

# Design of a Source for the Selective Generation of Harmonics

Henry Alfonso Sepulveda Pacagui<sup>1</sup>; Edison Andrés Caicedo Peñaranda<sup>2</sup>; Jorge Luis Díaz Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, [henry.sepulveda@unipamplona.edu.co](mailto:henry.sepulveda@unipamplona.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, [edison.caicedo@unipamplona.edu.co](mailto:edison.caicedo@unipamplona.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, [jdiazcu@unipamplona.edu.co](mailto:jdiazcu@unipamplona.edu.co), [jdiazcu@gmail.com](mailto:jdiazcu@gmail.com)

*Abstract– The study of power quality phenomena is essential in the current energy landscape, due to the increasing integration of equipment and systems with diverse technologies into the national interconnected grid. These devices, not being subject to strict regulations regarding harmonic content at the point of installation, can generate significant waveform disturbances. This paper presents the design of a source for the selective generation of harmonics, aimed at deepening the analysis of one of the main phenomena affecting power quality in electrical systems. As a first step, the pertinent equations were developed through frequency-domain analysis using Fourier theory. A general equation was obtained as a function of harmonics, switching angles, and voltage levels, taking as a reference the topology of an 81-level asymmetric multilevel converter. With these equations, it is possible to determine the switching angles necessary for the controlled generation of the desired harmonic over the fundamental waveform.*

*Keywords– Selective Generation of Harmonics, Multilevel Converters, Power Quality, Total Harmonic Distortion (THD), Optimization*

# Diseño de una Fuente para la Generación Selectiva de Armónicos

Henry Alfonso Sepulveda Pacagui<sup>1</sup>; Edison Andrés Caicedo Peñaranda<sup>2</sup>; Jorge Luis Díaz Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, [henry.sepulveda@unipamplona.edu.co](mailto:henry.sepulveda@unipamplona.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, [edison.caicedo@unipamplona.edu.co](mailto:edison.caicedo@unipamplona.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, [jdiazcu@unipamplona.edu.co](mailto:jdiazcu@unipamplona.edu.co), [jdiazcu@gmail.com](mailto:jdiazcu@gmail.com)

**Resumen**– *El estudio de los fenómenos de calidad de la energía es fundamental en el contexto energético actual, debido a la creciente incorporación de sistemas con diversas tecnologías en el sistema interconectado nacional, muchos de los cuales no están sujetos a regulaciones estrictas sobre el contenido armónico que inyectan en el punto de conexión. El trabajo presenta el diseño de una fuente para la generación selectiva de armónicos, orientada a profundizar en el análisis de uno de los principales fenómenos que afectan la calidad de la energía en los sistemas eléctricos. Como primer paso, se desarrollaron las ecuaciones fundamentales mediante el análisis en el dominio de la frecuencia, empleando la teoría de Fourier. Se obtuvo una expresión general que relaciona los armónicos, los ángulos de conmutación y los niveles de voltaje, basada en la topología de un convertidor multinivel asimétrico de 81 niveles. Estas ecuaciones permiten determinar los ángulos de disparo necesarios para la generación controlada del armónico deseado sobre la onda fundamental.*

**Palabras clave**-- *Generación Selectiva de Armónicos, Convertidores Multinivel, Calidad de la Energía, Total de Distorsión Armónica (THD), Optimización*

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo enfrenta una crisis energética [1] debido al uso indiscriminado de recursos naturales no renovables [2], como el carbón y el petróleo para satisfacer la creciente demanda energética, impulsada por el crecimiento poblacional y económico [3]. Una solución viable es la introducción y difusión de tecnologías alternativas en el modelo actual de distribución eléctrica [4], [22].

El sistema energético global está en transformación con la incorporación de nuevas fuentes de generación en todos los niveles, destacándose la etapa de distribución, que conecta aproximadamente el 66% de las cargas del sistema y ha sido denominada por algunos autores como "el gigante invisible" [5]. En este contexto, la interacción entre los elementos del sistema interconectado puede provocar la aparición de armónicos o un elevado contenido de distorsión armónica total en el voltaje [6], [7].

La cuantificación de pérdidas por armónicos es compleja, ya que los distintos elementos del sistema responden de manera variable, generando importantes pérdidas económicas. Se estima que estos armónicos provocan un 5% de pérdidas para el usuario final, mientras que las pérdidas para los operadores de red aumentan entre 0,15 y 0,20% del total [8].

Los estudios sobre calidad de la energía [9], han crecido notablemente, al igual que las investigaciones centradas en los armónicos, enfocándose en su detección y clasificación [10]. Se han utilizado técnicas computacionales tanto tradicionales como avanzadas, cuya eficacia depende en gran medida de la calidad de los datos, a menudo limitada por la escasez de eventos reales en sistemas afectados [10]. En este sentido, se han desarrollado softwares de código abierto para generar fenómenos de calidad, los cuales sirven para validar desarrollos destinados a mitigar estos eventos [11].

Para evaluar las soluciones en condiciones reales, se han implementado emuladores de red basados en inversores, capaces de reproducir desequilibrios, depresiones, elevaciones e interrupciones en rectificadores [12]. Además, se han diseñado generadores de formas de onda con interfaces gráficas que permiten configurar caídas de tensión, facilitando las pruebas de inmunidad de equipos [13].

Con el objetivo de emular condiciones específicas de los fenómenos de calidad, se han desarrollado dispositivos que generan caídas, aumentos de tensión y armónicos de forma controlada [7], [14]. Ante las limitaciones de los equipos industriales, se han creado sistemas integrados software-hardware que, combinando FPGA y Matlab, sintetizan perturbaciones eléctricas, incluyendo armónicos [15]. En lo que respecta a la emulación de armónicos, se ha propuesto un controlador distribuido que simula fuentes de tensión armónicas e impedancia virtual para reducir la distorsión [16].

Se han estudiado metodologías para el cálculo analítico del valor eficaz y la distorsión armónica total en convertidores multinivel, mediante análisis de Fourier y ángulos de conmutación [17], y se implementó un algoritmo multiobjetivo de optimización en un convertidor de 17 niveles con modulación PWM multinivel, logrando formas de onda casi sinusoidales [18].

Aunque numerosos estudios han abordado la generación de fenómenos de calidad, incluyendo la inyección de armónicos mediante convertidores de potencia [7–17], la mayoría produce perturbaciones conjuntas, sin aislar un único armónico. Esta limitación impide evaluar de forma precisa el impacto individual de cada armónico y la efectividad de estrategias de mitigación.

Este trabajo aborda la generación selectiva de armónicos, tomando como base el enfoque desarrollado en [17, 18, 19], en el cual, mediante la teoría de Fourier, se logra eliminar

completamente el contenido armónico. En contraste, el objetivo del presente trabajo es obtener una onda distorsionada que presente únicamente la onda fundamental y el armónico que se desea adicionar, sin la presencia de los demás armónicos, contabilizados hasta el 50 según el estándar IEEE 519 (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).

## II. METODOLOGÍA

### A. Convertidor Multinivel

Partiendo de un inversor multinivel en cascada tipo puente h fuente común asimétrico de 81 niveles de tensión [20], de cuatro etapas ver Fig. 1.

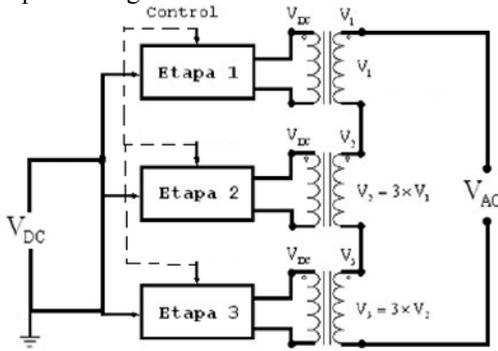


Fig. 1 Topología del convertidor

Basándose en la forma de onda que el convertidor puede entregar a la salida, es posible reconstruirla mediante la conmutación de los semiconductores de potencia. Para obtener un nivel de voltaje determinado, dichos semiconductores deben accionarse en tiempos específicos, asignando a cada nivel un ángulo de conmutación. Dado que se trata de una onda sinusoidal periódica con simetría de cuarto de onda, basta con analizar el primer cuarto, lo que corresponde a 40 ángulos de conmutación [18] la Fig. 2 muestra un ejemplo.

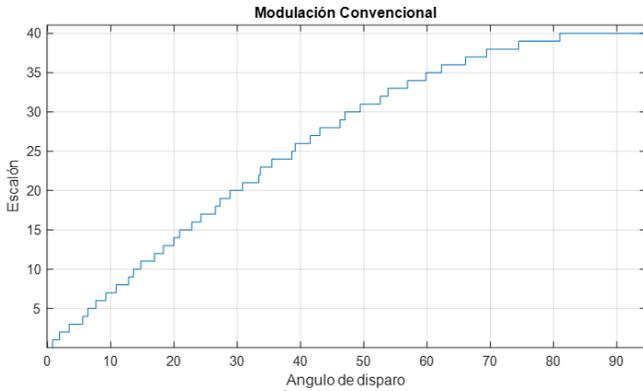


Fig. 2 Perfil Escalonado de los Ángulos de Disparo para la Generación de 40 Niveles

### B. Modulación: conmutación única por nivel

La serie de Fourier para formas de onda periódicas se presenta en la Ecuación (1) [17]. La cual se va a desarrollar por cada nivel en términos de un ángulo único en el primer cuarto de onda. donde  $n$  es el número armónico,  $\omega t$  es la frecuencia fundamental de la forma de onda,  $t$  es el tiempo y  $a_0$  es el valor DC o el componente constante, como lo muestra la Ecuación (1) [17].

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{hmax} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)). \quad (1)$$

En este caso  $a_0 = 0$  ya que la onda se construye de forma simétrica respecto, y al partir de una onda impar la componente  $a_n$ . Por lo tanto, la serie de Fourier solo estará en términos del coeficiente  $b_n$  Ecuación (2) [17].

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_0(\theta) \sin(\theta) d(\theta), \quad (2)$$

Al desarrollar la ecuación de forma generalizada [17], el coeficiente  $b_n$  en términos de los ángulos de conmutación queda de la siguiente manera Ecuación (3), donde  $V_{dc}$  representa la magnitud de un nivel,  $k$  el número de niveles y  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha(k-1)/2$  los ángulos correspondientes a cada nivel e  $i$  el índice que representa el ángulo por nivel [17]

$$b_n = \frac{4v_{dc}}{\pi n} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \dots + \cos(n\alpha_{\frac{k-1}{2}})] = \frac{4v_{dc}}{\pi n} \sum_{i=1}^{\frac{k-1}{2}} \cos(n\alpha_i) \quad (3)$$

Y en forma de la serie de Fourier para las señales periódicas queda, para los todos los armónicos desde  $n = 1$  hasta  $hmax = 50$  Ecuación (4).

$$v(t) = \sum_{n=1}^{hmax} \left[ \frac{4v_{dc}}{\pi n} \sum_{i=1}^{\frac{k-1}{2}} \cos(n\alpha_i) \right] \sin(n\omega t). \quad (4)$$

Al desarrollar la ecuación para representar la salida del inversor del primer cuarto de onda Ecuación (5), el cual tiene 40 niveles, para los 50 primeros armónicos sin incluir los pares [17, 18, 19]

$$\begin{aligned} v(t) &= b_1 \sin(1\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots + b_{47} \sin(47\omega t) + b_{49} \sin(49\omega t) \\ b_1 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 1} [\cos(1\alpha_1) + \cos(1\alpha_2) + \dots + \cos(1\alpha_{39}) + \cos(1\alpha_{40})].. \\ b_3 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 3} [\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \dots + \cos(3\alpha_{39}) + \cos(3\alpha_{40})].. \\ &\dots \\ b_{47} &= \frac{4v_{dc}}{\pi 47} [\cos(47\alpha_1) + \cos(47\alpha_2) + \dots + \cos(47\alpha_{39}) + \cos(47\alpha_{40})].. \\ b_{49} &= \frac{4v_{dc}}{\pi 49} [\cos(49\alpha_1) + \cos(49\alpha_2) + \dots + \cos(49\alpha_{39}) + \cos(49\alpha_{40})] \end{aligned} \quad (5)$$

Donde se obtiene 25 ecuaciones con 40 incógnitas las cuales son los ángulos, ya que solo se centra en analizar las magnitudes de los coeficientes  $bn$ .

A partir de estas ecuaciones, partiendo del hecho que el armónico fundamental se encuentra al 100% se le asigna el valor deseado al coeficiente  $bn$  como valor porcentual del fundamental y dejando las demás en 0

### C. Modulación: conmutación múltiple por nivel

Para poder reproducir armónicos de más alto orden es necesario hacer múltiples conmutaciones en cada nivel [17], como se puede apreciar en la Fig. 3.

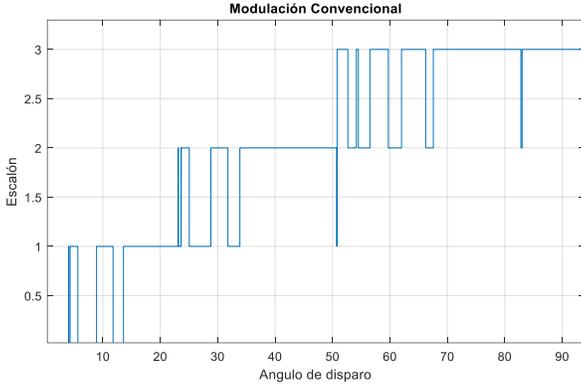


Fig. 3 Múltiples conmutaciones por nivel

Estas conmutaciones por nivel se representan mediante un vector de coeficientes  $bn$ , definidos en función de los ángulos de conmutación correspondientes a cada nivel, lo que permite obtener la conmutación múltiple. De forma generalizada, la serie de Fourier se puede expresar en la Ecuación (6): [17].

$$v(t) = \sum_{n=1}^{h \max} \frac{4v_{dc}}{\pi n} \left[ \sum_{i=1}^{\frac{k-1}{2}} \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos(n\alpha_{i,j}) \right] \sin(n\omega t). \quad (6)$$

Al desarrollar la ecuación para representar la salida del inversor del primer cuarto de onda Ecuación (7), el cual tiene 40 niveles, para los 50 primeros armónicos sin incluir los pares incluyendo las múltiples conmutaciones por nivel [17].

$$\begin{aligned} v(t) &= b_1 \sin(1\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots + b_{47} \sin(47\omega t) + b_{49} \sin(49\omega t) \\ b_1 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 1} [\cos(1\alpha_{1,1}) + \cos(1\alpha_{1,2}) + \dots + \cos(1\alpha_{40,1}) + \cos(1\alpha_{40,2})].. \\ b_3 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 3} [\cos(3\alpha_{1,1}) + \cos(3\alpha_{1,2}) + \dots + \cos(3\alpha_{40,1}) + \cos(3\alpha_{40,2})].. \\ &\dots \\ b_{47} &= \frac{4v_{dc}}{\pi 47} [\cos(47\alpha_{1,1}) + \cos(47\alpha_{1,2}) + \dots + \cos(47\alpha_{40,1}) + \cos(47\alpha_{40,2})].. \\ b_{49} &= \frac{4v_{dc}}{\pi 49} [\cos(49\alpha_{1,1}) + \cos(49\alpha_{1,2}) + \dots + \cos(49\alpha_{40,1}) + \cos(49\alpha_{40,2})] \end{aligned} \quad (7)$$

### D. Función objetivo

Para realizar la generación selectiva de armónicos se parte de las ecuaciones donde lo que se busca es reducir todas las ecuaciones a 0 donde los términos  $b1, b2, b3, \dots, bn$  contienen el valor del armónico el cual se desea generar incluyendo el valor del fundamental Ecuación (8) [17].

$$\begin{aligned} v(t) &= b_1 \sin(1\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots + b_{47} \sin(47\omega t) + b_{49} \sin(49\omega t) \\ 0 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 1} [\cos(1\alpha_{1,1}) + \dots + \cos(1\alpha_{40,j})] - b_1 \\ 0 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 3} [\cos(3\alpha_{1,1}) + \dots + \cos(3\alpha_{40,j})] - b_3 \\ &\dots \\ 0 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 47} [\cos(47\alpha_{1,1}) + \dots + \cos(47\alpha_{40,j})] - b_{47} \\ 0 &= \frac{4v_{dc}}{\pi 49} [\cos(49\alpha_{1,1}) + \dots + \cos(49\alpha_{40,j})] - b_{49} \end{aligned} \quad (8)$$

El resultado resulta del cálculo del error cuadrático medio (RMSE) se obtiene a partir de la siguiente Ecuación (9), la cual sería la función objetivo, para realizar la optimización usando algoritmos genéticos [19, 18].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{h \max} \sum_{n=1}^{h \max} \left[ \left( \frac{4v_{dc}}{\pi n} \left[ \sum_{i=1}^{\frac{k-1}{2}} \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos(n\alpha_{i,j}) \right] - b_n \right)^2 \right]} \quad (9)$$

## III. RESULTADOS

### A. Algoritmo de optimización

El algoritmo propuesto se muestra en la Fig. 4, donde se toma como base un algoritmo genético (**ga**) desarrollado en Matlab®, el cual es un método de optimización que busca soluciones a un problema creando una población inicial de posibles respuestas y luego, mediante procesos de selección, cruce y mutación, evoluciona esa población para encontrar la solución óptima o cercana a ella [19].

En este algoritmo como datos de entrada se ingresa el armónico máximo al cual se realizan los cálculos “*hmax*”, el número de niveles “*k*”, el armónico el cual se desea generar en conjunto con el fundamental “*bn*” y magnitud de este. En conjunto con la cantidad de conmutaciones por nivel.

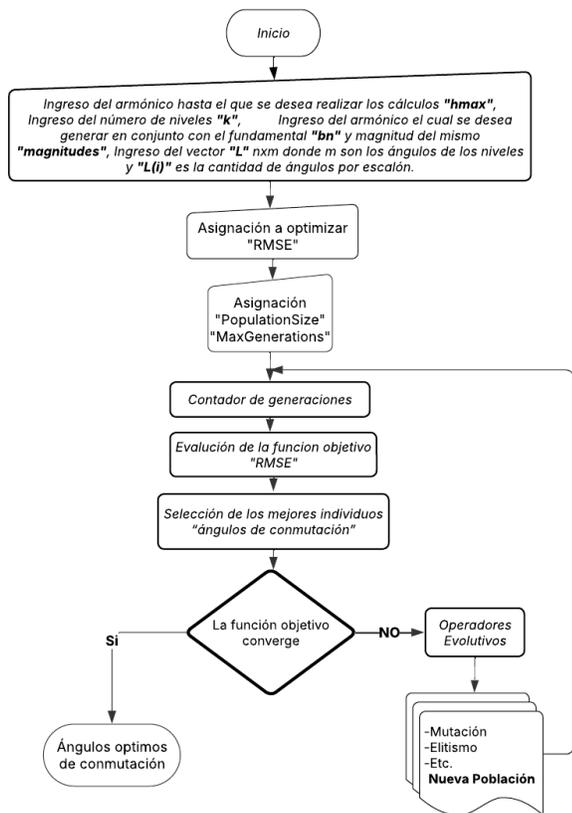


Fig. 4 Algoritmo genético minimización de error.

Con este algoritmo se obtiene los ángulos de conmutación que generara la onda fundamental junto con el armónico que se desea generar minimizando al máximo los restantes armónicos.

### B. Resultados del algoritmo de optimización

A continuación Fig. 5, se presenta una onda de 40 niveles de tensión, en la cual se ha generado el tercer armónico con un 10% de amplitud respecto de la fundamental, utilizando una conmutación por nivel. En la Fig. 5 se muestra la forma de onda obtenida, en la cual se han optimizado los ángulos en cada nivel, resultando en una onda que no es completamente sinusoidal.

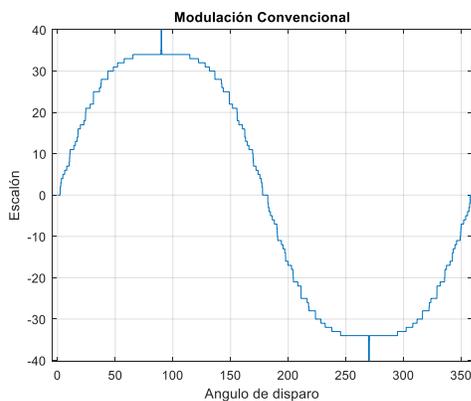


Fig. 5 Forma Onda: Fundamental + Tercer Armónico 10%

En la Fig. 6 se muestra el espectro armónico, lo que, valida el correcto desarrollo metodológico del presente trabajo, ya que el tercer armónico se presenta con una magnitud del 10% respecto a la fundamental, resultando en un THDv de 10.06%.

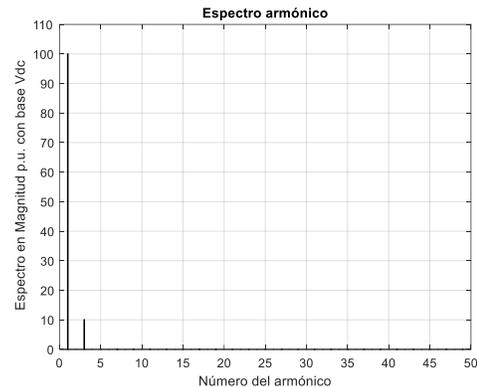


Fig. 6 Espectro armónico: Fundamental + Tercer Armónico 10%

En la Fig. 7 se muestran los resultados para el armónico 3 con un 20% de amplitud respecto al fundamental, con una conmutación por nivel.

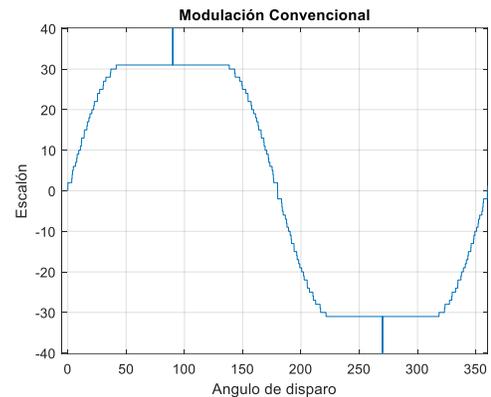


Fig. 7 Forma Onda: Fundamental + Tercer Armónico 20%

En la fig se muestra el espectro armónico validando el correcto funcionamiento ya que el tercer armónico se presenta con una magnitud del 18.9% respecto del fundamental, con un THDv: 18.93%.

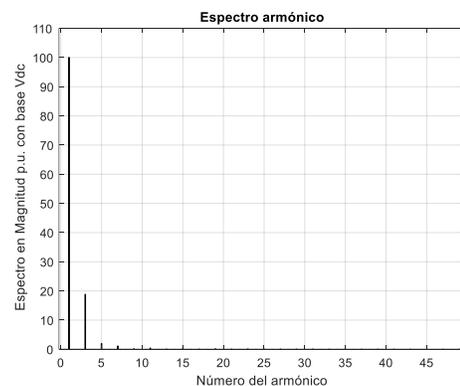


Fig. 8 Espectro armónico: Fundamental + Tercer Armónico 20%

En la Fig. 9, se muestran unos resultados para el armónico 5 con un 10% de amplitud respecto al fundamental, con una conmutación por nivel.

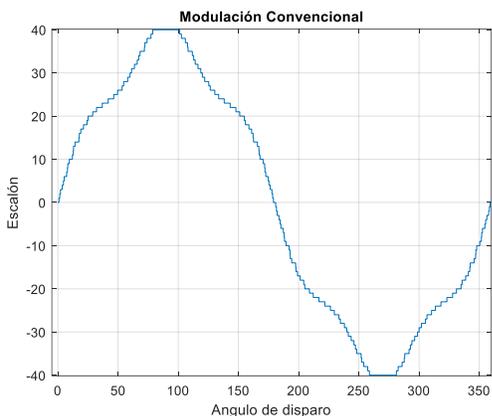


Fig. 9 Forma Onda: Fundamental + Quinto Armónico 10%

En la Fig. 10 se muestra el espectro armónico validando el correcto funcionamiento ya que el quinto armónico se presenta con una magnitud del 10% respecto del fundamental, con un THDv: 9.53%.

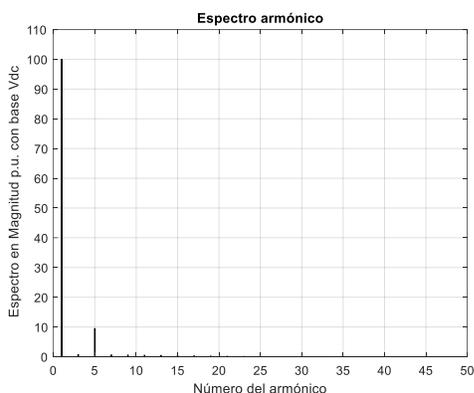


Fig. 10 Espectro armónico: Fundamental + Quinto Armónico 10%

En la Fig. 11 se muestran unos resultados para el armónico 5 con un 15% de amplitud respecto al fundamental, con una con tres conmutaciones por nivel.

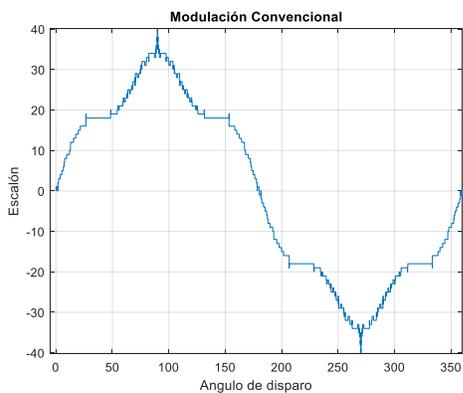


Fig. 11 Forma Onda: Fundamental + Quinto Armónico 15%

En la Fig. 12 se muestra el espectro armónico validando el correcto funcionamiento ya que el quinto armónico se presenta con una magnitud del 15.12% respecto del fundamental, con un THDv: 15.14%

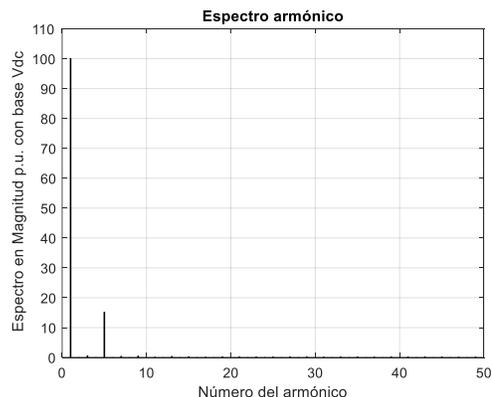


Fig. 12 Espectro armónico: Fundamental + Quinto Armónico 15%

En la Fig. 13 se muestran unos resultados para el armónico 7 con un 10% de amplitud respecto al fundamental, con una con tres conmutaciones por nivel.

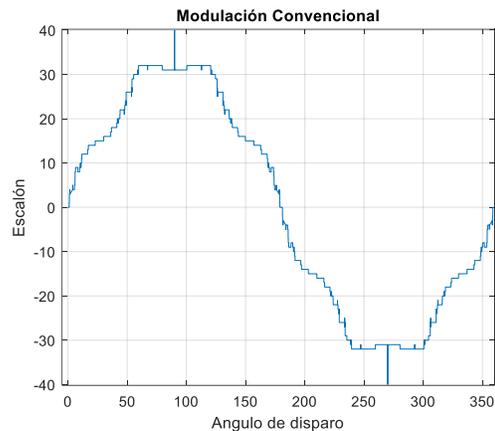


Fig. 13 Forma Onda: Fundamental + Séptimo Armónico 10%

En la Fig. 14 se muestra el espectro armónico validando el correcto funcionamiento ya que el séptimo armónico se presenta con una magnitud del 8.7% respecto del fundamental, con un THDv: 8.97%

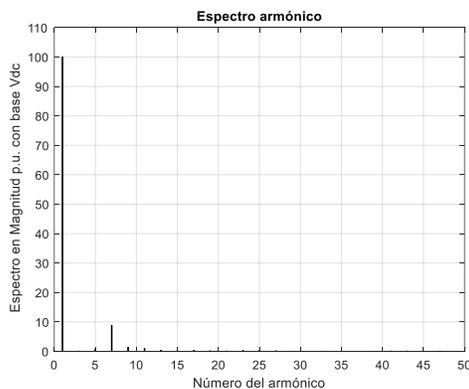


Fig. 14 Espectro armónico: Fundamental + Séptimo Armónico 10%

#### IV. DISCUSIÓN

##### A. Contexto de la calidad de la energía y necesidad de nuevas herramientas de validación.

El actual proceso de transición energética, caracterizado por la incorporación de nuevas tecnologías de generación distribuida y el aumento de cargas electrónicas no lineales, ha elevado la importancia de garantizar altos estándares de calidad en el suministro eléctrico [1]. En este escenario, los fenómenos de calidad de la energía, particularmente los relacionados con distorsión armónica, representan un desafío crítico tanto para la operación segura de los sistemas eléctricos como para la vida útil de los equipos conectados [2], [21]. Sin embargo, el estudio detallado de estos fenómenos enfrenta limitaciones por la falta de herramientas accesibles capaces de reproducir condiciones controladas de distorsión en entornos de prueba [5].

##### B. Valor de la generación selectiva de armónicos como plataforma experimental.

La fuente para la generación selectiva de armónicos propuesta en este trabajo ofrece una solución concreta a esta necesidad, al permitir emular de forma precisa la presencia de componentes armónicos específicos, aislados de otras perturbaciones. A partir de los resultados obtenidos, donde se controló de manera efectiva la magnitud de los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden, se valida el potencial de esta plataforma como herramienta de laboratorio para el estudio sistemático de los efectos individuales de los armónicos en distintos tipos de equipos y sistemas eléctricos.

##### C. Aplicaciones prácticas y proyección de impacto.

Este desarrollo encuentra aplicaciones directas en áreas como la validación de dispositivos acondicionadores de potencia, la prueba de normas de compatibilidad electromagnética (CEM) [13], y la formación de profesionales en programas de ingeniería eléctrica y energética. Además, su implementación en laboratorios académicos o de certificación contribuiría a optimizar costos de prueba, elevados debido a la necesidad de fuentes trifásicas programables comerciales, con precios considerablemente altos debido a su arquitectura basada en inversores de alta precisión, sistemas de tiempo real y requisitos de certificación de compatibilidad electromagnética. A pesar de su precisión, estos equipos suelen ser poco flexibles, siendo diseñados para simular secuencias específicas de fenómenos pre-programados, limitando su capacidad de adaptación a nuevas configuraciones armónicas o generación de componentes individuales de manera selectiva. En contraste, el enfoque basado en convertidores multinivel y optimización de ángulos de conmutación, ofrecen una alternativa modular y adaptable, que puede escalar hacia versiones más robustas y versátiles, facilitando su inserción en entornos de prueba orientados a redes inteligentes (*smart grids*), microrredes y generación distribuida.

##### D. Consideraciones para su implementación y futuras mejoras.

Aunque el sistema actual demanda conocimientos específicos en electrónica de potencia y procesamiento de señales para su operación, su arquitectura modular y basada en convertidores multinivel permite su futura evolución hacia interfaces gráficas de configuración automática, ampliando así su accesibilidad a usuarios no expertos. Asimismo, el enfoque metodológico desarrollado puede extenderse para incluir la generación de otros fenómenos de calidad de energía como caídas, elevaciones de tensión e interrupciones, fortaleciendo su utilidad como banco de pruebas integral para investigación y desarrollo en calidad de la energía.

#### V. CONCLUSIONES

El presente trabajo logró el diseño de una fuente experimental para la generación selectiva de armónicos, basada en convertidores multinivel asimétricos y técnicas de optimización de ángulos de disparo mediante algoritmos genéticos. A través del análisis frecuencial de Fourier, se obtuvo una formulación general que permitió controlar de forma precisa la magnitud de armónicos específicos sobre la onda fundamental, alcanzando niveles de distorsión armónica (THD<sub>v</sub>) dentro de los márgenes propuestos.

Los resultados experimentales demostraron la capacidad del sistema para generar de manera selectiva armónicos de tercer, quinto y séptimo orden, con amplitudes controladas de hasta un 20% respecto de la fundamental, manteniendo un bajo nivel de error respecto al valor objetivo. Este desempeño valida la eficacia de la metodología planteada, y sienta las bases para su utilización como plataforma de investigación en calidad de energía.

A diferencia de los sistemas comerciales disponibles, que presentan altos costos y limitaciones operativas debido a configuraciones pre-programadas, el desarrollo propuesto ofrece una solución modular, adaptable y de menor costo, adecuada para laboratorios académicos, centros de investigación y certificación, y entornos de formación técnica en calidad de la energía eléctrica.

El sistema diseñado no solo permite emular condiciones específicas de distorsión armónica, sino que también tiene el potencial de evolucionar hacia la generación de otros fenómenos de calidad de la energía, como caídas de tensión, elevaciones e interrupciones, contribuyendo a fortalecer el estudio, diagnóstico y mitigación de problemas en redes eléctricas modernas.

Finalmente, este trabajo representa un avance hacia la democratización de las herramientas de prueba y validación de calidad de energía, y abre nuevas líneas de investigación orientadas al desarrollo de plataformas de ensayo accesibles, programables y orientadas a las necesidades emergentes de las redes inteligentes y sistemas de generación distribuida.

## REFERENCIAS

- [1] O. L. de Energía (OLADE), *América Latina, OLADE Panorama Energético*, 2020.
- [2] U. P. M. E. U, *Ministerio de Minas y Energía*, Obtenido de <https://www1.upme.gov.co>, 2022.
- [3] H. Palma, D. Novoa, y D. Cásseres, "Energía renovables y medidas de eficiencia energética aplicables a las instituciones prestadoras de salud en Colombia", *RCTA*, vol. 1, n.º 41, pp. 123–131, may 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i41.2557.
- [4] D. Galvís, O. Duque y J. Gómez, "Photovoltaic solar energy in Colombia," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, p. 1–14, 2022.
- [5] S. Ramírez Castaño, *Redes de distribución de energía*, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [6] B. Uzum, A. Onen, H. M. Hasanien y S. M. Muyeen, "Rooftop solar pv penetration impacts on distribution network and further growth factors—a comprehensive review," *Electronics*, vol. 10, p. 55, 2020.
- [7] A. Montes, C. Lenis, y C. Ramos, "Laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos y emular microrredes", *RCTA*, vol. 1, n.º 45, pp. 216–224, ene. 2025, doi: 10.24054/rcta.v1i45.3477
- [8] A. Sharma, B. S. Rajpurohit y S. N. Singh, "A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 363–372, 2018.
- [9] J. C. Smith, G. Hensley y L. Ray, "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality," *IEEE std*, p. 1159–1995, 1995.
- [10] A. A. Alkahtani, S. T. Y. Alfalahi, A. A. Athamneh, A. Q. Al-Shetwi, M. B. Mansor, M. A. Hannan y V. G. Agelidis, "Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127104–127122, 2020.
- [11] R. Machlev, A. Chachkes, J. Belikov, Y. Beck y Y. Levron, "Open source dataset generator for power quality disturbances with deep-learning reference classifiers," *Electric Power Systems Research*, vol. 195, p. 107152, 2021.
- [12] K. Upamanyu y G. Narayanan, "Simplified grid emulator for testing grid-connected power electronic converters," de *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, 2020.
- [13] W. Jantee, S. Premrudeepreechacharn, K. Oranpiroj y W. Muangjai, "Voltage sag signal generator program for testing electrical equipment," de *2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2014.
- [14] E. R. Q. Chaves, V. O. Roda y R. L. A. Ribeiro, "Power converters based electrical disturbance generator using repetitive control," de *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015.
- [15] C. G. Torres, R. d. J. R. Troncoso, R. A. O. Rios, L. M. Velázquez y D. G. Lieberman, "Diseño de sistema reconfigurable para la síntesis de perturbaciones eléctricas basado en FPGA," *Pistas Educativas*, vol. 35, 2018.
- [16] A. Das, A. Shukla, A. B. Shyam, S. Anand, J. M. Guerreo y S. R. Sahoo, "A distributed-controlled harmonic virtual impedance loop for AC microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, p. 3949–3961, 2020.
- [17] L. P. Fernandez, E. C. Peñaranda, J. D. Rodríguez y A. P. Garcia, "Mathematical-physical modeling for analytical calculation of multilevel pulse-width modulations," de *Journal of Physics: Conference Series*, 2020.
- [18] L. D. P. Fernandez, E. A. C. Peñaranda y J. L. D. Rodriguez, "A multiobjective genetic algorithm for the optimization of the THD and the RMS output voltage in a multilevel converter with 17 levels of line voltage," p. 1–5, 2019.
- [19] J. L. Diaz Rodriguez, L. D. Pabon Fernandez y E. A. Caicedo Peñaranda, "Multiobjective genetic algorithm to minimize the THD in cascaded multilevel converters with V/F control," p. 456–468, 2017.
- [20] J. Díaz-Rodríguez, L. Pabón-Fernández y A. Pardo-García, "Sistema híbrido de energía utilizando energía solar y red eléctrica," *Lámpsakos (revista descontinuada)*, p. 69–77, 2012.
- [21] J. Thorrens y O. Ardila, "Modelización y simulación de un compensador estático síncrono para sistemas de distribución de energía eléctrica", *RCTA*, vol. 1, n.º 43, pp. 57–63, mar. 2024, doi: 10.24054/rcta.v1i43.2804
- [22] W. Villa, J. Rendón, y M. Lezama, "Evaluación del impacto de la generación distribuida en la red de transmisión", *RCTA*, vol. 3, n.º 2, pp. 72–79, ago. 2020, doi: 10.24054/rcta.v3iEspecial.857