

Herramienta de simulación para análisis del campo magnético rotatorio mediante vector espacial y armónicos en MATLAB

Simulation tool for analysis of the rotating magnetic field using spatial vector and harmonics in MATLAB

Maykop Pérez Martínez^I*, Josnier Ramos Guardarrama^{II}, Luis René Brizuela Bringuez^I, Alexander Fernández Correa^{III}

^IUniversidad de Concepción, Chile

^{II}Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, Cuba

^{III}Universidad Federal de Roraima, Brasil

* Autor por correspondencia: maykoperez@udec.cl

Recibido: 22 de octubre de 2025

Aprobado: 15 de enero de 2026

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial4.0internacional](#)



RESUMEN/ ABSTRACT

Se presenta la implementación de una aplicación diseñada para la visualización y análisis cualitativo del Campo Magnético Rotatorio (CMR) en sistemas eléctricos trifásicos sometidos a distorsiones de calidad de energía. La herramienta utiliza la representación de vectores espaciales, la formulación se basa en la transformación de Clarke, lo que permite la representación dinámica de las corrientes de fase, sus componentes ortogonales y la trayectoria del vector espacial resultante. Se simulan condiciones operativas como sistema balanceado, fase abierta y la respuesta no-sinusoidal de un rectificador trifásico de seis pulsos. Además, facilita la inyección controlada de armónicos de orden 3°, 5° y 7°. Los resultados demuestran que la herramienta es coherente con la teoría vectorial y ofrece las gráficas para cada condición de distorsión. El principal aporte radica en su valor pedagógico y de diagnóstico cualitativo, facilita la correlación visual directa entre los parámetros de distorsión y la deformación geométrica del CMR.

Palabras clave: vector espacial, transformación Clarke, componentes α-β, simulación de sistemas trifásicos, análisis armónico, máquinas eléctricas rotativas.

The implementation of an application designed for the visualization and qualitative analysis of the Rotating Magnetic Field (RMF) in three-phase electrical systems subjected to power quality distortions is presented. The tool utilizes the representation of spatial vectors, and the formulation is based on the Clarke transformation, allowing for the dynamic representation of phase currents, their orthogonal components, and the trajectory of the resulting spatial vector. It simulates operational conditions such as a balanced system, open-phase faults, and the non-sinusoidal response of a six-pulse three-phase rectifier. Additionally, it facilitates the controlled injection of harmonics of orders 3rd, 5th, and 7th. The results demonstrate that the tool is consistent with vector theory and provides graphs for each distortion condition. The main contribution lies in its pedagogical and qualitative diagnostic value, enabling a direct visual correlation between distortion parameters and the geometric deformation of the RMF.

Keywords: spatial vector, Clarke transformation, α-β components, simulation of three-phase systems, harmonic analysis, rotating electrical machines.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos trifásicos constituyen la infraestructura fundamental para la conversión y transmisión de energía en aplicaciones industriales, representando más del 85% de la potencia eléctrica procesada globalmente [1, 2]. En la industria, los motores trifásicos representan aproximadamente el 70% del consumo eléctrico, siendo la principal carga en los sistemas eléctricos industriales [3].

Cómo citar este artículo:

Maykop Pérez Martínez y otros. Herramienta de simulación para análisis del campo magnético rotatorio mediante vector espacial y armónicos en MATLAB. Ingeniería Energética. Vol. 47(2026): publicación continua. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Por otro lado, la creciente integración de convertidores electrónicos de potencia, cargas no lineales y fuentes de energía renovable ha introducido problemas técnicos en términos de calidad de energía, lo que se manifiestan en fenómenos de distorsión armónica, desbalances de corriente y aparición de componentes de secuencia negativa que afectan la eficiencia y vida útil de los equipos eléctricos [4-8]. En ese sentido, la teoría del vector espacial, fundamentada en la transformación de Clarke propuesta originalmente en 1943, surge como la metodología matemática esencial para el análisis, control y diagnóstico de sistemas trifásicos. Esta representación transforma las tres variables instantáneas de corriente del dominio trifásico abc hacia un sistema de coordenadas ortogonales bidimensionales $\alpha\beta$, generando un vector complejo cuya trayectoria en el plano complejo contiene información sobre la condición operativa del sistema [9, 10].

De acuerdo con los autores de las referencias [11, 12]; las investigaciones recientes han demostrado la efectividad del análisis del vector espacial en múltiples aplicaciones. Por ejemplo, los autores de [13, 14]; desarrollaron técnicas para la detección de fallas de cortocircuito entre espiras en motores mediante el análisis de la elipticidad de la trayectoria del vector espacial. En [15, 16]; propusieron métodos de diagnóstico basados en la descomposición tiempo-frecuencia del vector espacial para identificar barras rotas durante transitorios de arranque. En el contexto de convertidores electrónicos, los autores de la obra [17], aplicaron la representación vectorial espacial para optimizar estrategias de modulación PWM en inversores trifásicos multinivel.

Por otra parte, el análisis de componentes simétricas mediante la descomposición del vector espacial ha ganado relevancia para la cuantificación de desbalances en sistemas de distribución. En la obra [18], los autores implementaron algoritmos de estimación fasorial para la identificación en tiempo real de asimetrías en redes de media tensión. También en [19], estudiaron el impacto térmico de los desbalances de voltaje en motores de inducción, para establecer que componentes de secuencia negativa superiores al 5% reducen significativamente la expectativa de vida del aislamiento. Es por ello que, como aseguran los investigadores de [20-22], la visualización interactiva de fenómenos electromagnéticos complejos ha sido reconocida como una herramienta pedagógica fundamental en la formación de ingenieros eléctricos. Las interfaces gráficas de simulación permiten la experimentación virtual con parámetros del sistema sin requerir montajes experimentales costosos, facilitando la comprensión intuitiva de conceptos abstractos como campos magnéticos rotatorios, componentes de secuencia y armónicos espaciales. Además, el uso de herramientas de simulación interactiva mejora significativamente la retención de conocimientos en cursos de máquinas eléctricas comparado con métodos tradicionales basados exclusivamente en clases magistrales.

En ese sentido, los autores de [23, 24], afirman que, a pesar de la extensa literatura sobre vectores espaciales, existe una carencia de plataformas integradas que combinen flexibilidad paramétrica, visualización en tiempo real de componentes ortogonales $\alpha\beta$ y capacidad de simulación simultánea de múltiples condiciones operativas. La mayoría de las implementaciones reportadas se centran en casos específicos de estudio o requieren entornos de simulación complejos que limitan su accesibilidad para usuarios no especializados. Adicionalmente, pocas herramientas incorporan modelos precisos de rectificadores trifásicos con secuenciación sectorial correcta ni permiten la inyección independiente de armónicos con secuencias de rotación apropiadas.

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de una aplicación interactiva diseñada específicamente para la visualización y el análisis cualitativo del Campo Magnético Rotatorio (CMR) bajo condiciones de distorsión. Para lograr esto, la herramienta implementa la transformación de Clarke como base para la representación dinámica y simultánea de las corrientes de fase, sus componentes ortogonales y la trayectoria del vector espacial resultante. La aplicación simula escenarios operativos clave, como sistemas balanceados, fallas de fase abierta y la respuesta no-sinusoidal de un rectificador de seis pulsos, además de facilitar la inyección controlada de armónicos (3° , 5° y 7°). De esta forma, el principal aporte de este trabajo radica en su valor pedagógico y de diagnóstico cualitativo, al facilitar la correlación visual directa entre los parámetros de distorsión seleccionados por el usuario y la deformación geométrica observada en el CMR.

MATERIALES Y MÉTODOS

En correspondencia con el objetivo declarado, en esta sección se explica la metodología empleada para el desarrollo de la herramienta de simulación propuesta. Se describen los fundamentos teóricos que sustentan la aplicación, comenzando por la transformación de Clarke y el análisis de secuencias armónicas. Posteriormente, se detalla la arquitectura computacional implementada en el entorno MATLAB R2024a, incluyendo los módulos de generación de señales, la inyección paramétrica de distorsiones y el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI) orientado al análisis cualitativo.

Fundamentos teóricos de la Transformación Clarke

La transformación de Clarke es una herramienta matemática que realiza un mapeo lineal entre el sistema trifásico real (abc) y un plano bidimensional ortogonal ($\alpha\beta$), facilitando el análisis y control de sistemas eléctricos y electrónicos. Esta transformación convierte las tres señales sinusoidales desfasadas 120° en dos componentes ortogonales de igual amplitud, lo que permite representar el sistema trifásico como un vector espacial en el plano $\alpha\beta$, manteniendo la invarianza de la potencia [25], como se muestra en la ecuación (1):

$$\vec{I}_s(t) = \frac{2}{3} [i_a(t) + i_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c(t)e^{j\frac{4\pi}{3}}] \quad (1)$$

Donde:

- $e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ representa una rotación de 120° en el plano complejo.
- El factor $\frac{2}{3}$ garantiza que la norma del vector espacial preserve la amplitud de potencia instantánea del sistema trifásico

Las componentes ortogonales en el sistema de coordenadas $\alpha-\beta$ se obtienen proyectando el vector espacial sobre los ejes real e imaginario, de acuerdo a la ecuación (2):

$$\begin{aligned} I_\alpha(t) &= \operatorname{Re}\{\vec{I}_s(t)\} = \frac{2}{3}[i_a(t) - \frac{1}{2}i_b(t) - \frac{1}{2}i_c(t)] \\ I_\beta(t) &= \operatorname{Re}\{\vec{I}_s(t)\} = \frac{2}{3}[\frac{\sqrt{3}}{2}i_b(t) - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

Esta descomposición transforma el problema de análisis tridimensional en un problema bidimensional equivalente, simplificando significativamente el tratamiento matemático de sistemas trifásicos. Por otro lado, el empleo de la transformación de Clarke es fundamental para la estimación robusta de frecuencia, la detección de fallas y la reducción de distorsión armónica, incluso bajo condiciones de desequilibrio o transitorios asimétricos [26]. Además, su aplicación se extiende a la mejora de algoritmos de control en convertidores PWM y a la extracción de señales de compensación para dispositivos de mitigación de calidad de energía [27]. La representación vectorial en el plano $\alpha-\beta$ permite observar fácilmente las trayectorias de los vectores espaciales y analizar el comportamiento dinámico del sistema, lo que resulta especialmente útil en la simulación y modelado de redes eléctricas y en la implementación de estrategias avanzadas de control

Propiedades fundamentales de la transformación

Para un sistema balanceado de secuencia positiva con corrientes sinusoidales, como el descrito en la ecuación (3), la transformación de Clarke convierte las corrientes ($i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$) en componentes α y β que forman un vector espacial de corriente en el plano $\alpha-\beta$. Para este caso ideal, el vector resultante describe una trayectoria circular de radio constante, girando a la velocidad angular ω , lo que refleja la simetría y el equilibrio del sistema [28].

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_m \cos(\omega t + \phi) \\ i_b(t) &= I_m \cos(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) &= I_m \cos(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3)$$

Esta propiedad es fundamental para la detección y análisis de la secuencia positiva, ya que la magnitud del vector permanece constante y su ángulo varía linealmente con el tiempo, facilitando la estimación de frecuencia y la identificación de condiciones anómalas solo cuando la trayectoria se distorsiona. Además, la representación circular en el plano $\alpha-\beta$ es la base para técnicas avanzadas de control y filtrado en sistemas eléctricos, permitiendo separar fácilmente las componentes de secuencia positiva y negativa, la ecuación (4), muestra lo explicado:

$$\begin{aligned} \vec{I}_s(t) &= I_m e^{j(\omega t + \phi)} \\ |\vec{I}_s(t)| &= I_m \end{aligned} \quad (4)$$

Componentes de secuencia y descomposición simétrica

El teorema de Fortescue generalizado permite descomponer cualquier sistema trifásico desbalanceado en componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Esta descomposición puede aplicarse directamente en el dominio del vector espacial [29]. En este contexto, el vector espacial total se expresa como la suma de los vectores espaciales de cada componente de secuencia, y la magnitud del vector espacial resultante en condiciones de desbalance presenta una modulación característica a frecuencia doble (2ω), tal como se describe en la ecuación (5), [11]:

$$\begin{aligned} \vec{I}_s(t) &= \vec{I}_s^+(t) + \vec{I}_s^-(t) + \vec{I}_s^0(t) \\ |\vec{I}_s(t)| &= \sqrt{|\vec{I}_s^+|^2 + |\vec{I}_s^-|^2 + 2|\vec{I}_s^+||\vec{I}_s^-| \cos(2\omega t + \Delta\phi)} \end{aligned} \quad (5)$$

Esta modulación a 2ω es una característica del desbalance y se manifiesta en fenómenos como pulsaciones de par electromagnético en máquinas rotativas, afectando el rendimiento y la estabilidad de los sistemas eléctricos [30].

Ánálisis de armónicos en el dominio vectorial espacial

El análisis de armónicos en el dominio vectorial espacial revela que la presencia de componentes armónicas en las corrientes trifásicas genera múltiples vectores espaciales, cada uno rotando a diferentes velocidades y direcciones según el orden del armónico. Para un armónico de orden h , la secuencia de rotación y la forma de la trayectoria en el plano complejo dependen de la relación $h = 6k \pm 1$, lo que determina si el armónico pertenece a la secuencia positiva o negativa y su sentido de rotación [31]. Cada armónico contribuye al diagrama de locus del vector espacial con un número específico de lóbulos, y la superposición de estos armónicos modifica la forma y la dinámica del vector resultante, permitiendo identificar visualmente la presencia y el tipo de armónicos en el sistema [32]. Es importante señalar que en el contexto de la aplicación desarrollada se tuvo en cuenta los armónicos que se describen a continuación:

Armónico de orden 3

Para $h = 3$, las corrientes armónicas están en fase en las tres fases. Sustituyendo en la ecuación (1), se puede determinar el vector espacial del armónico 3, ese procedimiento muestra en la ecuación (6):

$$\begin{aligned} i_a^{(3)}(t) &= I_3 \cos(3\omega t + \phi_3) \\ i_b^{(3)}(t) &= I_3 \cos(3\omega t + \phi_3) \\ i_c^{(3)}(t) &= I_3 \cos(3\omega t + \phi_3) \\ \vec{I}_s^{(3)}(t) &= \frac{2}{3} I_3 \cos(3\omega t + \phi_3) [1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{4\pi}{3}}] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Como se puede observar, en sistemas trifásicos sin conexión de neutro, el armónico 3 y todos sus múltiplos (9, 15, 21, etc.) no contribuyen al vector espacial, ya que estos armónicos son de secuencia cero y sus componentes se suman en fase en las tres fases, resultando en una cancelación cuando se aplica la transformación de Clarke o el análisis vectorial espacial. Esto significa que, en el dominio del vector espacial, los armónicos de orden triple no generan un vector rotante y, por tanto, no aparecen en la representación α - β de sistemas trifásicos balanceados y sin neutro [31, 32]. Este fenómeno es fundamental para el análisis de distorsión armónica y la detección de armónicos relevantes en sistemas trifásicos, ya que permite enfocar la mitigación y el control en los armónicos que sí afectan la calidad de la energía y el funcionamiento de los equipos.

Armónico de orden 5

Para el armónico de orden 5, las corrientes trifásicas presentan una secuencia de fase negativa, lo que significa que el vector espacial correspondiente rota en sentido inverso al de la fundamental en el plano α - β . Esta característica es fundamental en el análisis de armónicos, ya que los armónicos de orden $h = 6k - 1$ generan vectores espaciales que giran en dirección opuesta a la fundamental, contribuyendo a distorsiones específicas en el sistema [33], en la ecuación (7), se muestra lo descrito:

$$\begin{aligned} i_a^{(5)}(t) &= I_5 \cos(5\omega t + \phi_5) \\ i_b^{(5)}(t) &= I_5 \cos(5\omega t + \phi_5 + \frac{2\pi}{3}) \\ i_c^{(5)}(t) &= I_5 \cos(5\omega t + \phi_5 - \frac{2\pi}{3}) \\ \vec{I}_s^{(5)}(t) &= I_5 e^{-j(5\omega t + \phi_5)} \end{aligned} \quad (7)$$

La presencia de este armónico puede causar efectos indeseados como pulsaciones de par y aumento de la distorsión armónica total, por lo que técnicas de modulación y control, como la modulación por ancho de pulso basada en vectores espaciales, buscan eliminar selectivamente estos armónicos negativos para mejorar la calidad de la energía y el desempeño de máquinas eléctricas [34].

Armónico de orden 7

Para el armónico de orden 7, las corrientes trifásicas mantienen secuencia positiva, lo que significa que el vector espacial generado por este armónico rota en el mismo sentido que el fundamental en el plano α - β . Esta propiedad es característica de los armónicos cuyo orden cumple $h = 6k + 1$, como el séptimo, y es fundamental para el análisis y control de la distorsión armónica en sistemas trifásicos [35], en la ecuación (8), se muestra lo descrito:

$$\begin{aligned}
 i_a^{(7)}(t) &= I_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\
 i_b^{(7)}(t) &= I_7 \cos(7\omega t + \phi_7 - \frac{2\pi}{3}) \\
 i_c^{(7)}(t) &= I_7 \cos(7\omega t + \phi_7 + \frac{2\pi}{3}) \\
 \vec{I}_s^{(7)}(t) &= I_7 e^{j(7\omega t + \phi_7)}
 \end{aligned} \tag{8}$$

La superposición de estos vectores armónicos genera trayectorias complejas en el plano $\alpha-\beta$ con patrones geométricos distintivos. La presencia del séptimo armónico puede contribuir a la distorsión de la forma de onda y afectar el desempeño de máquinas eléctricas, por lo que técnicas de modulación y control, como la modulación por ancho de pulso basada en vectores espaciales, buscan eliminar selectivamente estos armónicos para mejorar la calidad de la energía.

Arquitectura Computacional y Metodología de Simulación

La aplicación se desarrolló en MATLAB R2024a e implementa una arquitectura modular basada en programación orientada a eventos para garantizar la interactividad. El flujo metodológico de la simulación se compone de tres etapas funcionales: Generación de Señales, Procesamiento y Transformación, y Visualización Sincronizada. En la figura 1, se muestra la interfaz de la aplicación.

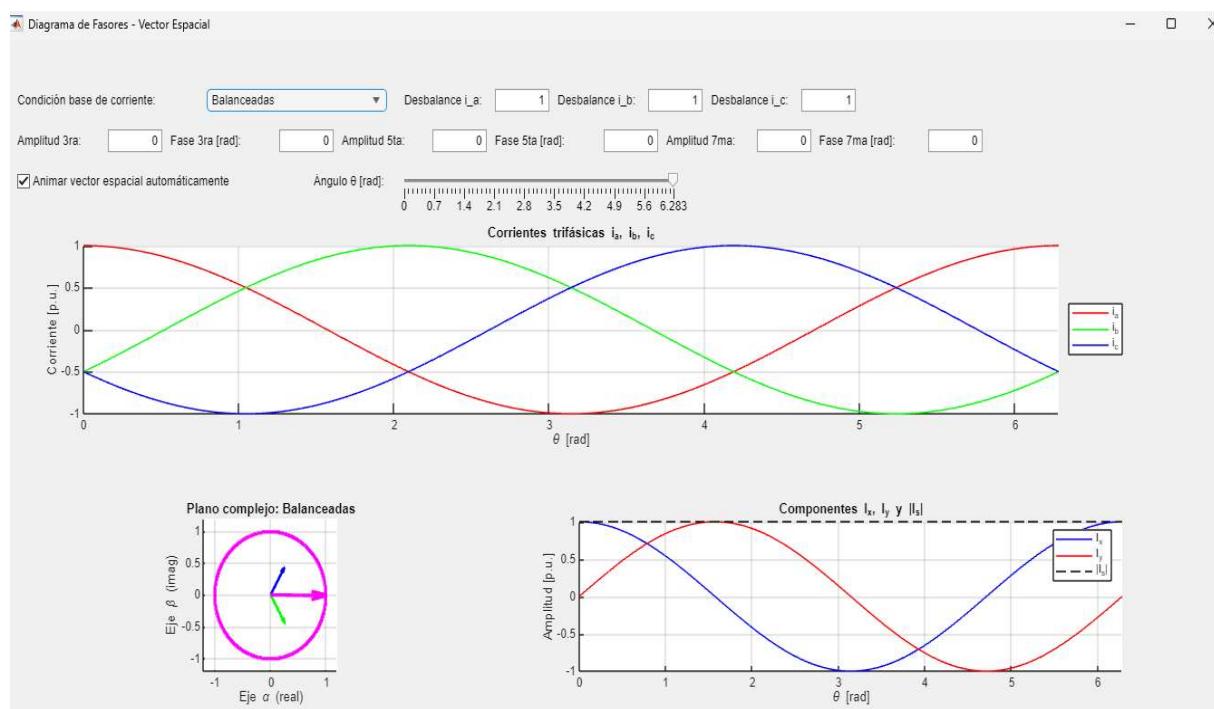


Fig. 1. Interfaz de la aplicación desarrollada para corrientes balanceadas

Implementa tres configuraciones de simulaciones base y distorsiones paramétricas: El núcleo de la simulación permite al usuario seleccionar uno de los tres escenarios base:

- **Corrientes balanceadas:** Sistema trifásico de secuencia positiva directa con desplazamiento angular exacto de 120° .
- **Falla de fase abierta:** Simulación de pérdida del conductor de fase C. Esta condición genera un desbalance severo con componente de secuencia negativa comparable en magnitud a la de secuencia positiva.
- **Rectificador de 6 Pulses:** El rectificador trifásico de 6 pulsos presenta un **patrón de conmutación discreto** que divide el ciclo eléctrico completo, 360° , en 6 sectores de 60° , donde en cada sector dos fases conducen, una positiva y una negativa, y la tercera está inactiva. Esta secuencia de conmutación es característica de los puentes rectificadores trifásicos no controlados y determina la forma de las corrientes de entrada, generando una corriente de línea con forma escalonada y un contenido armónico específico.

En la tabla 1, refleja cómo, en cada sector, las corrientes de fase toman valores normalizados (+1, -1, 0) según qué fases están activas, y esta normalización mediante el factor $\sqrt{2}/3$ asegura que la potencia RMS se conserve correctamente. Este patrón de conmutación es fundamental para el análisis de armónicos y el modelado de rectificadores, ya que determina la generación de armónicos de orden $6h\pm1$ en la red y la necesidad de estrategias de eliminación en aplicaciones industriales

Tabla 1. Secuencia de conmutación simulada del rectificador de 6 pulsos

Tabla 1. Secuencia de conmutación simulada del rectificador de 6 pulsos

Sector	Rango Angular (°)	ia	ib	ic	Descripción
0	[0° – 60°)	+1	-1	0	Fase A positiva, B negativa
1	[60° – 120°)	+1	0	-1	Fase A positiva, C negativa
2	[120° – 180°)	0	+1	-1	Fase B positiva, C negativa
3	[180° – 240°)	-1	+1	0	Fase B positiva, A negativa
4	[240° – 300°)	-1	0	+1	Fase C positiva, A negativa
5	[300° – 360°)	0	-1	+1	Fase C positiva, B negativa

Sobre esta señal base, la interfaz permite la **superposición paramétrica de distorsiones**:

- **Desbalance de amplitud:** Se aplican factores de ganancia individuales a cada corriente de fase para simular asimetrías.
- **Inyección de armónicos:** Se permite la adición controlada de armónicos de secuencia cero, secuencia negativa y secuencia positiva, respetando las secuencias de rotación teóricas descritas.

Ahora bien, una vez sintetizadas las corrientes de fase totales, fundamentales y distorsiones, se aplican dos pasos metodológicos importantes:

- Normalización adaptativa: Para facilitar la comparación visual y evitar la saturación gráfica, se aplica una normalización por valor máximo absoluto. El sistema identifica el valor máximo en el conjunto de las tres fases y escala todas las señales a un rango de p.u., para preservar las relaciones de fase.
- **Transformación vectorial:** El módulo final aplica la transformación de Clarke al conjunto de datos normalizados, calculando las componentes real e imaginaria para cada incremento angular.

El análisis cualitativo se ve facilitado por un control deslizante de ángulo y una función de animación automática, que permite al usuario observar directamente la morfología de la trayectoria (círculo, elipse, hexágono, estrella), la dirección de rotación y las pulsaciones de magnitud.

Metodología de Simulación Cualitativa

La metodología de este estudio se basa en el análisis morfológico y cualitativo de las visualizaciones generadas por la GUI, en lugar de la extracción de métricas cuantitativas. Para ello, se definieron seis escenarios de simulación representativos, detallados en la tabla 2, que la aplicación está diseñada para modelar.

Tabla 2. Casos de Estudio Simulados en la Aplicación

Caso	Condición simulada	Parámetros de configuración (p.u.)	Objetivo del análisis cualitativo
1	Sistema balanceado	$k_a = 1, k_b = 1, k_c = 1$ $A_3 = A_5 = A_7 = 0$	Establecer la línea base morfológica trayectoria circular perfecta para comparación visual.
2	Desbalance moderado	$k_a = 1, k_b = 0,85, k_c = 1$ $A_3 = A_5 = A_7 = 0$	Visualizar la deformación elíptica incipiente causada por la introducción una asimetría
3	Desbalance Severo	$k_a = 1, k_b = 0,70, k_c = 1$ $A_3 = A_5 = A_7 = 0$	Observar la elipticidad pronunciada y las pulsaciones de magnitud (2ω) resultantes de una asimetría severa.
4	Falla de Fase Abierta	$i_c = 0$ $A_3 = A_5 = A_7 = 0$	Caracterizar la firma morfológica de la falla (colapso de la rotación) y la distorsión extrema.
5	Distorsión Armónica Severa	$k_a = 1, k_b = 1, k_c = 1$ $A_3 = 0,30, A_5 = 0,25,$ $A_7 = 0,15$	Simular la operación con cargas no lineales y analizar la morfología "estrellada" resultante de la superposición de secuencias.
6	Rectificador 6 Pulsos	6 Pulses $A_3 = A_5 = A_7 = 0$	Aislar y visualizar la firma hexagonal pura resultante del patrón de conmutación sectorial del convertidor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso 1: Sistema balanceado

La Figura 2 a), presenta las visualizaciones de la simulación obtenidas para el caso de referencia con corrientes trifásicas balanceadas. El panel de corrientes temporales muestra tres sinusoides con amplitud unitaria normalizada y desfase exacto de 120° entre fases, característica esencial de un sistema equilibrado de secuencia positiva. El diagrama del plano α - β muestra la característica fundamental de sistemas balanceados: el vector espacial I_s traza una trayectoria circular perfecta de radio constante $|I_s| = 1$ p.u. Esta circunferencia uniforme confirma la ausencia de componentes de secuencia negativa, cumpliendo con la condición teórica predicha por la ecuación (4). El panel de componentes ortogonales muestra $I_x(\theta)$ e $I_y(\theta)$ como dos sinusoides puras desfasadas exactamente 90° , confirmando la ortogonalidad perfecta del sistema de coordenadas α - β . Estos resultados establecen la línea base de referencia, validando la implementación correcta de la transformación Clarke con factor de normalización $2/3$. Para sistemas balanceados ideales, la transformación produce un vector espacial con magnitud constante igual a la amplitud de las corrientes de fase, preservando la potencia instantánea entre dominios

Caso 2: Desbalance moderado

La introducción simulada de un desbalance del 15% en la fase B, $k_B = 0,85$ produce modificaciones significativas en la morfología del vector espacial. La figura 2 b), ilustra las transformaciones observadas. Las formas de onda temporales revelan claramente la reducción de amplitud en $i_B(\theta)$ respecto a las otras dos fases, mientras que los desplazamientos angulares de 120° se mantienen inalterados. Esta asimetría introduce componentes de secuencia negativa que se manifiestan como una deformación elíptica en la trayectoria del vector espacial. El diagrama del plano α-β exhibe una transformación, la trayectoria circular se deforma hacia una elipse con semiejes mayor y menor claramente diferenciados.

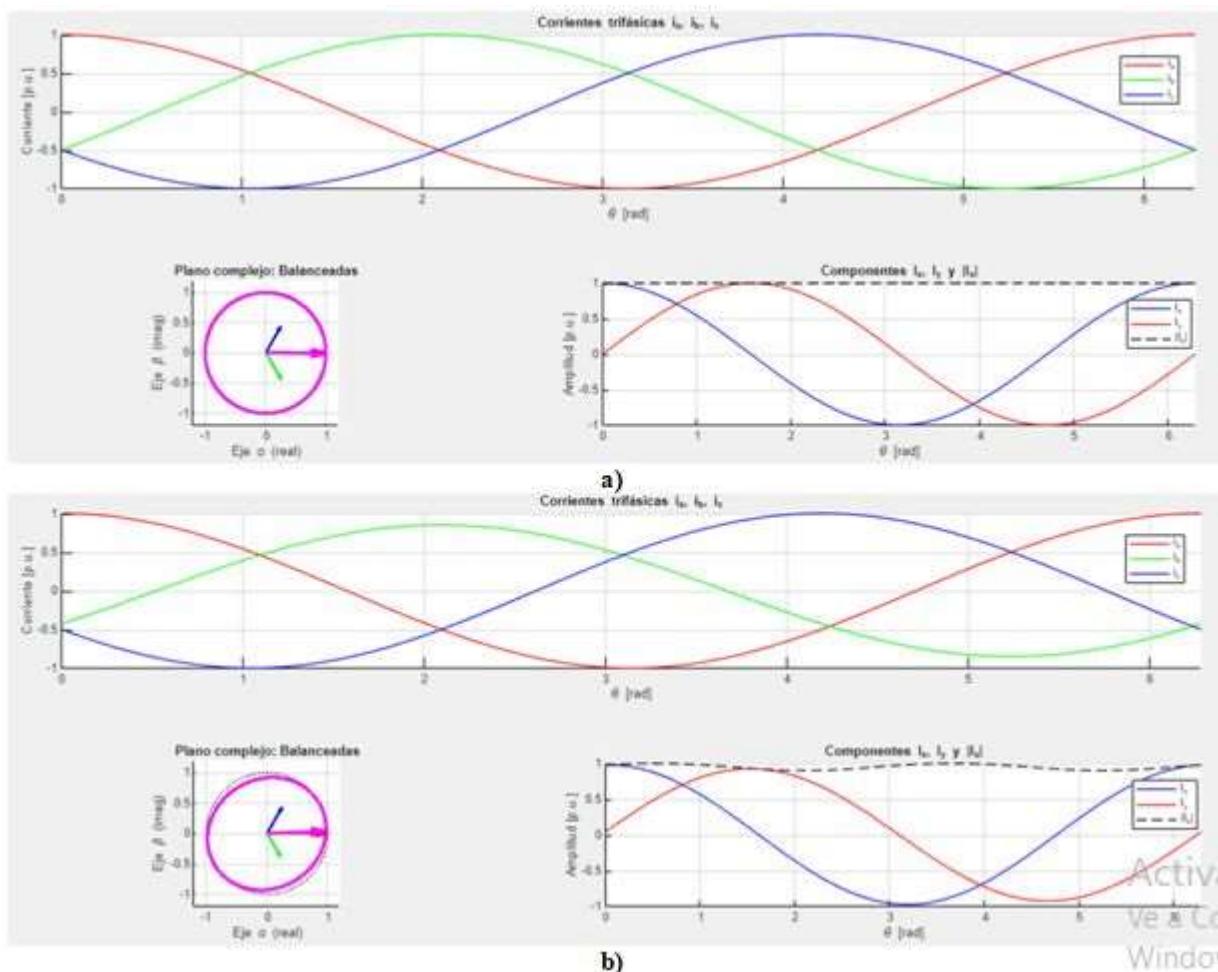


Fig. 2. a) sistema balanceado, b) sistema con desbalance moderado de un 15 % en la fase B

Caso 3: Desbalance severo

Incrementando el desbalance simulado hasta el 30% en la fase B, $k_B = 0,70$, se observa una acentuación dramática de los fenómenos identificados en el Caso 2. La figura 3, documenta esta condición operativa límite.

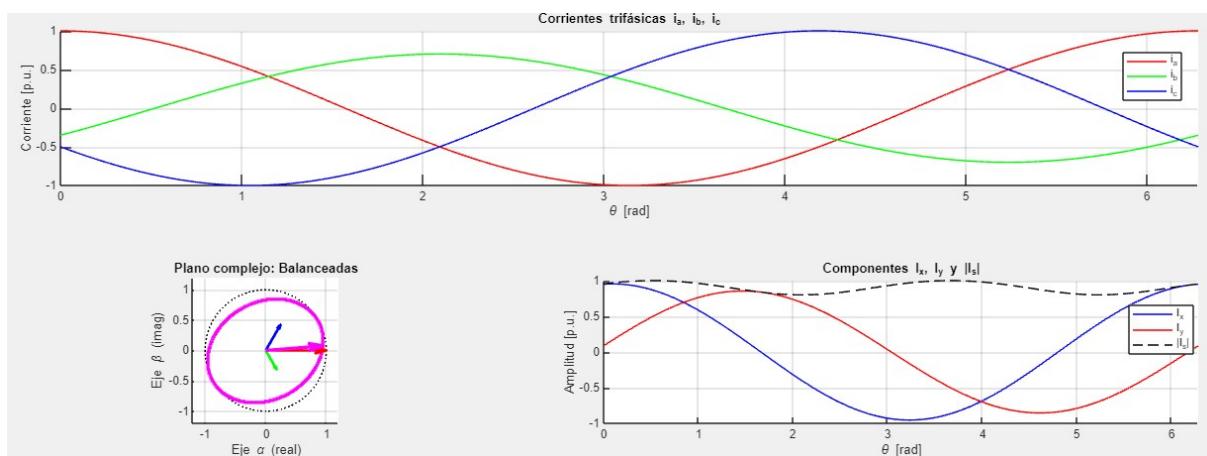


Fig. 3. Sistema con desbalance severo de un 30 % en la fase B

En aplicaciones prácticas de máquinas eléctricas, este nivel de desbalance induciría efectos significativos que comprometerían la operación del equipo.

Caso 4: Falla de Fase Abierta

La pérdida simulada completa de una fase, $i_c = 0$, representa una condición de falla que produce alteraciones extremas en el comportamiento del vector espacial. La figura 4, ilustra esta situación.

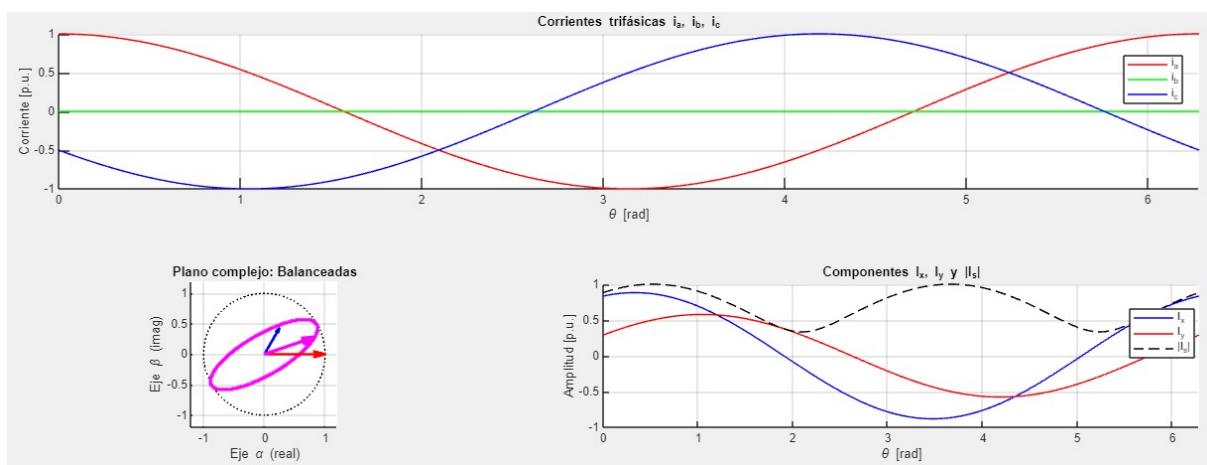


Fig. 4. Sistema con pérdidas de una fase

Las formas de onda temporales muestran únicamente dos corrientes activas, conformando un sistema efectivamente monofásico con retorno por la tercera línea. El diagrama del plano α - β revela que la trayectoria altamente distorsionada en forma de elipse pronunciada. Esta morfología elíptica es la característica de un desbalance severo, donde la ausencia de la tercera componente fasorial introduce una componente de secuencia negativa de magnitud comparable a la secuencia positiva. El resultado de esta superposición se confirma en el panel inferior derecho, donde la magnitud exhibe oscilaciones pronunciadas a frecuencia doble, en lugar de ser constante, lo cual es coherente con la Ecuación 5 para desbalances.

Caso 5: Distorsión armónica

La inyección simulada simultánea de armónicos 3° , 5° y 7° con amplitudes significativas, $A_3 = 0,30$, $A_5 = 0,25$, $A_7 = 0,15$ p.u., produce una distorsión severa de las formas de onda, manteniendo periodicidad, pero con morfología no sinusoidal. La figura 5, documenta este escenario representativo de operación con cargas no lineales.

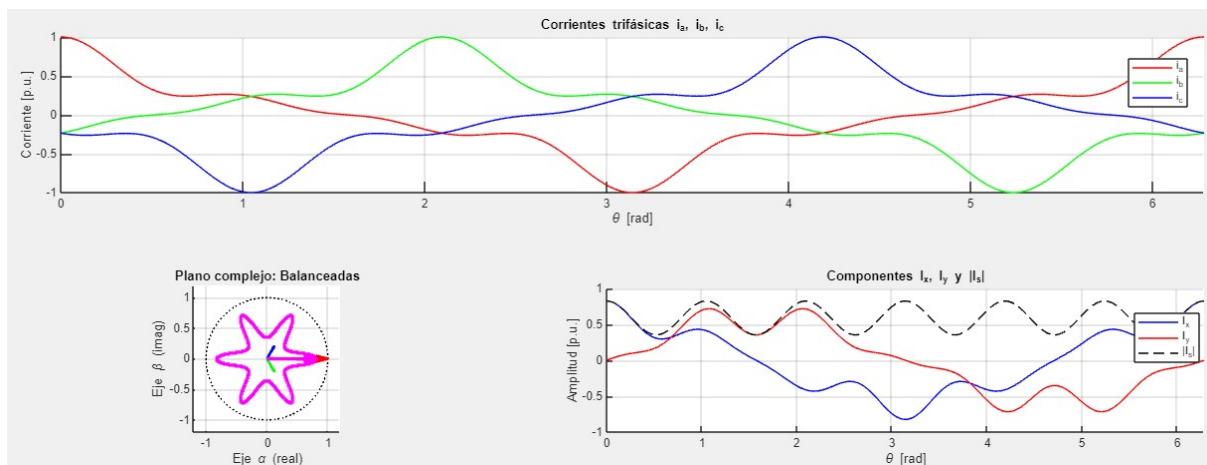


Fig. 5. Sistema con distorsión armónica

Las corrientes temporales exhiben aplanamiento característico en los picos máximos y ensanchamiento de los cruces por cero. El comportamiento del vector espacial bajo distorsión armónica revela fenómenos complejos de superposición:

- Armónico 3° (secuencia cero): Aunque teóricamente no contribuye al vector espacial, bajo condiciones de desbalances menores residuales genera una pequeña pulsación radial a frecuencia 3ω .
- Armónico 5° (secuencia negativa): Genera un vector espacial secundario que rota en sentido inverso a velocidad 5ω . Su superposición con el fundamental produce cinco lóbulos interiores claramente visibles en la trayectoria del plano α - β .
- Armónico 7° (secuencia positiva): Crea un vector que corota con el fundamental a velocidad 7ω , generando siete ondulaciones en la trayectoria externa.

La trayectoria resultante del vector espacial presenta una morfología de "estrella con pétalos", característica, donde cada armónico contribuye con su propia frecuencia de modulación espacial.

Caso 6: Rectificador de 6 pulsos

El patrón de conmutación simulado característico de un rectificador trifásico de seis pulsos genera formas de onda cuadradas con transiciones abruptas cada 60° eléctricos. La figura 6, documenta este escenario fundamental en aplicaciones de conversión AC/DC industrial.

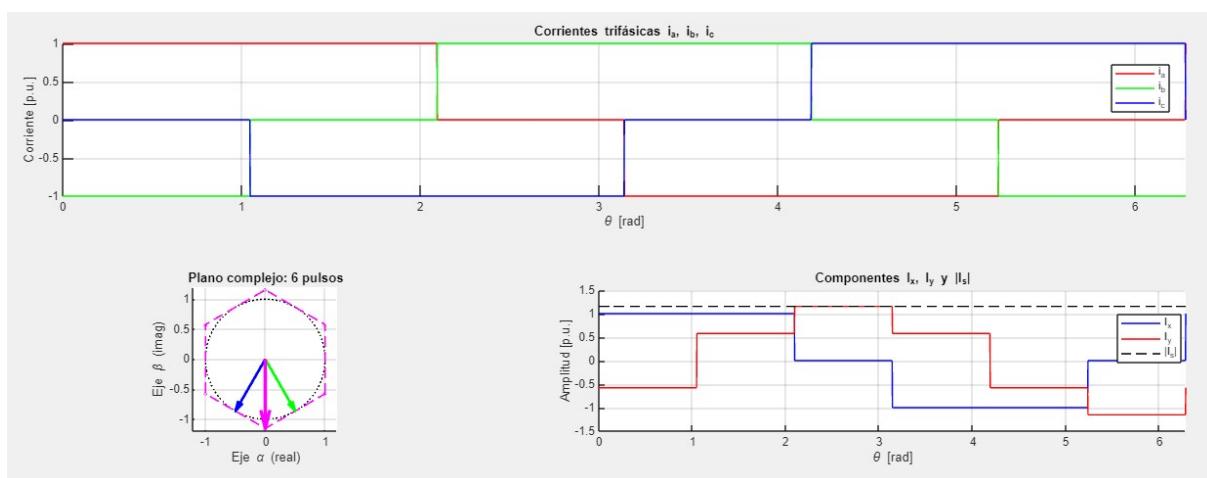


Fig. 6. Rectificador de 6 pulsos

Las corrientes exhiben únicamente **tres niveles discretos**: $+Idc$, 0 , $-Idc$, conformando ondas cuadradas con ciclo de trabajo del 66,7%, conducción durante 240° de cada ciclo completo. El diagrama del plano α - β muestra una característica geométrica notable: el vector espacial traza un **hexágono regular perfecto** inscrito en la circunferencia de referencia. Esta forma hexagonal es la característica de operación en modo de seis pasos donde los vectores de estado del convertidor conmutan entre seis posiciones discretas separadas exactamente 60° .

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado e implementado exitosamente una herramienta de simulación interactiva en MATLAB R2024a, demostrando ser una plataforma robusta para la visualización y el análisis cualitativo del (CMR). Se validó la correcta implementación de la transformación de Clarke y de los modelos de simulación para escenarios operativos clave.
- La investigación confirma que la aplicación genera firmas morfológicas distintivas y coherentes con la teoría vectorial para cada condición simulada. Los resultados visuales obtenidos, el círculo perfecto para el sistema balanceado (Caso 1), la deformación elíptica proporcional al desbalance (Casos 2, 3 y 4), la morfología estrellada por superposición de armónicos (Caso 5) y el hexágono regular del rectificador (Caso 6), validan la capacidad de la herramienta para el diagnóstico cualitativo.
- El principal aporte de este trabajo radica en su alto valor pedagógico, tal como se reconoció en la literatura. La herramienta facilita la comprensión intuitiva de conceptos abstractos al permitir la correlación visual directa entre los parámetros de distorsión y la deformación geométrica del CMR.
- Específicamente, la aplicación es útil como un recurso educativo eficiente para: la interpretación visual del desbalance como elipticidad, el análisis del efecto de los armónicos sobre la forma del CMR, la comprensión de las secuencias contrarrotantes, y la experimentación sin riesgo con condiciones de falla.

REFERENCIAS

- [1] Ji, J., et al. "Three-phase electric power driven electroluminescent devices". Nature Communications. 2021, vol. 12, n. 54. ISSN 2041-1723. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-20265-2>
- [2] Zhang, B., y Shu, X. "CPSS Power Electronics Series". Springer, Singapore, 2022, cap. 5. ISBN-10 981-13275-99. Disponible en: <https://www.springerprofessional.de/en/sinusoidal-steady-state-analysis-of-fractional-order-circuits/19574856>
- [3] De Souza, D., et al. "A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020". Energies. 2022, vol. 15, n. 6. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2002>
- [4] Gaiceanu, M., et al. "Power Quality Improvement with Three-Phase Shunt Active Power Filter Prototype Based on Harmonic Component Separation Method with Low-Pass Filter". Energies. 2025, vol. 18, n. 3. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/3/556>
- [5] Michalec, L., et al. "Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network—Review and Case Study". Energies. 2021, vol. 14, n. 12. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3665>
- [6] Nor, K., y Abdullah, N. "Power Quality Improvement of Three-Phase Electrical Systems Using Active-Passive Hybrid Harmonic Filter". Results in Engineering. 2024, vol. 22. ISSN 2590-1230. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/3/556>
- [7] Haziq, M., et al. "Harmonics Assessment of Distribution Transformer with Photovoltaic Integration and Unbalanced Loads". ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering. 2024, vol. 23, n. 1. ISSN 0128-4428. Disponible en: <https://doi.org/10.11113/elektrika.v23n1.504>
- [8] Golestan, S., et al. "Harmonic Linearization and Investigation of Three-Phase Parallel-Structured Signal Decomposition

- Algorithms in Grid-Connected Applications". IEEE Transactions on Power Electronics. 2021, vol. 36. ISSN 1941-0107. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9186610>
- [9] Bellan, D. "Space vector transients of three-phase transformers". International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2020, vol. 14. ISSN 1998-4464. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9402651>
- [10] Bellan, D. "Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits". Energies. 2020, vol. 13, n. 19. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/19/5231>
- [11] Castello, P., et al. "Space Vector Taylor–Fourier Models for Synchrophasor, Frequency, and ROCOF Measurements in Three-Phase Systems". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019, vol. 68. ISSN 0018- 9456. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2905747>
- [12] Ferrero, R., et al. "Proposals and Analysis of Space Vector-Based Phase-Locked-Loop Techniques for Synchrophasor, Frequency, and ROCOF Measurements". EEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020, vol. 69. ISSN 0018- 9456. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tim.2020.2973873>
- [13] Gyftakis, K., et al. "Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number". Mechanical Systems and Signal Processing. 2017, vol. 93. ISSN 0888-1216. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.046>
- [14] Panagiotou, P., et al. "FEM approach for diagnosis of induction machines' non-adjacent broken rotor bars by short-time Fourier transform spectrogram". The Journal of Engineering., 2019, vol. 2019, n. 17. ISSN 2051-3305. Disponible en: <https://digital-library.theiet.org/doi/full/10.1049/joe.2018.8240>
- [15] Iglesias, M., et al. "Rotor Fault Detection in Induction Motors Based on Time-Frequency Analysis Using the Bispectrum and the Autocovariance of Stray Flux Signals". Energies. 2019, vol. 12, n. 4. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/597>
- [16] Panagiotou, P., et al. "On the broken rotor bar diagnosis using time–frequency analysis: 'Is one spectral representation enough for the characterisation of monitored signals?' ". IET Electric Power Applications. 2019, vol. 13, n. 7. ISSN 1751-8679. Disponible en: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-epa.2018.5512>
- [17] Osornio, R., et al. "Recent Industrial Applications of Infrared Thermography: A Review". IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019, vol. 15. ISSN 1551-3203. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tnii.2018.2884738>
- [18] Ferrero, R., et al. "ynchrophasor Estimation for Three-Phase Systems Based on Taylor Extended Kalman Filtering," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, 2020. ISSN 0018- 9456. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tim.2020.2983622>
- [19] McCormick, G., et al. "Thermal Impacts of Voltage Unbalance on Three-Phase Induction Motors". IEEE Texas Power and Energy Conference. Texas, Estados Unidos, 2025, p. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tpc63981.2025.10907112>
- [20] Bait, M., et al. "An Active Learning Computer-Based Teaching Tool for Enhancing Students' Learning and Visualization Skills in Electromagnetics". International Journal of Electronics and Telecommunications. 2023, vol. 69, n. 1. ISSN 2300-1933. Disponible en: <https://ijet.pl/index.php/ijet/article/view/10.24425-ijet.2023.144331>
- [21] Espinosa, H., y Sevgi, L. "Interactive Computational Tools for Electromagnetics Education Enhancement". 1st Edition. CRC Press, Unidos, 2021, p. 77-101. ISBN 9780-3677-1057-6. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/351411813_Interactive_Computational_Tools_for_Electromagnetics_Education_Enhancement
- [22] Abbasian, M. "Enhancing understanding of the rotating magnetic field in electric machines through active learning and visualization". Engineering Reports. 2024, vol. 6. ISSN 2577-8196. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/eng2.12976>
- [23] Xu, J., et al. "Fractional-Order Modeling and Analysis of a Three-Phase Voltage Source PWM Rectifier". IEEE Access. 2020, vol. 8. ISSN 1941-0115. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2965317>
- [24] Fu, S., et al. "Harmonic analysis of three-phase fully controlled bridge rectifier circuit based on MATLAB". International Conference on Energy Technology and Electrical Power. Wenzhou, China, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1117/12.3064895>
- [25] Zou, Y., et al. "Generalized Clarke Transformation and Enhanced Dual-Loop Control Scheme for Three-Phase PWM Converters Under the Unbalanced Utility Grid". IEEE Access. 2022, vol. 37, n. 8. ISSN 1941-0115. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tpel.2022.3153476>
- [26] Zin, A., et al. "New algorithm for detection and fault classification on parallel transmission line using DWT and BPNN based on Clarke's transformation". Neurocomputing. 2021, vol. 168. ISSN 0925-2312. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.026>
- [27] Saribulut, L., y Ameen, A. "Voltage Sag Detection and Compensation Signal Extraction for Power Quality Mitigation Devices". Energies, 2023, vol. 16, n. 16. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/16/5999>
- [28] Liboni, L., y Oliveira, M. "Optimal Kalman Estimation of Symmetrical Sequence Components". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020, vol. 69. ISSN 0018- 9456. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tim.2020.2995231>
- [29] Dragoun, J. y Talla, J. "Real-time Algorithm for the Transformation of Multiple Harmonic Unbalanced Voltages into Symmetrical

- Components". 20th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, Pilsen, República Checa, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/me54704.2022.9983301>
- [30] Džafić, I. "Parallel Perturbed Gauss-Newton State Estimator Based on Fortescue Transformation for Unbalanced Power Systems". Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2022, vol. 10, n. 6. ISSN 2196-5420. Disponible en: <https://doi.org/10.35833/mpce.2022.000342>
- [31] Bellan, D. "Three-Phase Distortion Analysis based on Space-Vector Locus Diagrams". Wseas transactions on power systems. 2023, vol. 18. ISSN 2224-350X. Disponible en: <https://doi.org/10.37394/232016.2023.18.46>
- [32] Neves, F., et al. "A Space-Vector Discrete Fourier Transform for Unbalanced and Distorted Three-Phase Signals". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010, vol. 57, n. 8. ISSN 0278-0046. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tie.2009.2036646>
- [33] Liu, Y., et al. "Optimized Torque Ripple Suppression Method for Standalone Brushless Doubly Fed Induction Generator With Special Loads". IEEE Transactions on Power Electronics. 2022, vol. 37. ISSN 1941-0107. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tpel.2022.3165117>
- [34] Panuganti, K., et al. "Investigation of Dominant Lower Order Harmonics Elimination using Space Vector Pulse Width Modulation". 11th National Power Electronics Conference (NPEC). Guwahati, India, 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/npec57805.2023.10384959>
- [35] Nair, S., et al. "Modulating and Carrier-Based Dodecagonal Space Vector Pulse Width Modulation Technique With Fifth and Seventh Order Harmonic Elimination for Split-Phase OEIM". IEEE Transactions on Power Electronics. 2025, vol. 40. ISSN 1941-0107. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/tpel.2024.3467330>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Maykop Pérez Martínez: <https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Josnier Ramos Guardarrama: <https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Luis René Brizuela Bringuez: <https://orcid.org/0009-0008-8852-1017>

Participó en el diseño de la investigación, la redacción y corrección del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Alexander Fernández Correa: <https://orcid.org/0009-0009-0291-5566>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.