la propuesta.

**PALABRAS CLAVE** – Turbina eólica, convertidor matricial, generador síncrono de imanes permanentes.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, cada vez es más importante la penetración de fuentes renovables de energía en los sistemas eléctricos. Lo anterior se debe principalmente a preocupaciones ambientales y a políticas en distintos ámbitos dirigidas hacia el desarrollo sustentable. Una de las fuentes renovables de energía con mayor proyección es el viento, esto debido a su abundancia en la naturaleza. La forma de aprovechar la energía del viento es a través de los Sistemas de Conversión de Energía Eólica denominados WECS (Wind Energy Conversion Systems), conformados por una turbina eólica, un generador eléctrico un convertidor basado en electrónica de potencia y el sistema de control correspondiente [1]. Los dispositivos de electrónica de potencia utilizados en los sistemas WECS son los convertidores de frecuencia CA-CA, que pueden convertir la energía eléctrica alterna de una frecuencia específica, en energía eléctrica alterna a una frecuencia distinta. Además, este tipo de convertidor también tiene la capacidad de controlar la amplitud del voltaje de salida, el ángulo de desplazamiento de la carga en relación con el voltaje de la fuente, el ángulo de desplazamiento entre las corrientes y los voltajes de la fuente (factor de potencia de entrada), así como el flujo de potencia bidireccional a través del convertidor [2]. Por lo tanto, debido a los diferentes tipos de convertidores CA-CA que se han desarrollado, es posible implementar diferentes topologías de sistemas WECS. La estructura convencional CA/CD/CA del convertidor de potencia de dos etapas con almacenamiento de energía, o “back to back” ha sido ampliamente utilizada en controladores de máquinas

eléctricas debido a la facilidad en su control, por lo tanto, ha sido una opción recurrente en la implementación de sistemas WECS [3]. No obstante, los convertidores CA-CA con almacenamiento de energía tienen como principal desventaja operativa que el elemento utilizado en el enlace de CD, comúnmente un capacitor electrolítico, los hace voluminosos y con un tiempo de vida útil limitado. Por esta razón, en años recientes se ha incrementado la utilización de convertidores CA-CA sin enlace de CD, en aplicaciones de compensación de energía, controladores de máquinas eléctricas y como dispositivos de acondicionamiento y enlace para fuentes renovables, resultando en topologías con una mayor densidad de energía y que requieren menos mantenimiento [4]-[6]. Dentro de los convertidores CA-CA sin enlace de CD, destaca el Convertidor Matricial (CM) por sus características operativas que incluyen la reducción de tamaño, el control de frecuencia si restricción en la salida, el control de factor de potencia en la entrada, la corriente demandada con bajo contenido armónico, entre otras [7]. Los CMs se pueden clasificar como Directos (CMD) o Indirectos (CMI). Mientras que los CMIs se prefieren en algunas aplicaciones debido a que su control puede resultar más sencillo, y porque en algunas topologías se puede reducir el número de semiconductores, las estrategias de conmutación desarrolladas para los CMDs les permiten realizar la conversión de energía directamente de CA a CA, generando señales eléctricas de buena calidad [8]. En este trabajo se propone la utilización de un CMD como alternativa para su inclusión dentro de un sistema WECS, dado que las ventajas operativas del CM exhibidas en otras aplicaciones lo posicionan como un dispositivo multifuncional que podría

utilizarse para implementar diversas acciones de control sobre el sistema, como la reducción del impacto en la variabilidad de la velocidad del viento, el control del flujo bidireccional de potencia, la adecuada integración de la energía generada a la red eléctrica, por mencionar algunas.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección II se presenta una clasificación de las diferentes topologías de convertidores CA-CA, la Sección III aborda el sistema WECS propuesto, mientras que en la Sección IV se presentan los resultados de simulación obtenidos, y finalmente, en la Sección V se establecen las conclusiones generadas del trabajo.

## II. CONVERTIDORES CA-CA

La clasificación de los convertidores de frecuencia CA-CA en la literatura técnica es variada, porque el desarrollo de los convertidores discutidos está todavía en curso, Fig.1.

### A. CONVERTIDORES CA-CA CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN CD

La topología más tradicional de convertidor de potencia CA-CA es un inversor de fuente de tensión modulada por ancho de pulso (PWM-VSI, *Pulse Width Modulation – Voltage Source Inverter*) con un rectificador de diodos frontal y un condensador como enlace CD, Fig. 2. Este convertidor también se denomina convertidor indirecto de dos niveles con inversor de fuente de tensión (VSI, *Voltage Source Inverter*, por sus siglas en inglés). Un convertidor indirecto consta de dos etapas de conversión, CA a CD y CD a CA, con amplitud y frecuencia variable, además de un elemento intermedio de almacenamiento de energía. El condensador en el enlace de CD desacopla las dos etapas de conversión de energía y asegura su control independiente. El control de las señales de salida se consigue modulando los ciclos de trabajo de los dispositivos de la etapa de inversión para producir corrientes de salida prácticamente sinusoidales, con una amplitud y frecuencia deseadas.

El dispositivo de almacenamiento de energía en CD en los convertidores de frecuencia indirectos es un componente voluminoso. En la solución con Convertidores en Fuente de Voltaje (VSC, *Voltage Source Converter*), los condensadores de enlace son relativamente grandes, reduciendo al mismo tiempo la velocidad de respuesta.

### B. CONVERTIDORES CA-CA SIN ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN CD

Estos convertidores CA-CA sin almacenamiento de energía se dividen en tres grupos. El primer grupo contiene al Convertidor Matricial Directo (CMD) que funciona en dos modos: como fuente de tensión, y como fuente de corriente, de manera similar a los convertidores con almacenamiento de energía. El segundo grupo contiene convertidores indirectos

con un enlace CD ficticio. En el tercer grupo están los convertidores basados en recortadores (*choppers*) de matriz-reactancia con interruptores síncronos de fuente o de carga, conectados como en el Convertidor Matricial (CM). Este concepto se basa en la utilización de elementos de almacenamiento de energía en CA regenerativa como pequeños condensadores o inductores. En estos elementos la energía media durante un periodo de las señales es igual a cero.

Dado que en el presente trabajo se considera la utilización del CMD, a continuación, se presenta una breve descripción de tal dispositivo.

#### 1. Convertidor Matricial Directo

El CMD es un convertidor de una sola etapa conformado por un conjunto de interruptores de potencia bidireccionales arreglados en una matriz de  $m \times n$  para conectar directamente una fuente de tensión de  $m$  fases a una carga de  $n$  fases [7], [9]-[12]. En el caso de un CMD trifásico, se utilizan nueve interruptores bidireccionales, los cuales permiten conectar cualquier de las tres fases de la carga con cualquiera de las tres fases de la fuente de entrada. Esta configuración se aprecia en la Fig. 3.

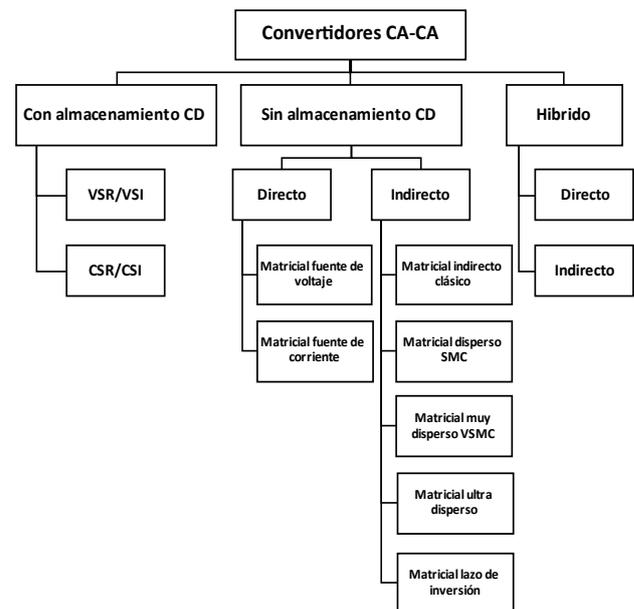


Fig. 1. Clasificación de las topologías de los convertidores trifásicos CA-CA.

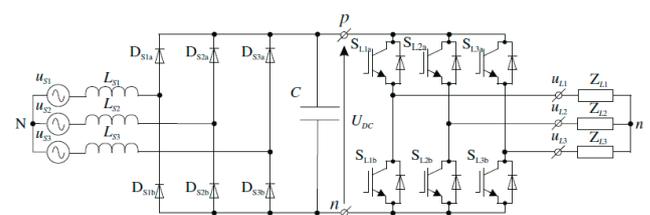


Fig. 2. Convertidor de frecuencia indirecto de dos niveles con inversor de fuente de voltaje y puente rectificador de diodos [14].

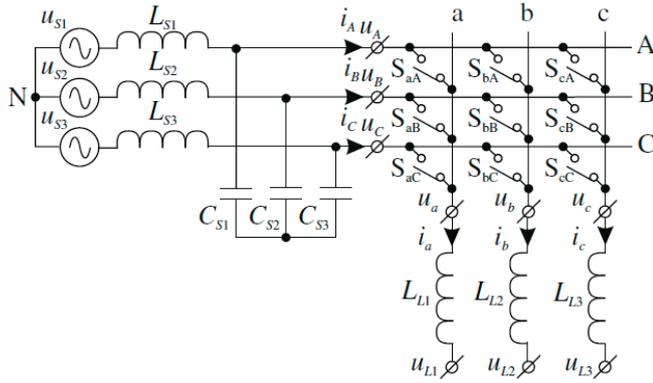


Fig. 3. Circuito simplificado del convertidor matricial trifásico [14].

En el CMD trifásico, las expresiones que describen la relación de tensiones y corrientes, entrada – salida, son las mostradas en las Ecs. (1)-(3).

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{aA} & m_{aB} & m_{aC} \\ m_{bA} & m_{bB} & m_{bC} \\ m_{cA} & m_{cB} & m_{cC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{aA} & m_{aB} & m_{aC} \\ m_{bA} & m_{bB} & m_{bC} \\ m_{cA} & m_{cB} & m_{cC} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\left. \begin{matrix} m_{hA} + m_{hB} + m_{hC} = 1 \\ 0 \leq m_{hk} \leq 1 \end{matrix} \right\} \quad h = a, b, c, \quad k = A, B, C. \quad (3)$$

donde, a cada interruptor bidireccional le corresponde un elemento  $m_{hk}$  de la matriz de ciclos de trabajo [7].

### III. SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA (WECS)

El sistema implementado en este artículo es comúnmente conocido como WECS (Wind Energy Conversion System) [1], y consta de cuatro subsistemas, Fig. 4: turbina eólica, generador síncrono de imanes permanentes, CM y red eléctrica.

A continuación, se describe cada uno de los subsistemas que constituyen el sistema WECS.

#### A. TURBINA EÓLICA

El subsistema de la turbina eólica consta del modelo aerodinámico de la turbina eólica, modelo mecánico del tren de transmisión de 2 masas y de un controlador del ángulo de inclinación (*pitch angle*). El subsistema se ilustra en la Fig. 5.

#### B. GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

El subsistema del generador síncrono de imanes permanentes consta de su modelo matemático en el marco de referencia del rotor  $dq$  referido al estator, y se describe mediante las Ecs. (4)-(6).

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_m i_q \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_m i_d - \frac{\lambda p \omega_m}{L_q} \quad (5)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (6)$$

### C. CONVERTIDOR MATRICIAL DIRECTO

El subsistema del convertidor matricial directo consta de un arreglo tipo matriz de 9 interruptores bidireccionales (3x3) [7]. Cada interruptor bidireccional está conformado por un arreglo de transistores IGBT en configuración emisor común. Para un buen funcionamiento, el CMD debe incluir un filtro tanto en las terminales de entrada como en las de salida. El filtro de entrada es necesario para minimizar los componentes armónicos en las corrientes de entrada, así como para reducir el impacto de las perturbaciones de la red de suministro, mientras que el filtro de salida se utiliza para eliminar las componentes de alta frecuencia presentes en los voltajes generados. La principal ventaja de los CMs es la ausencia del condensador en el enlace de CD, lo que permite aumentar la eficiencia, la densidad de energía y la vida útil del convertidor. Por otra parte, el convertidor matricial es controlado mediante la estrategia de modulación de Alesina y Venturini Optimizada [13], el esquema del CMD se ilustra en la Fig. 6.

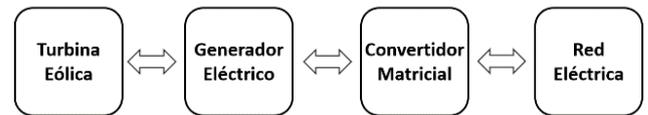


Fig. 4. Dispositivos que constituyen el sistema propuesto.

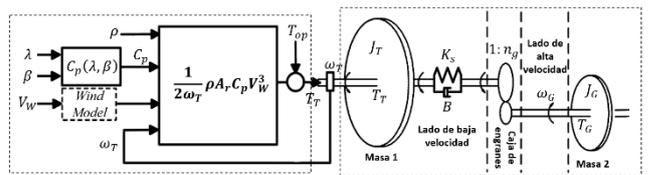


Fig. 5. Subsistema de la turbina eólica.

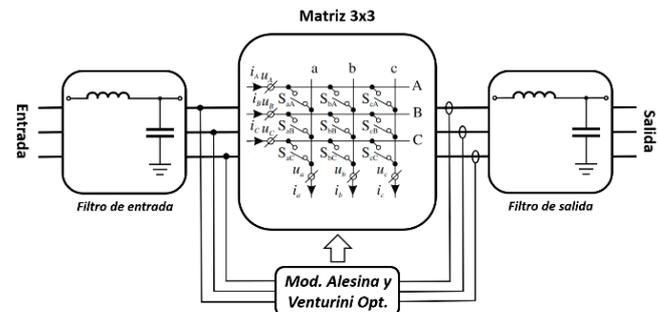


Fig. 6. Subsistema del convertidor matricial.

### 1. Estrategia de modulación Alesina - Venturini Optimizada

La primera estrategia de modulación para CMs fue propuesta por Alesina y Venturini en 1980 [11], esta asume una entrada de tensión y una corriente de carga senoidal. Algunos aspectos por considerar en esta estrategia es que utiliza un modelo escalar complicado y que la relación entre las tensiones de entrada y salida tiene un valor máximo de 0.5, lo que limita en gran medida la capacidad del convertidor. Para establecer un balance en los voltajes de salida y en las corrientes de entrada es necesario que la estrategia de modulación utilice los voltajes de entrada en la misma proporción para generar los voltajes de salida. La modulación Alesina-Venturini establece relaciones independientes para cada voltaje de salida a partir del muestreo y la distribución adecuada de secciones de los voltajes de entrada, de manera que el promedio de los voltajes de salida sea igual a la referencia establecida. Las relaciones entre los voltajes y las corrientes de entrada y salida para esta modulación son definidas mediante las Ecs. (1)-(3).

En 1989, los mismos autores propusieron la estrategia de modulación conocida como Alesina-Venturini Optimizada [13], donde a la tensión de salida de referencia de la modulación original se le agregan tensiones de modo común (incorporando el tercer armónico a las tensiones de la carga) (Ec. 7), lo que permite aumentar la relación entre las tensiones de entrada y salida a 0.866.

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |v_A| \cos(\alpha_o) + |v_a| \frac{\cos(3\beta_i)}{4} - |v_A| \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} \\ |v_B| \cos(\alpha_o + \frac{2\pi}{3}) + |v_b| \frac{\cos(3\beta_i)}{4} - |v_B| \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} \\ |v_C| \cos(\alpha_o + \frac{4\pi}{3}) + |v_c| \frac{\cos(3\beta_i)}{4} - |v_C| \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Si la expresión del voltaje anterior de referencia se considera en la función de transferencia de los voltajes de salida, después de algunas simplificaciones, los elementos de la matriz de ciclos de trabajo toman la forma mostrada en la Ec. (8), que es una solución particular considerando un factor de potencia de entrada unitario [13].

$$m_{hk} = \frac{1}{3} \left\{ 1 + 2q \cos \left[ \beta_i - \frac{2\pi(k-1)}{3} \right] \left[ \cos \left( \alpha_o - \frac{2\pi(h-1)}{3} \right) - \frac{\cos(3\alpha_o)}{6} + \frac{\cos(3\beta_i)}{2\sqrt{3}} \right] - \frac{2}{3\sqrt{3}} q \left[ \cos \left( 4\beta_i - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left( 2\beta_i + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

### D. RED ELÉCTRICA

El subsistema de red eléctrica consta de una fuente de tensión trifásica con una tensión línea-línea de 220 V a una frecuencia de 60 Hz.

## IV. RESULTADOS

Para verificar la operación de CMD como parte del sistema WECS, se llevan a cabo una serie de simulaciones numéricas en el software MATLAB/Simulink, donde se simula el sistema completo conformado por los subsistemas descritos en la sección anterior. El sistema tiene como parámetros de entrada: la velocidad de viento (puede ser ingresada como constante o como curva de viento), los parámetros de tensión de la red y carga del sistema. Por otra parte, los parámetros de relación de tensión entrada-salida, frecuencia de entrada y salida son calculados de manera automática por el subsistema del convertidor matricial; esto se logra, primeramente, midiendo la tensión y ángulo de la red eléctrica, posteriormente se estima la tensión en terminales del PMSM mediante la constante de flujo  $\lambda$  y la velocidad mecánica del rotor, y utilizando la Ec. (9) es posible obtener el valor de  $q$  aproximado para tener la misma tensión en la salida del CM. El sistema completo se despliega en la Fig. 7 y el bloque interno del CMD en la Fig. 8. Se asume un control del CMD que sostiene un factor de potencia unitario.

$$q = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{\sqrt{2} V_{red\ rms}}{\sqrt{3} \lambda P \omega_m} \quad (9)$$

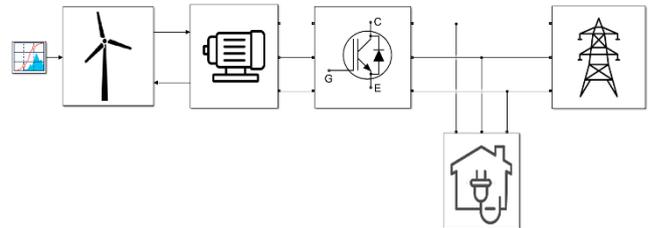


Fig. 7. Sistema completo propuesto (WECS).

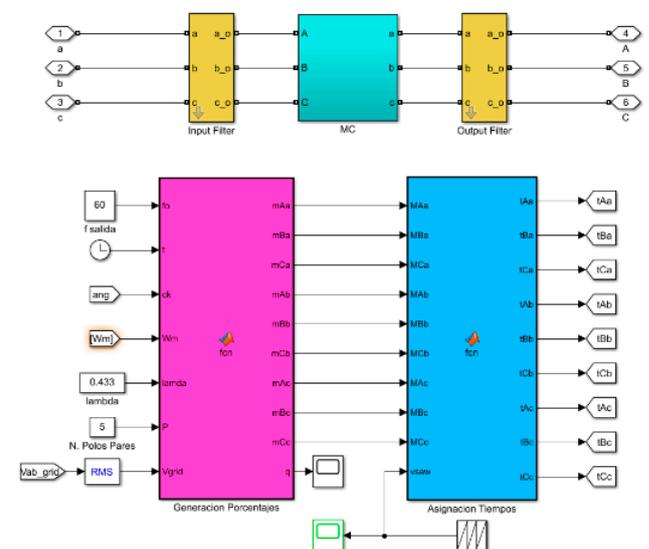


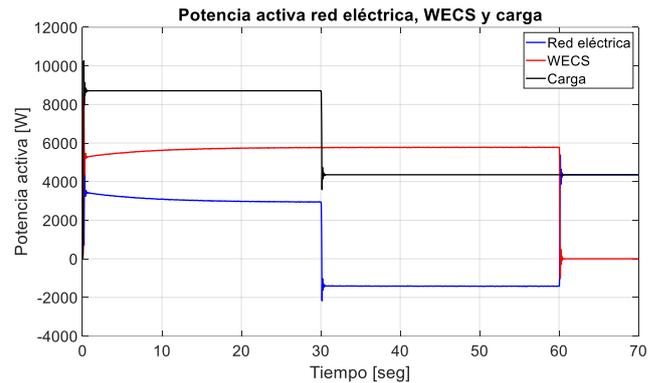
Fig. 8. Bloque interno del subsistema convertidor matricial.

Para las pruebas de simulación se busca simular diferentes condiciones que se pueden dar con el sistema propuesto, para esto se proponen una serie de escenarios. En el primero de ellos se tiene una demanda de potencia por parte de la carga, superior a la generada por el WECS. En el segundo escenario se busca una potencia de generación eólica superior a la demandada por la carga. Finalmente, para el escenario 3 se emplea una condición de nula potencia de generación eólica. La descripción de los 3 escenarios y los resultados obtenidos en potencia activa y reactiva se resumen en la **Tabla I**. Asimismo, en las **Fig. 9** y **10** se exhibe el comportamiento en tiempo de ambas potencias.

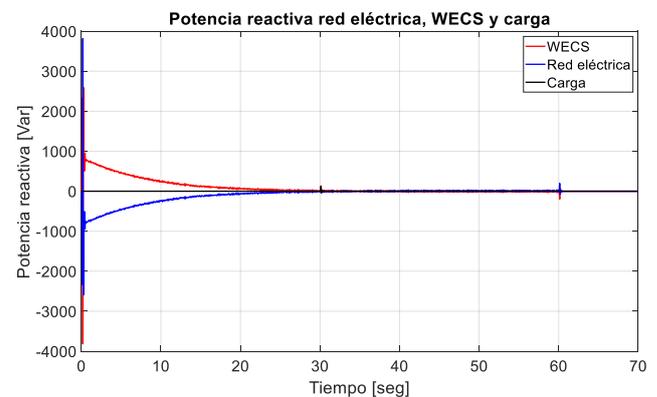
De los resultados obtenidos en los 3 escenarios (**Fig. 9** y **10**) podemos observar lo siguiente: en el primer escenario (cuando la potencia demandada por la carga es mayor a la generada por la WECS) el WECS al no poder suministrar la demanda de energía requiere energía de la red eléctrica, por lo que, en este escenario tanto la red eléctrica como el WECS aportan energía a la carga; en el segundo escenario (cuando la potencia demandada por la carga es menor a la generada por la WECS) podemos ver que el excedente de energía generada por el WECS es absorbido por la red eléctrica para ser utilizado en otros puntos de la red; por último, en el tercer escenario tenemos una nula generación, por lo que, toda la energía demandada por la carga es suministrada por la red eléctrica. Por otra parte, de los resultados mostrados en la **Tabla I** es necesario señalar que para las potencias en la carga el signo positivo denota consumo, y como se puede observar del tiempo 0 a 30 segundos el consumo es de aproximadamente 8700 W y 0 Var, mientras que, de un tiempo de 30 a 60 segundos disminuye a 4350 W y 0 Var, lo que muestra que el consumo es puramente resistivo y constante en los distintos escenarios.

**TABLA I.** DESCRIPCIÓN DE LOS 3 ESCENARIOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Velocidad del viento	~12 m/s	~12 m/s	0 m/s
Tiempo inicio	0 segundos	30 segundos	60 segundos
Tiempo final	30 segundos	60 segundos	70 segundos
Tensión entrada	~440 V	~440 V	~440 V
Tensión salida	~330 V	~330 V	~330 V
Frecuencia entrada	Variable	Variable	Variable
Frecuencia de salida	60 Hz	60 Hz	60 Hz
P - red eléctrica	2950 W	-1400 W	4350 W
Q - red eléctrica	0 Var	0 Var	0 Var
P - WECS	5750 W	5750 W	0 W
Q - WECS	0 Var	0 Var	0 Var
P - carga	8700 W	4350 W	4350 W
Q - carga	0 Var	0 Var	0 Var



**Fig. 9.** Comportamiento de la potencia activa del WECS, carga y red eléctrica.



**Fig. 10.** Comportamiento de la potencia reactiva del WECS, carga y red eléctrica.

Respecto a la red eléctrica es necesario aclarar que el signo negativo en potencias denota que la energía es absorbida, donde en el escenario 1 es positiva (2950 W) lo que denota que la potencia es suministrada por la red, mientras que, en el escenario 2 al ser negativa (-1400 W) denota que es absorbida por la red (para ser consumida en otro punto), por último, en el escenario 3 al carecer de generación del WECS, la potencia entregada por la red es la misma que la demandada por la carga. Para los resultados del WECS se utiliza la misma convención de signos que la red eléctrica, donde en los escenarios 1 y 2 se tiene una generación aproximada de 5750W y en el escenario 3 es nula. La potencia reactiva que es posible apreciar a inicio del escenario 1 (generada por la WECS y absorbida por la red eléctrica) es debido a los elementos reactivos del sistema en general.

En diferentes investigaciones se ha utilizado el generador síncrono de imanes permanentes, razón por la cual se ha empleado aquí. Entre sus bondades yace la autoexcitación, lo que permite un desempeño con un factor de potencia muy conveniente y una alta eficiencia. Una deficiencia puede ser el funcionamiento síncrono, que provoca un desempeño pobre en caso de cortocircuitos exteriores y en casos de una fuerte intermitencia en el comportamiento del viento; esto puede dar origen a inestabilidades.

Aunque el CM aún resulta poco popular en las aplicaciones industriales ya que no se puede utilizar con motores de inducción estándar porque la relación de transferencia de tensión máxima entre la entrada y la salida sólo puede ser del 86%. El potencial de este convertidor convencionalmente se ha centrado en aplicaciones en las que también se puede controlar el diseño del motor, y en las que el espacio y el peso son muy importantes, como en los accionamientos de motores integrados, aplicaciones aeroespaciales y marinas o navales. No obstante, en este artículo se propone el empleo del CM como un elemento integral en la conversión de energía eólica. Los resultados de simulación presentados indican que efectivamente el CM tiene grandes posibilidades de éxito en este contexto. Actualmente se trabaja para presentar resultados de esta investigación con un prototipo de pequeña escala.

## V. CONCLUSIONES

Las fuentes de energía renovable se han convertido en una prometedora fuente de energía alternativa, representan nuevos retos cuando se conectan a la red eléctrica. Tal es el caso de la generación eólica. Un aspecto relevante para este tipo de generación yace en el hecho que siempre fluctúa debido a las condiciones climáticas. Asimismo, la inyección de energía eólica en una red eléctrica afecta a la calidad de la energía debido a la naturaleza fluctuante del viento y a los tipos comparativamente nuevos de sus generadores. Este trabajo presenta un sistema de convertidor matricial como alternativa para el WECS cuando se emplean un generador de imanes permanente como convertidor de energía. Los resultados son muy apropiados y prometedores para continuar esta investigación con la implementación de prototipos de pequeña escala.

## REFERENCIAS

- [1] D. K. Bhutto, J. A. Ansari, S. S. H. Bukhari, F. A. Chachar, "Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review," in Proceedings of iCoMET 2019, pp. 1-6, Sukkur, Pakistan, 2019.
- [2] Gyugyi, L. and Pelly, B. R. Static power frequency changers : theory, performance, and application / L. Gyugyi, B. R. Pelly Wiley New York 1976.
- [3] K. Senthilnathan and K. I. Annappoorani, "A review on back-to-back converters in permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system," in Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 2, no. 3, pp. 583 – 591, June 2016.
- [4] B. Wang and G. Venkataramanan, "Dynamic voltage restorer utilizing a matrix converter and flywheel energy storage", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, pp. 222-231, 2009.
- [5] V. Kumar, R. Chand Bansal, R. Raj Joshi, "Experimental realization of matrix converter based induction motor drive under various abnormal voltage conditions," in Int. J. Control, Autom. Syst., vol. 6, no. 5, pp. 670-676, 2008.
- [6] O. Abdel-Rahima, H. Abu-Ruba, A. Kouzouc, "Nine-to-three phase direct matrix converter with model predictive control for wind generation system," in Energy Procedia, vol. 42, pp. 173-182, 2013.
- [7] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 2, pp. 276-288, April 2002, doi: 10.1109/41.993260.
- [8] J. M. Lozano, M. A. Hernandez-Figueroa, J. M. Ramirez, "An operative comparison of two DVR topologies based on a matrix converter without

- energy storage," in Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6054-6060, Montreal, Canada, 2012.
- [9] S. M. Ahmed, A. Iqbal, H. Abu-Rub, J. Rodriguez, C. A. Rojas and M. Saleh, "Simple Carrier-Based PWM Technique for a Three-to-Nine-Phase Direct AC-AC Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 11, pp. 5014-5023, Nov. 2011, doi: 10.1109/TIE.2011.2134062.
- [10] S. M. Ahmed, A. Iqbal and H. Abu-Rub, "Generalized Duty-Ratio-Based Pulsewidth Modulation Technique for a Three-to- Sk\$ Phase Matrix Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 3925-3937, Sept. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2098373.
- [11] M. Venturini and A. Alesina, "The generalised transformer: A new bidirectional, sinusoidal waveform frequency converter with continuously adjustable input power factor," 1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1980, pp. 242-252, doi: 10.1109/PESC.1980.7089455.
- [12] Kwon, W. H. and Gyu-Hyeong Cho. "Analyses of static and dynamic characteristics of practical step-up nine-switch matrix convertor." (1993).
- [13] A. Alesina and M. B. G. Venturini, "Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 4, no. 1, pp- 101-112, Jan 1989, doi: 10.1109/63.21879.
- [14] Paweł Szczesniak, "Review of AC-AC Frequency Converters", *Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*, edición no. 1, London, Springer-Verlag, 2012, capítulo 2, sección 2.3.2, página 24, DOI: 10.1007/978-1-4471-4896-8.

## BIOGRAFÍAS



**DIEGO A. J. GUTIÉRREZ TORRES** recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2019. Actualmente cursa el programa de Maestría en Ciencias del CINVESTAV, Guadalajara, México. Su área de interés incluye convertidores de energía.



**JOSÉ M. LOZANO GARCÍA** recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales



intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.

**JUAN M. RAMÍREZ** recibió el título de doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México, en 1992. Se incorporó al Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, Guadalajara, México, en 1999, donde es actualmente profesor de tiempo completo. Sus intereses de investigación incluyen Smart-grids, microrredes y aplicaciones de electrónica de potencia.



**LUIS R. MERCHÁN VILLALBA** recibió el título de Ingeniero Electrónico por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, en 2014, y el título de Maestro y Doctor en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2016 y 2020, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, estado estable y modelos dinámicos de dispositivos FACTS.

Recibido 01 de diciembre de 2021. Aceptado 02 de marzo de 2022. Publicado 01 de agosto de 2022.

ISSN: 2448-7775

# Diseño e implementación de una Arquitectura con orientación a servicios para sistemas tele-operados de captación de agua para generación hidráulica

JOHN ALEXANDER CAMACHO<sup>1\*</sup>, CRISTIAN DAVID CHAMORRO<sup>2</sup>, NAYIVER GLADYS CAICEDO<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

<sup>2</sup>Facultad de Artes Integradas, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

\*Autor de correspondencia: John.camacho@correounivalle.edu.co

**RESUMEN** El sistema de captación de una pequeña central hidroeléctrica cuenta con diferentes actividades tales como apertura de compuertas, limpieza de tanque desarenadores, limpieza de rejillas entre otros, estos procesos son realizados de manera secuencial y manual por el fontanero lo que afecta los tiempos requeridos para la toma de decisiones, dando lugar a disminución del caudal a turbinar o pone en riesgo la turbo maquinaria debido a que es posible que se turbine agua con sedimentos. Por estas razones surge la necesidad de realizar estas actividades por medio de sistemas electrónicos y computacionales que estén realizando un monitoreo permanente y con la posibilidad de tele-operar los actuadores. Para poder lograr este objetivo, se planteó e implementó una arquitectura con orientación a servicios utilizando Amazon Web Services (AWS), y posteriormente se analizó y comprobó el comportamiento del sistema propuesto obteniendo una mejora en los tiempos de decisión y calidad del agua, en donde se pasó de 10 minutos a 500 milisegundos en la medición de la concentración de sólidos suspendidos, y de 60 minutos a 27.427 segundos en control de la compuerta ecológica.

**PALABRAS CLAVE**— Arquitectura con Orientación a Servicios, Generación Eléctrica, Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), Redes de Petri coloreadas, Tele-Operación, Sistema de Captación de Agua.

## I. INTRODUCCIÓN

Para la generación de energía eléctrica, Colombia cuenta con recursos energéticos como: petróleo, gas natural, energía hidráulica y eólica [1]. Actualmente el medio de generación más utilizado es el hidráulico con una participación del 69.34% del total de energía producida en el año 2020, seguido de la producida por medio de carbón con un porcentaje de participación del 13.86%, con una participación de 12.73% mediante la utilización de carbón, y el 4.07% restante mediante la utilización de recursos como el queroseno, ACPM (Aceite Combustible Para Motores), biomasa, radiación solar, etc. [2].

Los sistemas de captación de agua, los cuales retienen, encauzan y controlan su flujo hacia las turbinas, se encuentran alejados de las ciudades, de la casa de máquinas y además, su funcionamiento es manual lo que conlleva a una ineficiencia en algunas de sus actividades. La falta de una respuesta rápida y adecuada de la operación de estos sistemas manuales puede ocasionar consecuencias catastróficas en

término de vidas humanas y económicas. Un sistema de captación de agua en una central hidroeléctrica debe garantizar las máximas condiciones de seguridad para las instalaciones de la central hidroeléctrica, el personal de operación, el medio ambiente y las poblaciones cercanas al sistema. Si el sistema de captación de agua se realiza de manera tele-operada es necesario contar con una arquitectura de software que contemple las características y condiciones necesarias de seguridad expuestas en [3]. Esta arquitectura planteada contempla componentes modulares, donde cada uno de ellos tienen una función completamente definida e independiente de los otros módulos del sistema, garantizando la seguridad e integridad de la central hidroeléctrica, cabe resaltar que la implementación de la arquitectura se realizó utilizando los servicios de Amazon Web Services como prestador de servicios en la nube.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA PCH

El sistema de captación de agua de la PCH de Amaime - Colombia fue dividido en siete subprocesos, los cuales fueron

agrupados de acuerdo a la funcionalidad que prestan, los cuales son: **A.** Medición de concentración de sólidos suspendidos; **B.** Limpia rejillas de captación; **C.** Operación de compuerta ecológica; **D.** Operación de compuerta radial; **E.** Operación de tanque desarenador 1; **F.** Operación de tanque desarenador 2; y **G.** Limpia rejilla de tanque de carga. En la [Fig.1](#) se muestra una toma aérea del sistema de captación de agua, y se indica la ubicación de cada uno de los siete subprocesos mencionadas anteriormente.

El proceso de captación de agua inicia cuando el agua proveniente del río es desviada por el azud e ingresa por la toma lateral, donde se realiza la medición de concentración de sólidos suspendidos (subproceso A), una vez el agua pasa por las rejillas de captación esta puede contener material orgánico o inorgánico el cual queda atrapado en las rejillas, por lo tanto, se hace necesario la limpieza (subproceso B). El subproceso C hace referencia a la operación de la compuerta ecológica ya que la PCH cuenta con una licencia ambiental, la cual debe garantizar que el caudal ecológico corresponda al 20% del caudal total de río. El subproceso D hace referencia a la operación de la compuerta radial, esta compuerta debe de permanecer cerrada cuando la central está generando y en caso de parada o emergencia se debe hacer uso de ella.

Una vez el agua conducida se divide en el caudal ecológico, el restante entra en el canal de aducción y este la conduce hacia los dos tanques desarenadores, los cuales decantan las partículas de arena en el fondo de estos tanques, por lo tanto, se debe realizar su limpieza cuando el nivel de sedimentos supere un valor establecido (subproceso E y F). Por rebose el agua es conducida hacia el tanque de carga y luego a la tubería de carga en donde se encuentra una rejilla más fina que detiene material que haya podido pasar por los subprocesos anteriores, para la limpieza de esta rejilla se tiene el subproceso G. Además, también en el tanque de carga se realiza la medición de la concentración de sólidos suspendidos que van a ingresar al tanque de carga (subproceso A).



Fig. 1. Subprocesos del sistema de captación de agua.

### III. ARQUITECTURA PROPUESTA

La Arquitectura con Orientación a Servicios (SOA) para la tele-operación de los sistemas de captación de agua debe considerar aspectos tales como: el mando a distancia de los actuadores que accionan la apertura y cierre de las compuertas, el control automático y las protecciones del sistema en caso que se presente una eventualidad de tal manera que se garantice la integridad de los elementos involucrados sin dejar a un lado el personal de la planta, las comunidades aguas abajo y el medio ambiente. Además, con la tele-operación se aumenta la eficiencia en el proceso generación, ya que se puede realizar un mayor número de acciones en el menor tiempo posible, esto quiere decir que el operador puede solicitar a los subprocesos que realicen sus actividades de manera simultánea y evaluar el estado de las variables para tomar decisiones en el momento oportuno.

Dicha arquitectura permite el monitoreo permanente de las variables involucradas en el proceso de captación de agua, además del mando a distancia de los actuadores del sistema independientemente del lugar geográfico donde se encuentre ubicado el operador; también permite contar con los datos históricos de las variables y de las operaciones que se han realizado en los sistemas de captación de agua de la PCH para la trazabilidad de los procesos. Además, se incorporan en cada subproceso las alarmas y protecciones que permitan garantizar la seguridad de la planta y su personal.

La SOA presenta ventajas para la tele-operación de los sistemas de captación de agua de una pequeña central hidroeléctrica, debido a que es modular, lo que permite que el sistema sea flexible para realizar modificaciones que respondan de manera rápida y eficiente ante situaciones semejantes. Además, al utilizar servicios web para la implementación de la arquitectura, con tareas únicas y bien definidas se tiene la característica de bajo acoplamiento y tolerancia a fallos, ya que si un servicio deja de funcionar no afecta a los demás, otra característica a resaltar de los servicios web es la utilización de lenguajes estandarizados lo que permite que sea independiente del sistema operativo y/o del lenguaje de programación utilizado, lo que se traduce en un alto grado de interoperabilidad. Todas estas características fueron el punto de partida para el diseño de la arquitectura presentada en la [Fig. 2](#).

La SOA propuesta para la tele-operación del sistema de captación de agua de la PCH de Amaime es la encargada de gerenciar los diferentes servicios involucrados en la operación de los actuadores y el sensado de las variables del sistema. La SOA planteada presenta la novedad que integra el monitoreo, mando, control, alarmas, protecciones y la tele operación de los sistemas de captación de agua de una PCH, lo que permite garantizar la confiabilidad, seguridad y eficiencia en la generación eléctrica.

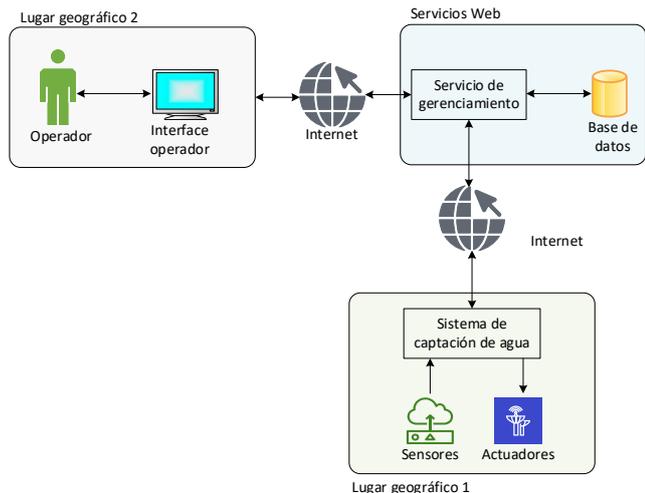


Fig. 2. SOA propuesta para el sistema de captación en una PCH.

En la Fig. 3 se presenta la arquitectura concebida, en la cual se detalla la relación de cada uno de los servicios, es decir, cómo se relacionan sus entradas y sus salidas con los elementos del sistema de captación de agua. Además, se anexan elementos necesarios para brindar seguridad y la base de datos para el almacenamiento de la información. A continuación, se realiza una breve descripción de estos elementos: los *firewalls* que controlan el acceso a la red, lo que se puede traducir en seguridad, la *base de datos* donde se va almacenar toda la información generada por la PCH, el *api gateway* que permite que las aplicaciones puedan obtener acceso a los datos y lógica del negocio desde los servicios web, y por último el *Proxy* que sirve de intermediario entre los sensores y actuadores para que estos realicen peticiones a los servicios web.

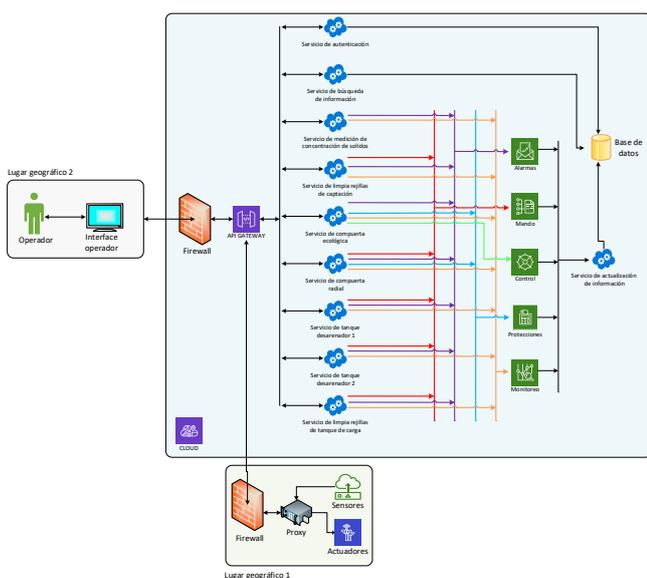


Fig. 3. Arquitectura detallada.

#### IV. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA SOA

Para el almacenamiento de la información, tanto de los usuarios como de las mediciones de los sensores, alarmas y eventualidades que se presenten en la central se requiere el uso de una base de datos, ya que el sistema maneja una gran cantidad de datos por segundo, se hace necesario una base de datos de alto rendimiento y además que sea escalable y cuente con mecanismos de respaldo de la información almacenada, en este contexto para la implementación de la base de datos del sistema se hizo uso de la base de datos no relacional Amazon DynamoDB la cual, es una base de datos de clave-valor y documentos que puede gestionar más de 10 billones de solicitudes por día y puede admitir picos de más de 20 millones de solicitudes por segundo [4].

Para el manejo de la información del sistema tele-operado de captación de agua se utilizaron cuatro tablas denominadas: usuarioHidroelectrica, WebSocketConfig, WebSocketData y WebSocketUsers, en las cuales se van a almacenar la información de los usuarios del sistema como *login* y *password*, la configuración de cada uno de los módulos, la información proveniente de los sensores, y por último los roles de los usuarios del sistema “rol operador o rol administrador”.

Para la realización de las interfaces tanto del rol “operador” como del rol “administrador” se utilizó el framework Angular y para la lógica del servidor se hizo uso de Node.js. Cabe resaltar que toda la aplicación está soportada bajo los servidores de Amazon Web Services (AWS) el cual es el mejor prestador de servicios de plataforma e infraestructura en la nube para el año 2021 [5], lo que se traduce en un alto respaldo y disponibilidad del sistema. Para el ingreso a la interface web de tele-operación del sistema de captación de agua de la PCH, el usuario debe hacer uso de un dispositivo con conexión a internet, ya sea un PC o un dispositivo móvil como un teléfono o Tablet, cabe resaltar que las interfaces están desarrolladas con diseño web adaptable (responsive), lo que permite que se ajusten a diferentes tamaños de pantalla. Una vez el usuario ingrese a la url designada, que en este caso es “<http://192.168.18.15/hidroelectrica/auth/login>”, se presenta la interface de autenticación donde el usuario ingresa el *Login* y su respectiva contraseña. En la Fig. 4 se presenta la interface de autenticación de usuario.



Fig. 4. Interface de autenticación.

Una vez el usuario ingresa su *Login* y su respectiva contraseña, como presenta en la Fig. 4, el sistema valida la información ingresada y según el rol que tenga asignado, que en este caso es el rol de administrador, se presenta la interface designada. En la interface del administrador, tiene habilitado la opción de monitorear las variables asociadas a cada uno de los siete módulos del sistema de captación de agua, la teleoperación de los actuadores, la consulta del historial de las variables, alarmas y eventualidades que se lleguen a presentar, además la opción de configuración de los límites de operación de las variables, activación de las alarmas y del módulo.

En la Fig. 5. se presenta la interface del rol de administrador donde se enmarcan las secciones que la conforman.

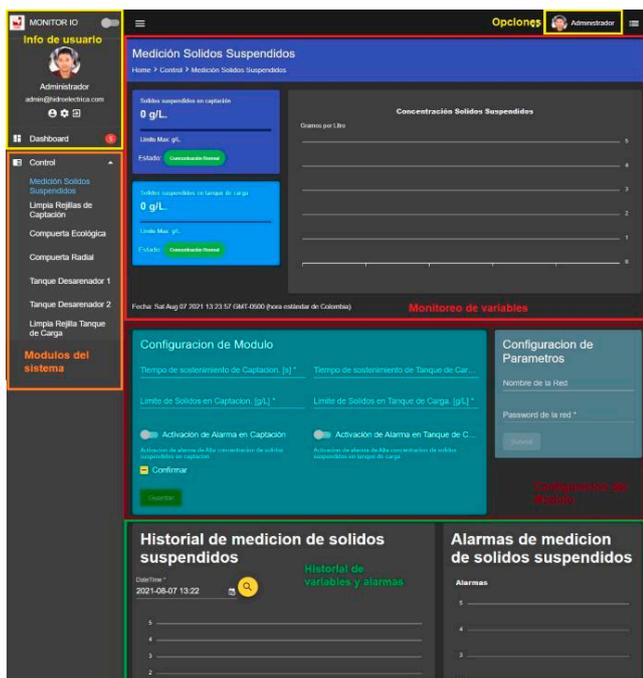


Fig. 5. Interface de administrador.

Como se observa en la Fig. 5. la interface del administrador cuenta con seis secciones las cuales se detallan a continuación: la primera sección denominada “Información de usuario” corresponde al perfil del usuario que se encuentra autenticado ante el sistema, en esta sección se presenta el rol del usuario, el correo con el cual se ha autenticado y la foto de perfil del usuario. En la segunda sección denominada “Opciones del usuario” se encuentran las opciones para modificar información del perfil, tal como la foto de perfil, contraseña y además la opción para finalizar la sesión del usuario. En la tercera sección denominada “Módulos del sistema” se encuentran los siete módulos del sistema de captación de agua de la PCH, en el cual se puede seleccionar el módulo al cual se desea monitorear y tele-operar. En la cuarta sección denominada “Monitoreo de Variables” se presenta el comportamiento de las variables y el estado actual de los actuadores del módulo seleccionado para el monitoreo y tele-operación. En la quinta sección denominada “Historial de variables y alarmas” se presenta la opción de búsqueda por fecha y hora, el histórico del comportamiento de las variables y alarmas que llegue a presentar el módulo. Por último y sexta sección denominada “Configuración del módulo” en la cual, el usuario tiene la posibilidad de configurar los parámetros de operación del módulo seleccionado.

Para efectos prácticos solo se realizó la validación de uno de los siete módulos del sistema de captación de agua, específicamente con el módulo 7 denominado “Módulo de limpia rejillas de tanque de carga”. Una vez el usuario está autenticado, en la sección de monitoreo de la interface se puede observar el estado de la rejilla del sistema de limpia rejilla del tanque de carga, la opción de limpiar la rejilla del tanque de carga, el nivel del agua en el tanque de carga, el nivel de agua en la tubería de carga y además la diferencia de niveles entre el tanque de carga y la tubería de carga. Cabe resaltar que la limpieza de la rejilla se realiza en 5 pasos, los cuales se pueden observar en la interface del usuario. En la Fig. 6 se presenta la sección de monitoreo del módulo de limpia rejilla del tanque de carga.

Para realizar la operación de limpieza de la rejilla del tanque de carga, el operador debe dar inicio al proceso utilizando el botón “iniciar” en la sección de “monitoreo y mando del proceso de limpieza”, una vez se da inicio al proceso se visualiza el paso que se encuentra ejecutado y el estado del proceso, como se puede observar en la Fig. 7.



Fig. 6. Monitoreo del módulo de limpia rejilla del tanque de carga.



Fig. 7. Inicio del proceso de limpieza de la rejilla del tanque de carga.

Como se observa en la Fig. 7, el estado del proceso de limpieza cambia de estar “detenido” a estar “en proceso” y el paso que se está ejecutando es el número uno, el cual hace referencia a abrir rastrillo. Cabe resaltar que la información de los niveles del tanque de carga y tubería de carga son medidos por los sensores de nivel dispuestos en la tarjeta electrónica del módulo 7. Toda la información de las variables medidas es almacenada en la base de datos del sistema como se puede observar en la Fig. 8.

El proceso de limpieza se realiza en 5 pasos, donde el último paso hace referencia a la activación de la banda transportadora, la cual es la encargada de devolver el material orgánico al cauce del río. En la Fig. 9 se puede observar la ejecución del paso 5 del proceso de limpieza.

ID	sortKey	Alarm_A...	Diferenci...	Error_LL...	Mon_U...	Niv_Tan...	Niv_Tub...	Pasos
esp781007	1631651132748	0	0	0	0	12	12	0
esp781007	1631651132257	0	0	0	0	12	12	0
esp781007	1631651131755	0	0	0	0	12	12	0

Fig. 8. Información almacenada en la base de datos del módulo de limpia rejilla del tanque de carga.

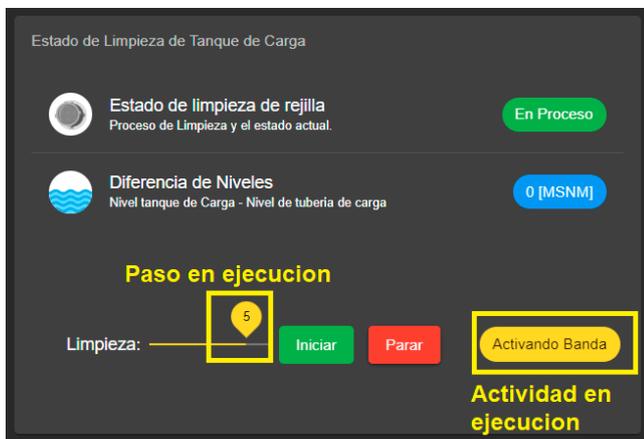


Fig.9. Información almacenada en la base de datos del módulo de limpia rejilla del tanque de carga.

Una vez terminado el paso cinco se da por finalizado el proceso de limpieza de la rejilla del tanque de carga. Para acceder al historial almacenado en la base de datos, solo se debe ingresar la fecha y hora a la cual se desea recuperar la información. En la Fig. 10 se presenta el historial del nivel del tanque de carga, el nivel de la tubería de carga, la alarma del módulo 7 y los pasos realizados por la rejilla en una fecha determinada.

En la Fig. 10 se puede observar las gráficas denominadas “historial de nivel”, en donde se presenta el comportamiento tanto del nivel del tanque de carga como el nivel de la tubería de carga. En la gráfica denominada “histórico de alarmas de alto nivel de sedimentos” muestra el disparo de la alarma de alta concentración de sedimentos en la rejilla de la tubería de carga, cabe resaltar que esta gráfica toma dos posibles valores, donde el valor de 0 hace referencia a que no se ha presentado alarma, y el valor de 1 hace referencia a un disparo de la alarma. Por último, la gráfica denominada “histórico de pasos de limpieza” en la cual se muestra el paso ejecutado en el proceso de limpieza en una determinada fecha y hora, cabe resaltar que cuando se visualiza el paso 0 hace referencia a que no se está ejecutando ningún proceso de limpieza de la rejilla del tanque de carga y se corrobora que el proceso de limpieza es realizado en un total de cinco pasos.

La interface del administrador tiene la posibilidad de modificar los parámetros de operación del módulo de limpia de rejilla del tanque de carga, en este caso se puede habilitar o deshabilitar la alarma de diferencia de nivel del tanque de carga y tubería de carga. El segundo parámetro hace referencia al límite máximo de diferencia entre el nivel del tanque de carga y la tubería de carga. El tercer parámetro es el tiempo en segundos el cual se debe sostener la diferencia de los niveles y, por último, habilitar o deshabilitar el módulo, es decir permitir o no la tele-operación del limpia rejilla del tanque de carga. En la Fig. 11 se presenta la configuración del módulo con una diferencia máxima de niveles de 2 MSNM, tiempo de sostenimiento de diferencia de niveles de 10s, la alarma habilitada y el módulo habilitado.



Fig. 10. Historial de limpieza de la rejilla del tanque de carga.

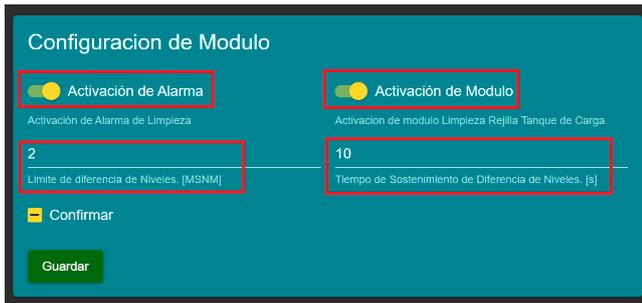


Fig. 11. Configuración del módulo de limpia rejilla del tanque de carga.

La configuración del módulo queda almacenada en la base de datos del sistema como se puede observar en la Fig. 12.

El módulo de limpia rejilla del tanque de carga genera una única alarma, la cual se dispara cuando la diferencia entre el nivel del tanque de carga y la tubería de carga es igual o superior al valor límite de diferencia de niveles configurado en el módulo y además cumpla con la condición del tiempo de sostenimiento configurado. Cabe resaltar que cuando se genera la alarma aparece en rojo el mensaje “Alta sedimentación” como se observa en la Fig. 13. Esta alarma tiene como objetivo indicar al operador que la rejilla del tanque de carga se encuentra con sedimentos, por lo tanto, el operador a su criterio define si realizar o no el proceso de limpieza de la rejilla.

Por otro lado, durante el proceso de limpieza de la rejilla del tanque de carga se puede presentar la eventualidad de un atascamiento mecánico, por lo tanto, el sistema detiene automáticamente el proceso de limpieza con aras de garantizar la seguridad de la central y del personal. En la Fig. 14 se presenta el caso que durante el proceso de limpieza específicamente en el paso 2 se presenta un atascamiento mecánico.

Para reanudar el proceso de limpieza, una vez se haya presentado un atascamiento mecánico del limpia rejilla, es necesario una intervención mecánica la cual haga corrección del atascamiento presentado, ya que el sistema no permite reanudar el proceso en la interface hasta que no se haya solucionado la eventualidad.

Una vez se han implementado y probado los siete módulos del sistema tele-operado del sistema de captación de agua. Se realiza las pruebas de latencia que tiene la base de datos al momento de realizar una consulta, retornar la información de la consulta y actualización de la información. En la Fig. 15 se presentan las métricas de latencia que tiene la base de datos DynamoDB implementada en AWS.

ID	sortKey	Acti_Ala...	Acti_Mo...	Limt_Dif...	Tiemp_Sost_Difer_Niveles
esp7#1007	163165458...	1	1	2	10

Fig.12. Configuración del módulo 7 almacenada en la base de datos.

ID	sortKey	Alarm_A...	Diferenci...	Error_Li...	Mon_Li...	Niv_Tan...	Niv_Tab...	Passo
esp7#1007	1631650817079	1	4	0	0	12	8	0

Fig.13. Alarma del módulo de limpia rejilla del tanque de carga almacenada en la base de datos.

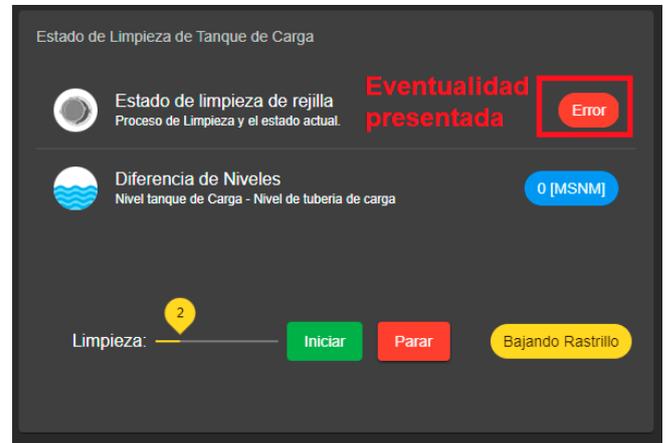


Fig.14. Eventualidad durante la limpieza de la rejilla del tanque de carga.



Fig. 15. Latencia de la base de datos.

Como se puede observar en la Fig.15, la gráfica de color verde hace referencia a la latencia que tiene la base de datos al momento de atender una solicitud de consulta que aproximadamente es de 6ms, por otro lado la gráfica de color naranja hace referencia al tiempo que tarda la base de datos en retornar una respuesta al momento de realizar una consulta la cual es de aproximadamente 315ms, y por último la gráfica de color azul hace referencia al tiempo que tarda la base de datos en almacenar los datos proveniente de los siete módulos del sistema de captación de agua que es de 318ms.

## V. RESULTADOS

A continuación, en la Tabla I se presenta una comparativa entre el sistema actual de la pequeña central hidroeléctrica y el sistema propuesto en el desarrollo de esta investigación. Al implementar el sistema propuesto se obtiene una mejora en los tiempos de respuesta del sistema ya que la medición de los sólidos suspendidos es 20 veces más rápida que la medición actual, por otro lado el control de la compuerta ecológica es 131 veces más rápido que el sistema actual trayendo consigo un aumento en la generación eléctrica ya que solo se devuelve al río el caudal necesario estipulado por la entidad reguladora del medio ambiente, a diferencia del sistema actual que en ocasiones se estaba devolviendo al río un porcentaje mayor al estipulado.

**TABLA I. COMPARACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL Y EL SISTEMA PROPUESTO.**

Proceso	Sistema actual	Sistema propuesto
Medición de concentración de sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medición manual realizada por el fontanero en sitio cada 10 minutos.</li> <li>- El fontanero debe indicar por radio si se presenta una alta concentración de sólidos suspendidos.</li> <li>- El fontanero al realizar esta actividad no puede atender otra solicitud de otro proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medición automatizada cada 500 ms.</li> <li>- Monitoreo desde la interface grafica del sistema.</li> <li>- Indicador de alta concentración de sólidos suspendidos.</li> <li>- Trazabilidad de la medición debido a que se cuenta con datos históricos.</li> </ul>
Limpia rejillas de captación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación manual realizada por el fontanero en sitio.</li> <li>- El fontanero al realizar esta actividad no puede atender otra solicitud de otro proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo y teleoperación del limpia rejillas desde la interface grafica del sistema.</li> <li>- Trazabilidad de las actividades de limpieza debido a que se cuenta con datos históricos y alarmas.</li> </ul>
Operación de compuerta ecológica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación manual realizada por el fontanero en sitio, se evalúa cada 60 minutos el caudal ecológico y se realiza el ajuste correspondiente a la compuerta.</li> <li>- El fontanero al realizar esta actividad no puede atender otra solicitud de otro proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación automatizada, se evalúa cada 0,4571 minutos el caudal ecológico y se realiza el ajuste de la compuerta ecológica.</li> <li>- Monitoreo desde la interface grafica del sistema.</li> <li>- Trazabilidad de la medición del caudal ecológico debido a que se cuenta con datos históricos y alarmas.</li> </ul>
Operación de compuerta radial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación manual realizada por el fontanero en sitio.</li> <li>- El fontanero al realizar esta actividad no puede atender otra solicitud de otro proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo y teleoperación de la compuerta radial desde la interface grafica del sistema.</li> <li>- Monitoreo de las variables asociadas al sistema hidráulico de apertura y cierre de la compuerta radial.</li> <li>- Trazabilidad de la operación de apertura y cierre de la compuerta radial debido a que se cuenta con datos históricos y alarmas.</li> </ul>
Limpieza de tanque desarenador 1 y 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación manual realizada por el fontanero en sitio.</li> <li>- La limpieza depende de la experticia del fontanero.</li> <li>- El fontanero debe estar monitoreando el nivel de sedimento manualmente para determinar si se requiere limpieza del tanque.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo y teleoperación del tanque desarenador desde la interface grafica del sistema.</li> <li>- El sistema genera una alarma cuando el tanque nivel de sedimento del tanque desarenador ha llegado al límite máximo permitido.</li> <li>- Trazabilidad de las actividades de limpieza y monitoreo de niveles de sedimentación, debido a que se cuenta con datos históricos y alarmas.</li> </ul>

**TABLA I. COMPARACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL Y EL SISTEMA PROPUESTO (CONTINUACIÓN).**

Proceso	Sistema actual	Sistema propuesto
Limpia rejilla del tanque de carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación manual realizada por el fontanero en sitio.</li> <li>- El fontanero al realizar esta actividad no puede atender otra solicitud de otro proceso.</li> <li>- La decisión de limpieza es realizada de manera visual por el fontanero.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo y teleoperación del limpia rejillas del tanque de carga desde la interface grafica del sistema.</li> <li>- El sistema genera una alarma cuando la rejilla se encuentra con sedimentos mediante la lectura de los sensores de nivel.</li> <li>- Trazabilidad de las actividades de limpieza y monitoreo de niveles de sedimentación, debido a que se cuenta con datos históricos y alarmas.</li> </ul>

En la [Tabla II](#) se presenta los costos aproximados de implementación de la arquitectura propuesta, cabe resaltar que estos costos no tienen en cuenta el valor de los sensores y actuadores requeridos en el sistema ni su instalación.

**TABLA III. COSTOS APROXIMADOS DE IMPLEMENTACIÓN.**

Ítem	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Servidor AWS por mes	12	500	6000
Tarjetas electrónicas para los 7 módulos	7	500	2800
Programación de Tarjetas electrónicas y puesta a punto del sistema	7	700	4900
Configuración de la arquitectura del sistema	7	750	5250
<b>Total</b>			<b>18950</b>

## VI. CONCLUSIONES

La estrategia del uso de una base de datos no relacional permite que el alto flujo de almacenamiento de información se realice de una manera rápida, ya que la información se guarda en aproximadamente 318 ms y el retorno de una consulta es de aproximadamente 315ms, esto permite que el sistema tenga una alta respuesta y la información se esté presentado en la interface del usuario con el fin de tomar decisiones en el momento oportuno.

El seguimiento del sistema en cuanto a las actualizaciones de información y registro de eventos en la base de datos y trazabilidad de los datos de cada uno de los siete módulos corresponde de manera correcta al flujo de información y lo planteado en la arquitectura, ya sea en un caso normal de operación o ante alguna eventualidad que se presente en alguno de los siete módulos desarrollados.

La arquitectura implementada al ser una arquitectura modular mediante servicios web donde cada uno de ellos es independiente del otro, si en algún momento se requiere implementar más módulos esto no implica realizar una nueva arquitectura solo adicionar los nuevos módulos a la arquitectura planteada, permitiendo de esta manera un alto grado de escalabilidad. Por otro lado, al usar como prestador de servicio en la nube la infraestructura de AWS el sistema de captación de agua tele operado tiene una disponibilidad de 99.99% esto quiere decir que no deberá superar más de 52.56 minutos fuera de línea en 365 días, lo que me permite una alta disponibilidad y confiabilidad de la arquitectura propuesta.

Con la implementación del sistema se obtiene una mejora en los tiempos de decisión y en la calidad del agua a turbinar, debido a que de manera manual se mide la concentración de sólidos suspendidos cada 10 minutos, con la implementación de la arquitectura se obtiene una medición de la concentración de sólidos suspendidos cada 500 ms, es decir, 20 veces más rápido que con la medición manual. Por otro lado, el control para la compuerta ecológica presenta una mejora considerable en su operación ya que la corrección de la posición de la compuerta se realiza cada 60 minutos actualmente, esto quiere decir que, si se presenta una variación del caudal del río, el sistema manual lo corrige cada hora. Por lo tanto, el sistema propuesto responde solo en 27.427 segundos, es decir, aproximadamente 131 veces más rápido que el actual.

## REFERENCIAS

- [1] UPME, "Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050," Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia, p. 184, 2015, [Online]. Available: [http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf).
- [2] "SIEL - Sistema de Información Eléctrico Colombiano," 2020. [Online]. Available: [http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneraci%u00f3n%2fGeneraci%u00f3n+\(Gerencial\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneraci%u00f3n%2fGeneraci%u00f3n+(Gerencial)). [Accessed: 12-OCT-2021].
- [3] J. A. Camacho and C. D. Chamorro, "Arquitectura con orientación a servicios para sistemas tele-operados de captación de agua para generación hidráulica." *Rev. identidad energética*, vol. 3, no. 2448–7775, pp. 19–25, 2020.
- [4] "AWS | Servicio de base de datos gestionada NoSQL (DynamoDB)." [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/dynamodb/>. [Accessed: 12-OCT-2021].
- [5] "Gartner reconoce a AWS como líder en el cuadrante mágico de servicios de plataforma e infraestructura en la nube." [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/resources/analyst-reports/gartner-mq-cips-2021/>. [Accessed: 12-OCT-2021].

## BIOGRAFÍAS



0003-3623-9913.

**JOHN ALEXANDER CAMACHO** Estudiante de doctorado con énfasis en ingeniería eléctrica y electrónica de la universidad del valle. Msc en ingeniería con énfasis en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad del Valle 2017, Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle 2014, Tecnólogo Electrónico de la Universidad del Valle 2009. Miembro del Grupo de Investigación DI&ID, Categoría C Colciencias. ORCID iD 0000-



4555.

**CRISTIAN DAVID CHAMORRO** Doctor en Ingeniería con énfasis en Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle (2017). Magister en Filosofía de la Universidad del Valle (2011). Ingeniero Mecánico de la Universidad Autónoma de Occidente (2001). Profesor Titular del Departamento de Diseño de la Universidad del Valle. Miembro del grupo de investigación DI&ID, Categoría C Colciencias. ORCID: 0000-0002-1792-



**NAYIVER GLADYS CAICEDO** Doctora en Ingeniería de la Universidad del Valle (2004). Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle (1991). Ingeniera Electricista de la Universidad del Valle (1986). Miembro del Grupo de Investigación GRALTA, reconocido por Colciencias y parte de la Universidad del Valle. ORCID: 0000-0002-8679-7465

Recibido 03 de diciembre de 2021. Aceptado 15 de marzo de 2022. Publicado 01 de agosto de 2022.

ISSN: 2448-7775

# Diseño de prueba sintética de cortocircuito para interruptores de media tensión

JUAN CAMILO BELTRÁN SOLANO<sup>1\*</sup>, JUAN CAMILO HERNÁNDEZ MUÑOZ<sup>1</sup>, GUILLERMO APONTE MAYOR<sup>1</sup>, CESAR TULIO DELGADO<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad del Valle, Colombia.

<sup>2</sup>Universidad del Valle, SENA, Colombia.

\*Autor de correspondencia: [juan.camilo.beltran@correounivalle.edu.co](mailto:juan.camilo.beltran@correounivalle.edu.co)

**RESUMEN** Los interruptores automáticos son dispositivos fundamentales dentro del sistema eléctrico de potencia, por lo que deben ser sometidos a diferentes pruebas para verificar su comportamiento y capacidad interruptiva ante condiciones normales de trabajo y de falla. La prueba que permite evaluar la capacidad interruptiva del interruptor de manera directa ante un cortocircuito resulta poco factible debido a su alto costo de implementación o la gran afectación sobre la red eléctrica. En este trabajo, se presenta el diseño de una prueba sintética de cortocircuito para interruptores como alternativa al método directo, que es capaz de replicar las condiciones de falla a las que está expuesto el interruptor durante la prueba. También se presenta el modo como se realizó el diseño de los circuitos de tensión y de corriente de manera independiente, para que de forma sincronizada proporcionen las condiciones de falla para interruptores de 17 kV que establece el estándar IEC 62271-100/101, también se muestra como se hace la sincronización mediante simulación por software y en los anexos se presentan las especificaciones de los componentes de los circuitos, con los cuales se espera continuar en una siguiente fase la implementación de la prueba. Se evidenció que para la prolongación del tiempo de arco es necesario la implementación de un circuito externo de reencendido, cuyas características permitan superar el cruce por cero de la corriente de cortocircuito.

**PALABRAS CLAVE**— Prueba sintética de cortocircuito, tensión de recuperación transitoria, corriente asimétrica, sincronización, tiempo de arco.

## I. INTRODUCCIÓN

En un sistema de potencia se debe garantizar la confiabilidad, seguridad y continuidad del servicio eléctrico. Uno de los dispositivos fundamentales que posibilita el cumplimiento de estas características es el interruptor. Dicho equipo, debe ser sometido a diferentes pruebas normalizadas que permiten evaluar su desempeño, siendo una de ellas la verificación de su capacidad interruptiva mediante el ensayo bajo condiciones de cortocircuito a tensión nominal.

La prueba de cortocircuito en interruptores de potencia puede ser realizada en laboratorios que cuenten con sistemas de prueba a través de métodos directos: como lo son los laboratorios tipo red, cuya fuente de suministro para la prueba es la misma red y los laboratorios tipo generador que cuentan con un sistema de generación independiente. Actualmente en Colombia no existen laboratorios que realicen la prueba de cortocircuito; la dificultad para contar con los laboratorios tipo red radica en que demandan altos valores de corriente que producen caídas de tensión en la red, desestabilizándola y comprometiendo el servicio de los usuarios. Por su parte, los laboratorios tipo generador requieren elevados costos de implementación debido a la

exigencia de equipos robustos que trabajan con grandes niveles de potencia.

Teniendo en cuenta la forma en que se da el proceso de interrupción de corriente [1] [2], una alternativa para suplir este tipo de prueba utilizando métodos indirectos corresponde a la prueba sintética de cortocircuito, que está conformada por una fuente de corriente y una fuente de tensión independientes, pero que sincronizadas permiten generar las condiciones requeridas por el interruptor [3][4].

La ventaja del sistema de prueba de cortocircuito de manera sintética es su capacidad de generar las condiciones reales a las cuales va a estar expuesto el interruptor sin comprometer el funcionamiento de la red eléctrica y, además, representa un ahorro económico respecto a los métodos directos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso realizar mediante un proyecto de pregrado en ingeniería, el diseño de una prueba sintética de cortocircuito para interruptores de media tensión, donde el problema radicaba en el desconocimiento sobre la conformación de las fuentes de corriente y tensión, así como el método utilizado para sincronizar las señales durante la prueba.

## II. MÉTODO DE PRUEBA SINTÉTICA

Para el diseño se analizaron diversos tipos de fuente y se decidió implementar el método de inyección de corriente en paralelo del estándar IEC 62271-100 [5], debido a la no dependencia del circuito de corriente con respecto al circuito de tensión y viceversa, además de su equivalencia con el circuito directo correspondiente. Teniendo en cuenta las condiciones locales, es decir, la disponibilidad de un banco de condensadores de diversas capacidades, y la posibilidad de acceder a fuentes de AC con niveles diferentes de tensión en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, se realizó el diseño de la prueba sintética utilizando el circuito Weil Dobke [6], que es una configuración de circuito sugerida por la norma IEC 62271-101 [7].

### A. CIRCUITO DE TENSIÓN Y CORRIENTE

Como el objeto bajo estudio, o para el cual se pretende realizar la prueba, es el interruptor de media tensión, el circuito que proporciona la tensión de prueba (TRV) es caracterizado mediante 2 parámetros, siendo estos la base para la realización del diseño [8][9]. En cuanto al circuito que inyecta la corriente de prueba (Fig. 1), considerando que esta se realiza para una falla en terminales y al 100% de la corriente nominal de cortocircuito, el circuito de corriente debe generar una corriente asimétrica cumpliendo con los valores normalizados en el estándar IEC 62271-100 [5].

### B. CONDICIONES Y RECOMENDACIONES

Para que la prueba sea válida se requiere cumplir con las siguientes restricciones y recomendaciones que se estipulan en la norma IEC 62271-100/101 [5][7][10]:

- Realizar 3 operaciones durante la prueba con tiempo de arco máximo, medio y mínimo.
- En el momento en que se da la orden de apertura de los contactos se debe tener un porcentaje de DC de la corriente por encima o igual al establecido en la norma [11].
- El circuito de tensión (TRV) se debe conectar en el momento en que se tenga una variación considerable en la tensión de los contactos del interruptor de prueba [12].
- La frecuencia de la corriente inyectada por el circuito de tensión debe tener una frecuencia entre 250 Hz y 1000 Hz [12].
- El tiempo de duración en el que solamente queda circulando la corriente inyectada por parte del circuito de tensión a través del interruptor de prueba debe ser menor o igual a un cuarto del periodo de dicha corriente [3][13].

## III. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En el diagrama de la Fig. 2. se muestra el proceso seguido en el diseño de las fuentes. El diseño del circuito de prueba se realizó para interruptores con una tensión de 13.2 kV y 34.5 kV, sin embargo, para el presente artículo se mostrará el diseño para interruptores con una tensión nominal de 13.2 kV.

### A. DISEÑO DEL CIRCUITO DE TENSIÓN

La determinación de los valores de los componentes del circuito de tensión parte de la caracterización del tipo de onda requerida mediante los parámetros que establece la normativa y la adecuación del circuito que permite generar dicha onda; una vez obtenida la onda, se hace un análisis en el dominio de la frecuencia compleja y se formulan unas ecuaciones matemáticas que permiten relacionar los componentes con las características temporales de la onda. Se resuelven estas ecuaciones y se obtienen los valores requeridos. Finalmente, se verifica el cumplimiento de cada una de las condiciones que establece la norma.

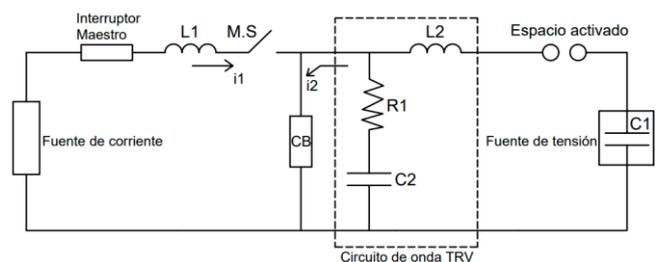


Fig. 1. Circuito de inyección de corriente en paralelo.

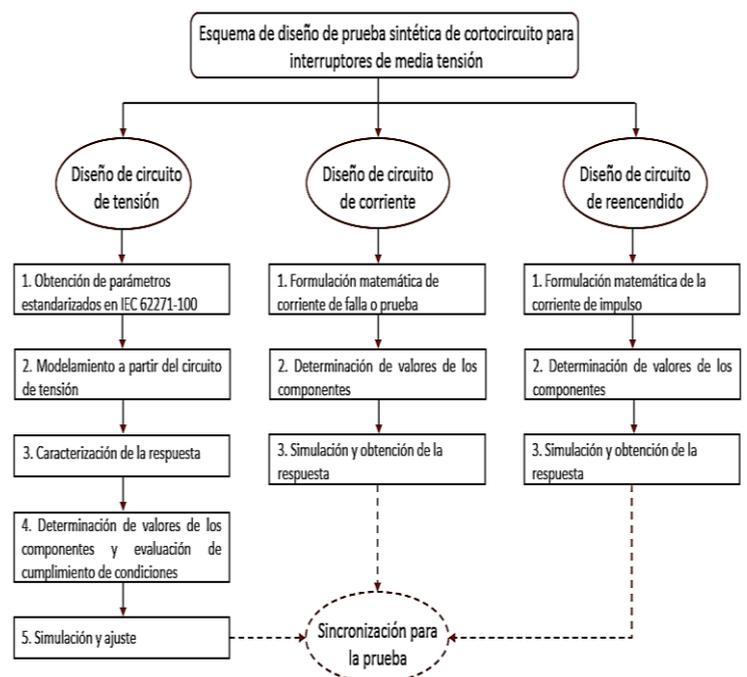


Fig. 2. Esquema básico de diseño de prueba sintética de cortocircuito para interruptores de media tensión.

El circuito que permite generar la onda de tensión transitoria requerida (sistema de segundo orden con un cero) [14] y que se puede representar mediante dos parámetros [15] para la prueba de cortocircuito de un interruptor de 13.2 kV, se muestra en la Fig. 3.

Los valores de los componentes determinados mediante cálculos se muestran en la Tabla I.

### B. DISEÑO DEL CIRCUITO DE CORRIENTE

El circuito de corriente se diseñó para generar una corriente de cortocircuito asimétrica [16] para un interruptor de vacío de 17 kV mostrado en la Fig. 4b y cuyas características generales son mostradas en el Anexo A [17][18]. El modelo del circuito de corriente se muestra en la Fig. 4a.

Como se planteó en la metodología de diseño, la obtención de los valores de los componentes del circuito de corriente parte de un circuito RL y del análisis o formulación matemática de la corriente de falla. Una vez se tiene la expresión en el tiempo de la corriente de cortocircuito, se plantean dos ecuaciones a partir de la magnitud de la ICC y la constante de tiempo del interruptor que se desea probar, cuya solución arroja las magnitudes requeridas de cada componente del circuito de inyección de corriente.

Los componentes determinados mediante cálculos se muestran en la Tabla II.

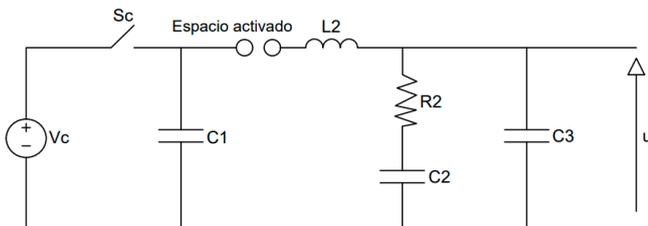


Fig. 3. Modelo del circuito TRV de 2 parámetros [6].

Tabla I. VALORES DE LOS COMPONENTES DEL DISEÑO OBTENIDO MEDIANTE CÁLCULOS.

Componentes	Cálculos
Banco de capacitores [ $\mu\text{F}$ ] $C_1$	34
Banco de inductores [mH] $L_2$	8.17
Banco de capacitores [ $\mu\text{F}$ ] $C_2$	0.07012
Banco de resistores [ $\Omega$ ] $R_2$	104
Banco de capacitores [nF] $C_3$	-

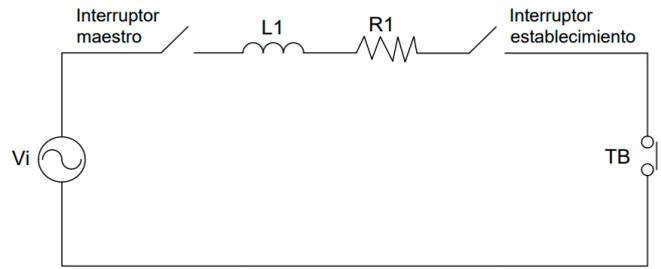


Fig. 4a. Modelo del circuito de corriente.



Fig. 4b. Interruptor de vacío de 17 kV [18].

Tabla II. VALORES DE LOS COMPONENTES DEL DISEÑO OBTENIDO MEDIANTE CÁLCULOS.

Componentes	Valor
Banco de resistencias (R1)	0.00073232 $\Omega$
Banco de inductores (L1)	32.95 $\mu\text{H}$

### C. DISEÑO DEL CIRCUITO DE REENCENDIDO

El circuito de reencendido es el que permite prolongar la duración del arco en bornes del interruptor cuando se requiere verificar la respuesta del interruptor con tiempo de arco medio y máximo, en donde aparecen cruces por cero intermedios en la onda de corriente [8][19][20]. En la Fig. 5 se muestra el modelo implementado que permite generar la onda de corriente de impulso para garantizar dicha prolongación.

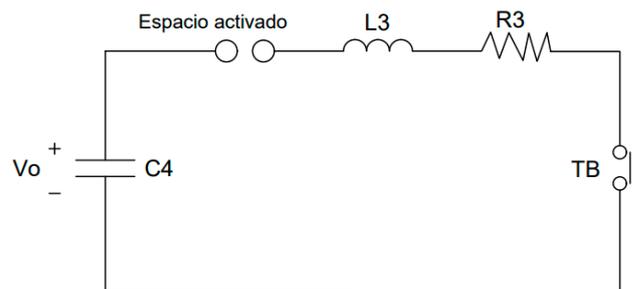


Fig. 5. Modelo del circuito de reencendido.

La obtención de los valores de los componentes del circuito de reencendido parte de la formulación matemática de un circuito RLC serie. Mediante las características de la onda de impulso generada e implementando la técnica desarrollada por F. Roman [20], en donde se relaciona la tensión de precarga, el valor pico de impulso, el tiempo de frente y el tiempo de cola en valores unitarios, con los valores de los componentes del circuito se obtuvo los valores requeridos.

La onda de impulso que genera tiene las siguientes características: tensión de precarga de 36.4 kV, valor pico del impulso de 5 kA, tiempo de frente ( $T_s$ ) de 50  $\mu$ s y tiempo de cola ( $T_r$ ) de 160  $\mu$ s. Los valores de los componentes determinados mediante cálculos se muestran en la [Tabla III](#).

#### D. SIMULACIÓN

El interruptor de prueba se simuló mediante el módulo de interruptor monofásico con arco que tiene la librería de Simulink/MATLAB, dicho módulo está programado a partir de los parámetros de arco determinados por la teoría de Mayr. Estos parámetros dependen en gran medida de la velocidad de apertura del interruptor de prueba y de su medio de extinción del arco.

Los parámetros de Mayr estimados para interruptores de vacío de media tensión [9] fueron: Potencia:  $P_o = 25$  kW, Ángulo:  $\Theta = 0.273$   $\mu$ s [21].

Al correr la simulación del circuito implementado en Simulink/MATLAB, se obtiene la respuesta por parte del circuito de prueba y del interruptor bajo prueba para una operación con tiempo de arco máximo, mostrada en la [Fig. 6a](#) [9].

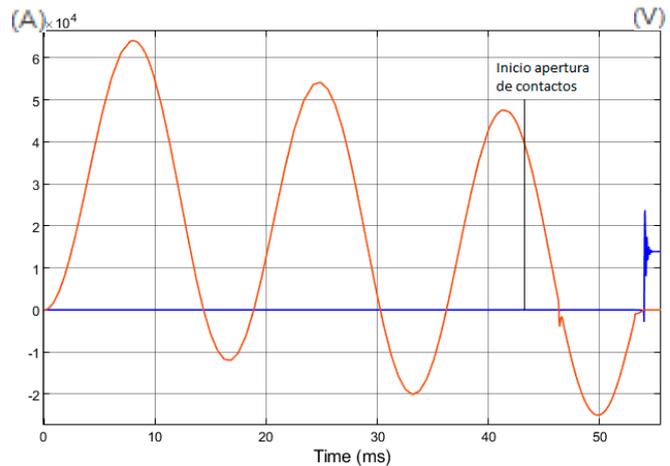
Las características que tiene el circuito de prueba para cumplir con la validez de la prueba son:

- Tiempo de arco máximo: 12.11 ms.
- Inicio apertura de contactos: 41.9373 ms.
- Componente DC: 34.64%.
- Frecuencia de la corriente inyectada por el circuito de tensión: 301.52 Hz.
- Tiempo de conexión circuito de reencendido: 150  $\mu$ s antes del cruce por cero.

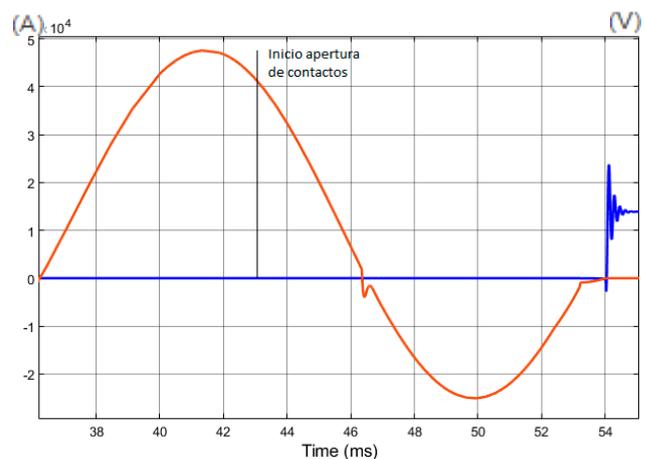
A continuación, en la [Fig. 6b](#) se puede observar la superposición de corrientes en el interruptor de prueba, en donde la secuencia inicia con el flujo de la corriente de cortocircuito, seguido de la inyección del impulso de corriente 150  $\mu$ s antes del cruce por cero (prolongando el arco hasta el siguiente cruce por cero), y por último la inyección de corriente por parte del circuito TRV, garantizando que la corriente se extinga en el último bucle.

**TABLA III.** VALORES DE LOS COMPONENTES DEL DISEÑO OBTENIDO MEDIANTE CÁLCULOS.

Componentes	Valor
Banco de resistencias (R3)	4.82 $\Omega$
Banco de inductores (L3)	0.20088 mH
Banco de capacitores (C4)	18.668 $\mu$ F



**Fig. 6a.** Respuesta del interruptor de prueba de 17 kV nominal ante prueba sintética con tiempo de arco máximo.



**Fig. 6b.** Superposición de corrientes en el interruptor de prueba de 17 kV nominal ante prueba sintética con tiempo de arco máximo.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comparar las características de las ondas generadas por cada uno de los circuitos, con respecto a los parámetros de diseño, se obtuvo los resultados mostrados en la [Tabla IV](#) para el circuito de tensión, y en la [Tabla V](#) para el circuito de corriente.

Como podemos observar en la [Tabla IV](#), existe una pequeña diferencia entre los parámetros representativos de la onda TRV calculados, y los de simulación. Esto se debe a que

en simulación se evidencia una onda con una cantidad considerable de oscilaciones que pueden llegar a afectar a los componentes. Por esta razón, se decidió implementar el banco de capacitores C3 que permite reducir el número de oscilaciones para garantizar la seguridad de los componentes, afectando en pequeña medida los parámetros del circuito.

Como se puede observar en la [Tabla V](#), existe un porcentaje de error bastante bajo al comparar los parámetros obtenidos mediante cálculos y simulación, esto se debe a que en simulación los modelos de los componentes presentan una resistencia interna que afecta la resistencia total del circuito y por consiguiente la corriente de cortocircuito.

En cuanto a la comparación de las características de la onda de impulso generada por el circuito de reencendido en simulación, y los parámetros de diseño calculados, se obtuvo los resultados mostrados en la [Tabla VI](#).

Como se puede observar en la [Tabla VI](#), existe una pequeña diferencia entre los parámetros representativos de la onda de impulso calculados y los de simulación. Para que el circuito de reencendido genere la onda de impulso deseada, se requieren valores de componentes bastante bajos y la presencia de parámetros internos en los modelos de los componentes afectan la onda final generada. El mayor porcentaje de error se encuentra en el tiempo de frente y esto es debido a que en simulación el inductor requiere introducir en su modelo el valor de conductancia en paralelo que por defecto extiende esta variable.

**TABLA IV.** COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CALCULADOS Y SIMULADOS DE LA ONDA DE TENSIÓN TRANSITORIA.

Parámetros	Datos calculados	Datos simulación	Porcentaje de error
Valor pico TRV $U_c$ [kV]	22.6	22.7	0.32%
Tiempo de llegada $t_3$ [μs]	76	74.8	1.58%
Tasa de rizado RRRV	0.2978	0.3035	1.91%

**TABLA V.** COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CALCULADOS Y SIMULADOS DE LA ONDA DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO.

Parámetros [A]	Datos calculados	Datos simulación	Porcentaje de error
$I_{rms}(sim) = I_{AC}$	25000	25003.3	0.01%
$I_p(sim)$	35355.34	35360	0.01%
$I_{rms}(asim)$	40000	40005.28	0.01%
$I_p(asim)$	63750	64010	0.41%

**TABLA VI.** COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO CALCULADOS Y SIMULADOS DE LA ONDA DE IMPULSO DE CORRIENTE.

Parámetros	Datos calculados	Datos simulación	Porcentaje de error
Valor pico del impulso	5 kA	4.93 kA	1.40%
Tiempo de frente	50 μs	52.5 μs	5.00%
Tiempo de cola	160 μs	156.8 μs	2.00%

## A. ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES

A continuación, se muestran las características principales que deben tener cada uno de los componentes tanto del circuito de tensión, del circuito de corriente como del circuito de reencendido para garantizar las condiciones dadas por parte del circuito de prueba.

### 1. Especificación del circuito de tensión

**TABLA VII.** ESPECIFICACIÓN DE COMPONENTES Y EQUIPOS QUE CONFORMAN EL CIRCUITO DE TENSIÓN.

Equipo	Valor
Banco de capacitores $C_1$	34 μF
Fuente de tensión directa $V_c$	13.2 kV <sub>DC</sub>
Banco de inductores $L_2$	8.2 mH
Banco de capacitores $C_2$	0.087 μF
Banco de resistores $R_2$	104 Ω
Banco de capacitores $C_3$	1.4 nF
Brecha de sobretensión SG	En 3 rangos de tensión
Unidad de disparo	Con retraso: ±10 μs

### 2. Especificación del circuito de corriente

**TABLA VIII.** ESPECIFICACIÓN DE COMPONENTES Y EQUIPOS QUE CONFORMAN EL CIRCUITO DE CORRIENTE.

Equipo	Valor
Fuente de tensión alterna de la red	$U_r = 440$ V
	$L = 32.95$ μH
	$U_n = 1$ kV
Reactor limitador de corriente $L_{ci}$	$I_{sc} = 25$ kA
	BIL = 60 kV
	$U_r = 17.5$ kV
	$I_n = 1250$ A
(MS) Interruptor de establecimiento SF6	$I_{sc} = 25$ kA
	BIL = 60 kV
	Tipo: VD4
	$U_r = 17.5$ kV
	$I_n = 1250$ A
(Master CB) Interruptor de respaldo SF6	$I_{sc} = 25$ kA
	BIL = 60 kV
	Tipo: HD4

### 3. Especificación del circuito de reencendido

Para la especificación de la fuente que carga el banco de capacitores principal, o el cargador DC, se debe garantizar la polaridad en ambos sentidos y el tiempo de carga.

**TABLA IX.** ESPECIFICACIÓN DE COMPONENTES Y EQUIPOS QUE CONFORMAN EL CIRCUITO DE REENCENDIDO.

Equipo	Descripción	Cantidad
Banco de capacitores	Capacitancia/tolerancia	18.668 $\mu\text{F}/+10\%$
	Voltaje nominal	36.4 kV <sub>DC</sub>
Resistencia serie	Resistencia	4.821192 $\Omega$
Reactor serie	Inductancia	0.20088 mH
	Voltaje nominal	36.4 kV <sub>DC</sub>
Cargador DC	Max. Rizado	$\leq 3\%$
	Polaridad	Positivo & negativo
	Tiempo de carga	$\leq 50$ s
Unidad de disparo	Tipo	GAP vacío
	Voltaje aislamiento	200 kV <sub>DC</sub>
	Voltaje de operación	30 - 150 kV <sub>DC</sub>
	Retardo	$\leq 1$ $\mu\text{s}$

### B. DIAGRAMA DE CONEXIÓN

El diagrama de conexión para el circuito de prueba se muestra en el [Anexo B](#).

### V. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se considera viable implementar un circuito de prueba sintética, debido a que tanto el circuito de corriente como el circuito de tensión se pueden diseñar de manera independiente, este además permite aislar ambos circuitos.
- Para la realización de la prueba con prolongación de arco (operación con tiempo de arco máximo y medio), no solo basta con generar un impulso de corriente con una pendiente lo suficientemente grande en comparación a la pendiente de decaimiento de la onda de cortocircuito, sino que también influye el momento de conexión del circuito de reencendido antes del cruce por cero.
- La polaridad del último bucle de corriente de cortocircuito en el instante antes de su interrupción determina la polaridad de la carga requerida del banco de condensadores principal del circuito de tensión.
- Debido a que, durante la sincronización de la prueba, los equipos del circuito de corriente se ven expuestos a la onda transitoria de tensión (onda de gran magnitud en muy corto tiempo), estos deben tener un valor de BIL de dos veces el valor pico de la tensión alcanzada.
- Si bien los circuitos de tensión, de corriente y de reencendido precisan valores de resistencias, inductancias y capacitancias con cierta precisión en cifras decimales, el desarrollo tecnológico ha permitido la

fabricación de bobinas y capacitores con capacidades nominales específicas que anteriormente no eran posibles. En este sentido, la obtención de dichos elementos no sería el reto más importante por superar en una fase de implementación práctica del circuito de prueba. El verdadero reto de la fase práctica sería la conformación del circuito de corriente, ya que, la resistencia interna de cada elemento afecta en gran proporción la magnitud de la corriente de cortocircuito por lo que esta variable se convierte en un criterio de gran importancia en la especificación de los equipos.

### REFERENCIAS

- [1] G. A. Mayor, "UNIVALLE Introducción a las subestaciones Cap VI - Interruptores," pp. 1–12.
- [2] J. G. Jamnani and S. A. Kanitkar, "Computer aided optimized design and simulation of synthetic test circuit for testing 800kV rating circuit breakers," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON, Nirma Univ. M.S Univ.*, no. i, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1109/TENCON.2009.5396232.
- [3] K. M. Takami and E. Dahlquist, "MODELING AND SIMULATION OF SHORT CIRCUIT CURRENT AND TRV TO DEVELOP A SYNTHETIC TEST SYSTEM FOR CIRCUIT BREAKERS," no. Sims 55, pp. 21–22, 2014.
- [4] I. Std *et al.*, "IEEE Guide for Synthetic Capacitive Current Switching Tests of AC High-Voltage Circuit Breakers," *Engineering*, 1999.
- [5] International Electrotechnical Commission, "IEC 62271 High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers," p. 346, 2008.
- [6] B. L. Sheng, "Design considerations of Weil-Dobke Synthetic testing Circuit for the Interrupting Testing for HV AC Circuit Breakers," *IEEE*, no. C, pp. 295–299, 2001.
- [7] International Electrotechnical Comition, "IEC 62271-101 Ed.2: High-voltage switchgear and controlgear - Part 101: Synthetic testing," 2016.
- [8] E. D. Taylor, A. Lawall, and D. Gentsch, "Single-Phase Short-Circuit Testing of Vacuum Interrupters Power Systems with an Effectively Earthed Neutral," *IEEE*, 2018.
- [9] G. Fei and Y. Yuan, "Synchronous Control Method for Weil Synthetic Circuit," pp. 1–6.
- [10] International Electrotechnical Comition, "IEC 62271-100 Ed.2. Appareillage à haute tension - Partie 100: Disjoncteurs à courant alternatif," no. Cdv, pp. 1–365, 2006.
- [11] S. Time, C. Test, D. Testing, and I. E. C. Standards, "Methods of Testing Circuit-Breakers : a Review," no. 1.
- [12] A. American and N. Standard, "An American National Standard IEEE Guide for Synthetic Fault Testing of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis," 1988.
- [13] T. Betz and D. Koenig, "Fundamental Studies on Vacuum Circuit Breaker Arc Quenching Limits with a Synthetic Test Circuit," pp. 365–369, 1997.
- [14] M. Ram, E. Emilio, R. Garc, and U. D. E. L. Valle, "Fundamentos de control de sistemas lineales," 2008.
- [15] M. S. . K. J.G Jamnani, "DESIGN AND SIMULATION OF 2-PARAMETERS TRV SYNTHETIC TESTING CIRCUIT FOR MEDIUM VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS," *M.S Univ. , Nirma Univ. India.*, no. December, pp. 19–21, 2006.
- [16] G. L. Ferro, "Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna," 2015.
- [17] ABB, "Interruptores automáticos de MT en SF6 para distribución secundaria (HD4 / R)," 2002.
- [18] ABB, "Interruptores MT en vacío para la distribución secundaria (VD4/R)," 2015.
- [19] C. Jong-hyuk, L. E. E. Sang-yun, S. Yoon-taek, Y. Hak-dong, and K. Maeng-hyun, "New Arc Extension Circuit Design and Specifications for 4000MVA High Power Test facility Expansion Project," pp. 447–450, 2015.
- [20] F. Roman, "Construcción de un generador de impulsos de corriente para ensayo de pararrayos y del sistema asociado de medida."
- [21] W. F. Giménez Gutiérrez, "Tesis Doctoral: Modelización de Interruptores Eléctricos de Potencia 7.7.," 1995.

## BIOGRAFÍAS



**JUAN CAMILO BELTRÁN SOLANO** Ingeniero Electricista egresado de la Universidad del Valle en Cali, Colombia. Originario de la ciudad de Cali, Valle del Cauca, Colombia. Su área de investigación se centra en los Sistemas de Potencia y el uso eficiente de la energía. Se formó como líder energético en el Programa de formación de líderes energéticos Ed. 11 con el Consejo Mundial de energía, Colombia.



**JUAN CAMILO HERNÁNDEZ MUÑOZ** Ingeniero Electricista egresado de la Universidad del Valle en Cali, Colombia. Originario de la ciudad de Cali, Valle del Cauca, Colombia. Su área de investigación se centra en los Sistemas de Potencia y en la Automatización Industrial. También cuenta con un título Técnico en Mantenimiento de Equipos Automatizados del Sena en Cali, Colombia.



**GUILLERMO APONTE MAYOR** Ingeniero Electricista egresado de la Universidad del Valle en Cali, Colombia. Originario de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Posee una Maestría en Ingeniería de Alta Tensión del Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester, Manchester, Reino Unido, y un Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Actualmente es Catedrático de la

Universidad del Valle y director del Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA.

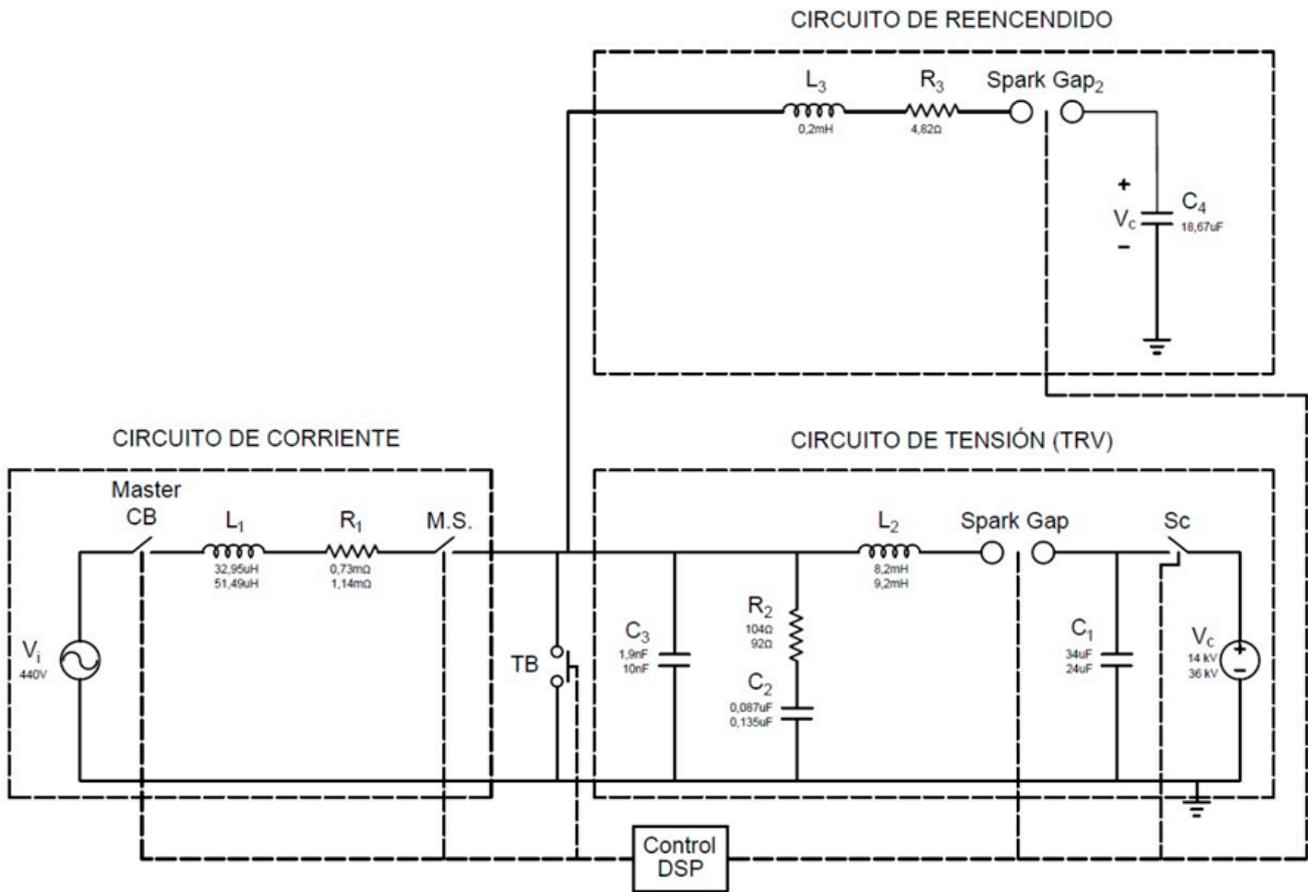
**CESAR TULIO DELGADO** Egresado de la Universidad del Valle, realizó estudios de Licenciatura, Ingeniería Eléctrica, Especialización y Maestría en la enseñanza y aprendizaje, especialmente en dispositivos de interrupción de circuitos eléctricos de potencia. Se ha desempeñado como Técnico e Ingeniero por 26 años en subestaciones, y como docente de Tecnología e Investigador en aprendizaje activo y enseñanza de enfoque Cooperativo-Colaborativo por más de 10 años.

## ANEXOS

### Anexo A. CARACTERÍSTICAS GENERALES TÍPICAS DE INTERRUPTORES DE MT EN VACÍO (17 KV) Y SF6 (36 KV).

		VD4/R 17			HD4/R 36		
Distancia entre polos	P = 230 mm	"			"		
	P = 300 mm	"			"		
	P = 350 mm	--			--		
Normas	IEC pub.60056	IEC 62271-100			"		
Tensión asignada	Ur[kV]	17.5			36		
Tensión asignada de aislamiento	Us[kV]	17.5			36		
Tensión de ensayo a 50 Hz	Ud (1 min) [kV]	38			70		
Tensión de ensayo a impulso	Up [kV]	95			170		
Frecuencia asignada	fr [Hz]	50-60			50-60		
Intensidad térmica asignada (40°C)	Ir [A]	630	800	1250	630	800	1250
Poder de corte asignado	Isc [kA]	12.5	---	---	12.5	12.5	12.5
		16	16	16	16	16	16
		20	20	20	---	---	---
		25	25	25	---	---	---
Intensidad de breve duración admisible asignada (3 s)	Ik [kA]	12.5	---	---	12.5	12.5	12.5
		16	16	16	16	16	16
		20	20	20	---	---	---
		25	25	25	---	---	---
Poder de cierre	Ip [kA]	31.5	---	---	31.5	31.5	31.5
		40	40	40	40	40	40
		50	50	50	---	---	---
		63	63	63	---	---	---
Secuencia de maniobra	[O-0,3min-CO-3min-CO]	"			"		
	[0-0,3s-CO-15S-CO]	"			"		
Tiempo de apertura	[ms]	40-60			45		
Tiempo de arco	[ms]	10-15			10-15		
Tiempo de interrupción	[ms]	50-75			55-60		
Tiempo de cierre	[ms]	30-60			80		
Aplicación del relé de protección con sensores de corriente	PR521	"			---		
	(I) In [A]	40 80 250 1250			---		
Dimensiones generales máximas	H [mm]	785			770		
	L [mm]	317			286.5		
	P [mm]	1029 (1) / 1170 (2)			1348 (P=350 mm)		
Temperatura de funcionamiento	[°C]	-5°C ...+40°C			-5°C ...+40°C		
Tropicalización	IEC: 60068-2-30, 721-2-1	"			"		
Compatibilidad electromagnética	IEC: 60694, 61000-6-2,-6-4	IEC 62271-1			"		

**Anexo B.** DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL CIRCUITO DE PRUEBA SINTÉTICO PARA INTERRUPTORES DE MEDIA TENSIÓN (17 KV Y 36 KV).



Recibido 05 de noviembre 2021. Aceptado 10 de marzo de 2022. Publicado 01 de agosto de 2022.

ISSN: 2448-7775

# Clasificación automática de radiografías de tórax usando inteligencia artificial

ARÓN HERNÁNDEZ TRINIDAD<sup>1\*</sup>, T. CÓRDOVA-FRAGA<sup>1</sup>, R. GUZMÁN-CABRERA<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, Campus León, División de Ciencias e Ingenierías.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, División de Ingenierías.

\*Autor de correspondencia: a.hernandeztrinidad@ugto.mx

**RESUMEN** La neumonía es una afección inflamatoria del pulmón que afecta a los alvéolos. El diagnóstico se basa en síntomas y examen físico. Las radiografías de tórax son frecuentemente utilizadas como alternativa para validar el diagnóstico. En el presente trabajo se presenta una metodología para llevar a cabo el procesamiento de imágenes basado en aprendizaje automático e inteligencia artificial con la finalidad de llevar a cabo una clasificación automática de dichas imágenes. Se presentan resultados de experimentos realizados en dos escenarios de clasificación: validación cruzada y conjuntos de entrenamiento y prueba. Se utilizan cinco métodos de aprendizaje automático distintos en cada escenario de clasificación. La configuración del experimento fue planteada de manera que permitiera identificar las mejores condiciones de clasificación, permitiendo, además, observar de una manera clara en las métricas de evaluación utilizadas el impacto del tamaño del conjunto de entrenamiento. Los resultados obtenidos permiten ver la efectividad de la metodología implementada, en virtud de que los resultados son muy competitivos con los reportados en el estado de arte.

**PALABRAS CLAVE**— Neumonía, procesamiento de imágenes, inteligencia artificial, aprendizaje automático.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante años, las discusiones acerca de la Inteligencia Artificial (IA) en muchas áreas de la ciencia, han sido el centro de conferencias, simposios, congresos, etc. En años recientes, el interés científico ha aumentado en relación con las imágenes médicas, donde existen diferentes trabajos con imágenes médicas que determinan las aplicaciones basadas en la Inteligencia Artificial que generan valores importantes en diagnósticos, y ayudan a optimizar el tiempo y el trabajo de una manera eficaz.

Por tal motivo, este trabajo se ha enfocado en obtener resultados a partir de una metodología que pueda ser capaz de procesar y clasificar imágenes médicas torácicas, que es uno de los exámenes que se realizan con más frecuencia, por lo que se ha aplicado la IA para crear mejoras en el examen de diagnóstico. Este reporte fue posible, usando redes neuronales convolucionales (CNN), que es un tipo de red neuronal artificial, formadas por multicapas que ayudan por medio de la visión artificial, la clasificación y segmentación de imágenes de manera efectiva. Este modelo computacional aprende a partir de un conjunto de entrenamiento, y va evolucionando poco a poco, para obtener valores que aporten sustentos de experimentos científicos. Estas CNN aprenden y se forman a sí mismos, en lugar de ser programados de forma explícita.

### 1. Neumonía

La neumonía es una afección inflamatoria del pulmón que afecta principalmente a los alvéolos (pequeños sacos de aire) [1]. Los síntomas típicamente incluyen una combinación de tos productiva o seca, dolor de pecho, fiebre y dificultad para respirar [2]. Generalmente es causada por una infección con virus o bacterias. El diagnóstico a menudo se basa en los síntomas y el examen físico [3]. La radiografía de tórax, los análisis de sangre, entre otros, pueden ayudar a confirmar el diagnóstico [4]. El examen físico con el diagnóstico por imágenes es vital para la detección de neumonía [5]. Las radiografías de tórax se utilizan con frecuencia en los procedimientos de validación y representan una alternativa rápida para conocer las características y la extensión de las inflamaciones pulmonares [6]. Las áreas de opacidad de la imagen de radiografía de Rayos X se correlacionan comúnmente con las regiones afectadas por neumonía [7]. En la Fig. 1. se puede ver un ejemplo de ello.

La identificación de opacidades en las imágenes de Rayos X de tórax a veces es un desafío, incluso para los médicos experimentados [8]. Las técnicas de Inteligencia Artificial, visión por computadora, se han utilizado ampliamente en los últimos años, como herramientas auxiliares en el diagnóstico del padecimiento [9]. Un sistema de clasificación adecuado y un número suficiente de muestras de formación son requisitos previos para una clasificación exitosa.



Fig. 1. Radiografías de tórax normal (izquierda) y anormal (derecha). El aumento de la opacidad sugiere neumonía.

## 2. Procesamiento de clasificación de imágenes

La clasificación de imágenes ha atraído durante mucho tiempo la atención de la comunidad científica debido a los resultados que se han obtenido [10]. Éstos han servido de base para muchas aplicaciones: científicas, médicas, etc. Por tal motivo, se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar métodos y técnicas de clasificación avanzadas para mejorar los valores reportados actualmente en las investigaciones [11]. El preprocesamiento de imágenes puede incluir la detección y restauración de líneas defectuosas, rectificación geométrica o registro de imágenes, calibración radiométrica, corrección atmosférica y topográfica [12]. Si se utilizan diferentes datos auxiliares, la conversión de datos entre diferentes fuentes o formatos y la evaluación de la calidad de estos datos también son necesarias antes de que puedan incorporarse en un procedimiento de clasificación. La rectificación geométrica precisa o el registro de imágenes de datos de detección es un requisito previo [13]. En la Fig. 2. se muestra las secciones correspondientes del procesamiento de imágenes.

## 3. Objetivo

El papel de las técnicas de aprendizaje automático por computadora, en particular las redes neuronales convolucionales (CNN) [14], se evalúa en detalle en este documento. Se presta especial atención a aspectos particulares de una solución basada en CNN para la interpretación de la opacidad de la radiografía de tórax, incluido las métricas de medición como resultados del modelo propuesto y la relevancia de los procedimientos de aumentar el número de imágenes.

## 4. Conjunto de datos

El conjunto de datos escogidos para este ejercicio de aprendizaje automático es una versión modificada de Paul Mooney presentado en Kaggle, “Imágenes de Rayos X de tórax (neumonía). De acuerdo con el autor, las imágenes se encuentran etiquetadas manualmente por expertos en el área, además, del conjunto de datos, “... las imágenes de Rayos X de tórax (anterior-posterior) se seleccionaron de cohortes

retrospectivas de pacientes pediátricos de uno a cinco años del Centro Médico de Mujeres y Niños... Todas las imágenes de radiografías de tórax que se realizaron fueron parte de la atención clínica de rutina de los pacientes...”<sup>1</sup>. El conjunto de datos original contiene 5,863 observaciones, divididas en carpetas de entrenamiento (1,341 casos normales, 3,875 casos de neumonía), validación (8 casos normales, 8 casos de neumonía) y pruebas (234 casos normales, 390 casos de neumonía). El conjunto de datos modificados contiene 2,224 observaciones, donde se propone una división más equilibrada entre las imágenes de entrenamiento y de prueba:

- Observaciones de entrenamiento: 1,600 (800 casos normales, 800 casos de opacidad pulmonar).
- Observaciones de prueba: 624 (234 casos normales, 390 casos de opacidad pulmonar).

## II. DESARROLLO

La configuración inicial del experimento fue la decisión de realizar dos tipos de métodos de evaluación: conjunto de entrenamiento/prueba [15] y validación cruzada [16]. Las observaciones en el conjunto de entrenamiento forman la experiencia que el algoritmo usa para aprender. El conjunto de prueba es un conjunto de observaciones utilizadas para evaluar el rendimiento del modelo utilizando alguna medida de rendimiento. Las observaciones del conjunto de entrenamiento no se incluyen en el conjunto de prueba [17]. La validación cruzada es una técnica para evaluar modelos de *Machine Learning* mediante el entrenamiento de modelos de aprendizajes como: máquinas de vectores de soporte, vecinos más cercanos, entre otros; en subconjuntos de los datos de entrada disponibles y evaluarlos con el subconjunto complementario de los datos [18]. En la Fig. 3. se muestra un ejemplo de subconjuntos de evaluación y subconjuntos de entrenamiento. Contiene cinco modelos que se crean y se entrenan durante una validación cruzada de cinco iteraciones.

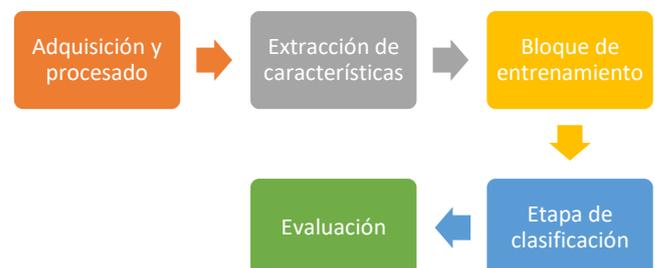


Fig. 2. Pasos por seguir para realizar de forma completa una clasificación de imágenes.



Fig. 3. (Azul) Fuentes de datos de evaluación. (Blanco) Fuentes de datos de entrenamiento (complemento de la evaluación).

<sup>1</sup> <https://www.kaggle.com/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia>

El modelo uno, utiliza el 20% de los datos para la evaluación y el 80% restante para el entrenamiento. El segundo modelo utiliza el 40% para evaluación y el restante para el entrenamiento, y así sucesivamente.

En la [Tabla I](#), se muestran los pasos que se realizaron para la obtención de los resultados en las pruebas antes citadas.

### A. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN DE MODELOS EN EL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

Las métricas de evaluación nos ayudan a cuantificar y evaluar aspectos de tendencia, comportamiento y resultados de un experimento en la Inteligencia Artificial [19]. Entonces, éstas tienen como objetivo estimar la precisión de la generalización del modelo sobre datos futuros (no visto o fuera de la muestra), de este modo, los modelos van adquiriendo una mejor evaluación. Además, las métricas de evaluación nos proporcionan los valores de rendimiento de un algoritmo de aprendizaje automático, que representa una componente integral en la ciencia de datos [20].

Para problemas de clasificación, la evaluación se puede reportar en función de la matriz de confusión [21]. Como se puede observar en la [Tabla II](#). Las filas de la tabla representan la *clase predicha*, mientras que las columnas la *clase real*. De esta matriz de confusión, *tp* y *tn* denotan el número de instancias positivas y negativas que están correctamente clasificados. Mientras tanto, *fp* y *fn*, denotan el número de instancias positivas y negativas que están incorrectamente clasificados. A partir de la [Tabla II](#), se pueden generar varias métricas para evaluar el desempeño del clasificador. En este trabajo, se usaron cinco métricas de evaluación con diferentes enfoques de evaluaciones [22].

**TABLA I.** METODOLOGÍA DE LOS MODELOS PROPUESTOS.

Conjunto de entrenamiento/prueba	Validación cruzada
Conjunto de datos.	
Extracción de las características de las imágenes.	
Algoritmo que otorga el porcentaje de entrenamiento y de prueba.	Creación de dos archivos: todas las características y todas las etiquetas.
Códigos creados en el lenguaje de programación Python, que contiene los modelos con sus respectivos clasificadores.	
Se obtienen las métricas de evaluación que proporcionan los valores de precisión de los modelos, así como su rendimiento.	

**TABLA II.** MATRIZ DE CONFUSIÓN.

	Clase positiva real	Clase negativa real
Clase positiva predicha	Verdadero positivo ( <i>tp</i> )	Falso positivo ( <i>fp</i> )
Clase negativa predicha	Falso negativo ( <i>fn</i> )	Verdadero negativo ( <i>tn</i> )

#### 1. Exactitud

La exactitud es una métrica de evaluación común para los problemas de clasificación. Es el número de predicciones correctas hechas como una proporción de todas las predicciones hechas, en la [Ec. \(1\)](#), se muestra cómo se obtiene el valor de la métrica. En general, cuando las clases son aproximadamente iguales en tamaño, usar esta métrica, nos dará valores clasificados correctamente.

$$Exactitud = \frac{tp+tn}{total} = \frac{tp+tn}{tp+tn+fp+fn} \quad (1)$$

#### 2. Precisión

La precisión indica con qué frecuencia es correcto los valores y se obtiene a partir de la [Ec. \(2\)](#). Esta métrica representa el número de verdaderos positivos que son realmente positivos en comparación con el número total de valores positivos predichos.

Cuando se tiene un desequilibrio de clase, la precisión puede convertirse en una métrica poco fiable para medir el desempeño del modelo de evaluación.

$$Precisión = \frac{tp}{tp+fp} \quad (2)$$

#### 3. Sensibilidad

La métrica de sensibilidad, también conocida como exhaustividad, muestra la cantidad de verdaderos positivos, que el modelo ha clasificado en función del número total de valores positivos, como establece la [Ec. \(3\)](#).

$$Sensibilidad = \frac{tp}{tp+fn} \quad (3)$$

#### 4. Puntuación F1

Esta métrica es la combinación de las métricas de precisión y sensibilidad, [Ec. \(4\)](#) [23]. La mejor puntuación es igual a 1 y la peor a 0.

$$F1 = 2 \frac{precisión \cdot sensibilidad}{precisión + sensibilidad} \quad (4)$$

#### 5. Kappa de Cohen

Es una medida de concordancia que se basa en comparar la concordancia observada en el conjunto de datos, respecto a la que podría ocurrir por mero azar.

En la [Tabla III](#), se muestra el grado de estimación con el resultado del cálculo de Kappa [24].

**TABLA III.** ESCALA DE VALORES DE KAPPA Y SU CONCORDANCIA.

Kappa	Estimación del grado de acuerdo
< 0	No acuerdo
0.0 – 0.2	Insignificante
0.2 – 0.4	Bajo
0.4 – 0.6	Moderado
0.6 – 0.8	Bueno
0.8 – 1.0	Muy bueno

## B. METODOLOGÍA DEL MODELO PROPUESTO

La clasificación de imágenes de las radiografías de tórax, se hicieron para dos tipos de modelos, como se ha mencionado. Sin embargo, en ambos modelos propuestos, se utilizó la misma red neuronal convolucional ResNet50 [25] para la obtención del vector de características, que son utilizados para el entrenamiento de los clasificadores implementados. Esta red proporciona una mejor comprensión de los diferentes enfoques y sus aplicaciones a la clasificación de Rayos X de tórax [26].

### 1. Conjunto de entrenamiento y prueba

La arquitectura de este sistema se dividió en tres categorías:

1. Preprocesamiento de las imágenes.
2. Extracción de las características, usando ResNet50.
3. Clasificación.

Los experimentos fueron realizados en el lenguaje de programación Python, donde se realizaron los algoritmos correspondientes, para obtener los rendimientos de los modelos de evaluación.

Como primer paso, se declararon las librerías que contiene la red neuronal convolucional a usar [26]. Una vez declaradas, se cargó la red ResNet50. En el algoritmo, se colocan las instrucciones específicas para recolectar las imágenes y cargarlas al sistema. El objetivo principal de usar la red neuronal, en la mayoría de las tareas de clasificación de imágenes, es reducir la complejidad computacional del modelo que probablemente aumenta si la entrada son muchas imágenes. Las imágenes se redimensionaron a  $224 \times 224$  píxeles, ya que el cálculo de la red se realiza con esta dimensión para realizar un procesamiento rápido. Todas las técnicas adicionales, se han aplicado sobre estas imágenes reducidas.

Para la extracción de las características, se procedió a aplicar la CNN, por lo tanto, esta etapa se ocupa de la descripción de la arquitectura de la red ResNet50 y su contribución en la extracción de características de las imágenes. En la Fig. 4. se muestra la arquitectura [27].



**Fig. 4.** Arquitectura ResNet50 para la clasificación de imágenes de Rayos X de tórax.

Se utilizaron cinco escenarios de clasificación para los dos modelos propuestos, estos clasificadores forman parte del aprendizaje profundo, los utilizados fueron:

- 1) Máquinas de Vectores de Soporte (SVM).
- 2) Regresión Logística (LR).
- 3) Vecinos más cercanos (KNC).
- 4) Estadística Naive-Bayes (NB).
- 5) Centroide más cercano (Centroid).

Ahora bien, al tener los clasificadores en los algoritmos de los modelos, se procede a obtener las métricas de evaluación, para medir el desempeño de los sistemas de clasificación implementados y que muestren los resultados correspondientes a los modelos de evaluación. Las métricas de evaluación fueron:

- a. Exactitud.
- b. Precisión.
- c. Sensibilidad.
- d. F1.
- e. Kappa.

En la Tabla IV, se reporta el número de imágenes de entrenamiento y de pruebas utilizado en cada configuración del experimento, como se puede observar, el conjunto de entrenamiento aumenta al doble en cada caso, mientras que el conjunto de prueba permanece constante, intuitivamente se puede pensar que un conjunto de entrenamiento con más instancias para aprender tendrá un mejor desempeño, esto precisamente es lo que se pretende probar con el experimento propuesto.

**TABLA IV.** CONJUNTO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA.

Imágenes de entrenamiento	Imágenes de prueba
200	624
400	624
800	624
1,600	624

## 2. Validación cruzada – Amazon Machine Learning

Para este experimento, tanto las imágenes de entrenamiento como las de prueba, se utilizaron de manera conjunta, es decir, la primera configuración era de 824 imágenes, la segunda 1,024, y así consecutivamente hasta obtener el número total de imágenes 2,224.

### III. RESULTADOS

A partir del conjunto de datos y de los clasificadores, tanto en el modelo de conjunto de entrenamiento/prueba y de validación cruzada, en la [Tabla V](#) y en la [Tabla VI](#) se registran los valores obtenidos de ambos modelos en cada configuración. En las columnas se muestran los clasificadores con las métricas de evaluación respectivas.

Se puede observar que, a medida que el número de imágenes aumenta, la exactitud y la precisión obtienen mejores valores, se puede suponer, que a medida que se entrena el modelo (con suficientes imágenes en el conjunto de entrenamiento) y vaya aumentando dichas instancias, el modelo va adquiriendo mejores valores, y el aprendizaje cada vez es más preciso, teniendo como resultados valores competitivos.

De igual manera, sucede con todas las métricas utilizadas en cada clasificador, aumentan los valores gradualmente, a medida que aumentan las imágenes de entrenamiento, lo que sugiere una clasificación cada vez más exacta.

**TABLA V.** VALORES OBTENIDOS EN EL CONJUNTO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA.

Número de imágenes	Clasificador	Exactitud	Precisión
200 + 624	SVM	0.79	0.80
	LR	0.80	0.81
	KNC	0.81	0.80
	NB	0.80	0.81
	Centroid	0.78	0.78
400 + 624	SVM	0.83	0.86
	LR	0.84	0.85
	KNC	0.84	0.84
	NB	0.85	0.85
	Centroid	0.82	0.82
800 + 624	SVM	0.81	0.86
	LR	0.83	0.86
	KNC	0.84	0.85
	NB	0.84	0.85
	Centroid	0.81	0.82
1, 600 + 624	SVM	0.91	0.91
	LR	0.88	0.89
	KNC	0.89	0.89
	NB	0.86	0.85
	Centroid	0.83	0.81

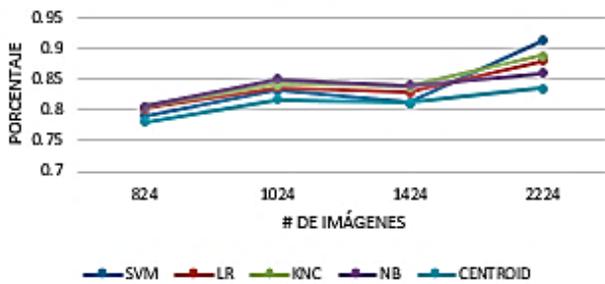
**TABLA VI.** VALORES OBTENIDOS EN EL MODELO DE VALIDACIÓN CRUZADA.

Número de imágenes	Clasificador	Exactitud	Precisión
824	SVM	0.94	0.94
	LR	0.91	0.91
	KNC	0.92	0.92
	NB	0.85	0.86
	Centroid	0.86	0.86
1, 024	SVM	0.94	0.94
	LR	0.91	0.92
	KNC	0.93	0.93
	NB	0.88	0.88
	Centroid	0.89	0.88
1, 424	SVM	0.95	0.95
	LR	0.92	0.92
	KNC	0.93	0.93
	NB	0.88	0.89
	Centroid	0.88	0.88
2, 224	SVM	0.95	0.95
	LR	0.92	0.92
	KNC	0.92	0.92
	NB	0.88	0.88
	Centroid	0.88	0.89

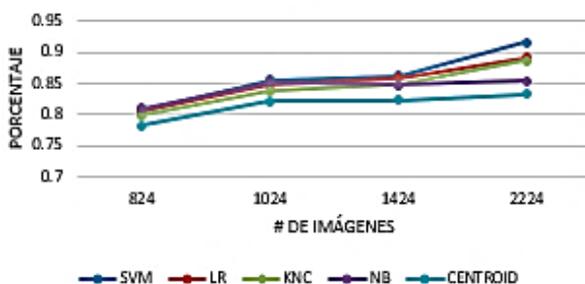
En el registro de los resultados, se observa que el mejor clasificador que nos proporciona un porcentaje mayor, al momento de clasificar, es el clasificador de Máquina de Vectores de Soporte. Como se ha mencionado, a medida que aumenta el número de imágenes, aumenta la efectividad de ambos modelos, con el clasificador SVM. En la [Fig. 5](#) se exponen las gráficas de las métricas de evaluación: exactitud y precisión en los dos modelos.

Además, se puede verificar que efectivamente, el SVM, es el clasificador con mayor porcentaje a medida que aumenta el número de imágenes. Lo anterior indica que el conjunto de entrenamiento aumenta, y, por lo tanto, la precisión y la exactitud de clasificar las instancias de radiografías de tórax, es efectivo.

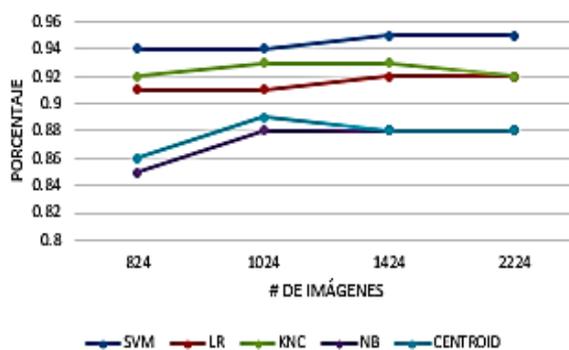
Al comparar ambos modelos con el clasificador SVM, se puede constatar, que el modelo de validación cruzada nos proporciona un mayor porcentaje de exactitud y precisión. De igual manera, con las métricas restantes. En la [Tabla VII](#) y en la [Tabla VIII](#) se registran los datos correspondientes.



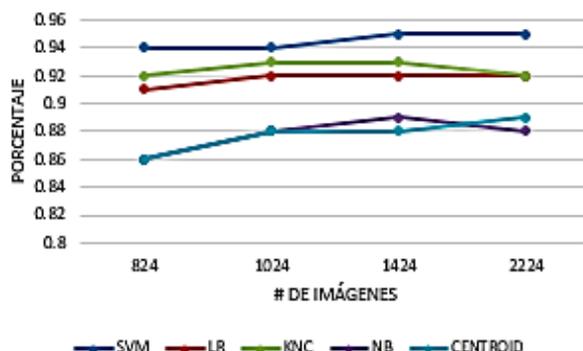
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. (a) y (b) son las métricas de evaluación para el modelo de conjunto de entrenamiento y prueba, exactitud y precisión, respectivamente. (c) y (d) métricas de evaluación para el modelo de validación cruzada. El rango de las ordenadas va de 0.5 a 0.9, que representan el 50 % y 90 % en escala de porcentaje.

TABLA VII. COMPARACIÓN ENTRE EL CONJUNTO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA (CEYP) Y VALIDACIÓN CRUZADA (VC) PARA LA EXACTITUD.

Número de imágenes	Clasificador	CEYP	VC
824	SVM	0.79	0.94
1,024	SVM	0.83	0.94
1,424	SVM	0.81	0.95
2,224	SVM	0.91	0.95

TABLA VIII. COMPARACIÓN ENTRE EL CONJUNTO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA (CEYP) Y VALIDACIÓN CRUZADA (VC) PARA LA PRECISIÓN.

Número de imágenes	Clasificador	CEYP	VC
824	SVM	0.81	0.94
1,024	SVM	0.86	0.94
1,424	SVM	0.86	0.95
2,224	SVM	0.92	0.95

#### IV. CONCLUSIÓN

Los resultados muestran que en el modelo de validación cruzada existe un alto índice de confiabilidad al clasificar las radiografías de tórax, para predecir la neumonía. Sin embargo, el conjunto de entrenamiento y prueba, a medida que aumenta las instancias en el conjunto de entrenamiento, este va adquiriendo valores competitivos, con los reportados en la literatura, superiores al 90 %.

Se ha reportado en el trabajo presente, una alternativa para clasificar radiografías de este tipo, diferentes a los enfoques tradicionales de CNN, donde utilizan otros tipos de redes neuronales convolucionales. Para este trabajo, se reportó los valores obtenidos a partir de la red ResNet50, dicha red, nos ha proporcionado valores que pueden compararse con resultados de artículos ya publicados. La extracción de las características y el procesamiento de imágenes, sin ningún refinamiento a las instancias, son diferentes a cualquier otro modelo previamente entrenado, este trabajo reportado, representa una alternativa para clasificar imágenes de radiografías de tórax, previamente etiquetadas manualmente.

Cuando se ocupa de un diagnóstico médico, un falso positivo (es decir, predecirla enfermedad cuando el paciente está sano) es menos crítico que un falso negativo (predecir la salud cuando el paciente está enfermo). El número de falsos negativos obtenidos con la CNN, que aquí se ha presentado es bajo, alrededor del 5%, comparado con trabajos publicados [28, 29]. Lo que posiciona a los modelos presentados como una herramienta auxiliar y confiable para la detección de neumonía.

Cabe mencionar, que el enfoque mostrado se realizó con 2,224 observaciones en total, podría tomarse en cuenta que, si se aumenta el conjunto de datos, se podrían obtener

mejores resultados y los falsos negativos serían mínimos. Esto podría tomarse como una sugerencia de mejora adicional al presente artículo. El modelo se entrenó varias veces, aumentando de 200, 400 y así sucesivamente duplicado el número de imágenes en el conjunto de entrenamiento, por lo que se mostró resultados favorables con las métricas reportadas: exactitud y precisión.

Las imágenes utilizadas en el experimento fueron imágenes de entrada de un canal, es decir, en escala de grises. Podría considerarse realizar filtros en las imágenes, y poder comparar las métricas con las imágenes originales (escala de grises) y los filtros aplicados, y así verificar qué filtro es adecuado para clasificar, o si no hay necesidad de aplicar filtro para procesar las imágenes.

## REFERENCIAS

- [1] Sattar, S.B.A. and S. Sharma, *Bacterial pneumonia*. 2018.
- [2] Metlay, J.P., et al., *Influence of age on symptoms at presentation in patients with community-acquired pneumonia*. Archives of internal medicine, 1997. **157**(13): p. 1453-1459.
- [3] Hoare, Z. and W.S. Lim, *Pneumonia: update on diagnosis and management*. Bmj, 2006. **332**(7549): p. 1077-1079.
- [4] Flanders, S.A., et al., *Performance of a bedside C-reactive protein test in the diagnosis of community-acquired pneumonia in adults with acute cough*. The American journal of medicine, 2004. **116**(8): p. 529-535.
- [5] Parveen, N. and M.M. Sathik, *Detection of pneumonia in chest X-ray images*. Journal of X-ray Science and Technology, 2011. **19**(4): p. 423-428.
- [6] Ayan, E. and H.M. Ünver, *Diagnosis of pneumonia from chest X-ray images using deep learning*. in *2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT)*. 2019. Ieee.
- [7] Abbas, A., M.M. Abdelsamea, and M.M. Gaber, *Classification of COVID-19 in chest X-ray images using DeTraC deep convolutional neural network*. Applied Intelligence, 2021. **51**(2): p. 854-864.
- [8] Self, W.H., et al., *High discordance of chest x-ray and computed tomography for detection of pulmonary opacities in ED patients: implications for diagnosing pneumonia*. The American journal of emergency medicine, 2013. **31**(2): p. 401-405.
- [9] Varshni, D., et al., *Pneumonia detection using CNN based feature extraction*. in *2019 IEEE international conference on electrical, computer and communication technologies (ICECCT)*. 2019. IEEE.
- [10] Olaode, A., G. Naghdy, and C. Todd, *Unsupervised classification of images: a review*. International Journal of Image Processing, 2014. **8**(5): p. 325-342.
- [11] Anthony, G., H. Greg, and M. Tshildizi, *Classification of images using support vector machines*. arXiv preprint arXiv:0709.3967, 2007.
- [12] Ponraj, D.N., et al., *A survey on the preprocessing techniques of mammogram for the detection of breast cancer*. Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 2011. **2**(12): p. 656-664.
- [13] Vasuki, P., J. Kanimozhi, and M.B. Devi, *A survey on image preprocessing techniques for diverse fields of medical imagery*. in *2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE)*. 2017. IEEE.
- [14] Albawi, S., T.A. Mohammed, and S. Al-Zawi, *Understanding of a convolutional neural network*. in *2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. 2017. Ieee.
- [15] Hensman, P. and D. Masko, *The impact of imbalanced training data for convolutional neural networks*. Degree Project in Computer Science, KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [16] Refaeilzadeh, P., L. Tang, and H. Liu, *Cross-validation*. Encyclopedia of database systems, 2009. **5**: p. 532-538.
- [17] Storkey, A., *When training and test sets are different: characterizing learning transfer*. Dataset shift in machine learning, 2009. **30**: p. 3-28.

- [18] Browne, M.W., *Cross-validation methods*. Journal of mathematical psychology, 2000. **44**(1): p. 108-132.
- [19] Dalianis, H., *Evaluation Metrics and Evaluation*, in *Clinical Text Mining: Secondary Use of Electronic Patient Records*. 2018, Springer International Publishing: Cham. p. 45-53.
- [20] Hossin, M. and M.N. Sulaiman, *A review on evaluation metrics for data classification evaluations*. International journal of data mining & knowledge management process, 2015. **5**(2): p. 1.
- [21] Visa, S., et al., *Confusion matrix-based feature selection*. MAICS, 2011. **710**: p. 120-127.
- [22] Handelman, G.S., et al., *Peering into the black box of artificial intelligence: evaluation metrics of machine learning methods*. American Journal of Roentgenology, 2019. **212**(1): p. 38-43.
- [23] Flores, É.C. and J.A.H. Soriano, *Análisis de concordancia mediante coeficiente de Kappa de Cohen para la elaboración de un instrumento de categorización de entrevistas biográfico-narrativas*. Educación: aportaciones metodológicas: p. 50.
- [24] Mukti, I.Z. and D. Biswas, *Transfer learning based plant diseases detection using ResNet50*. in *2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*. 2019. IEEE.
- [25] Baltruschat, I.M., et al., *Comparison of Deep Learning Approaches for Multi-Label Chest X-Ray Classification*. Scientific Reports, 2019. **9**(1): p. 6381.
- [26] Hira, S., A. Bai, and S. Hira, *An automatic approach based on CNN architecture to detect Covid-19 disease from chest X-ray images*. Applied Intelligence, 2021. **51**(5): p. 2864-2889.

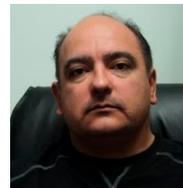
## BIOGRAFÍAS



**ARÓN HERNÁNDEZ TRINIDAD** Estudiante del programa de Doctorado en Física, de la División de Ciencias e Ingenierías del Campus León de la Universidad de Guanajuato. Maestro en Ciencias Aplicadas por la Universidad de Guanajuato. Licenciado en Física por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



**TEODORO CÓRDOVA-FRAGA** Profesor Titular en el Departamento de Ingeniería Física de la División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato campus León. Es Doctor en Física (2003) por la Universidad de Guanajuato, en modalidad mixto con la Universidad de Sao Paulo en Brasil. Estancia postdoctoral en Vanderbilt University (2004 - 2005) as Research Fellow. Pertenece al SNI Nivel 2. Integrante del Cuerpo Académico de Física Médica e Instrumentación Biomédica



**RAFAEL GUZMÁN-CABRERA** Profesor Titular del departamento de Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato desde hace 21 años. Doctor en Reconocimiento de Formas e Inteligencias Artificial por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, SIN 1. Miembro del Cuerpo Académico de Física Aplicada y Tecnologías Avanzadas.