

CÓMPUTO EVOLUTIVO PARA MINIMIZACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN UN INVERSOR MULTINIVEL

*EVOLUTIONARY COMPUTATION FOR MINIMIZATION OF TOTAL
HARMONIC DISTORTION IN MULTILEVEL INVERTER*

Oscar Sánchez Vargas

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
D20ce023@cenidet.tecnm.mx

Ricardo Eliú Lozoya Ponce

Tecnológico Nacional de México / IT de Chihuahua, México
ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx

Jesús Aguayo Alquicira

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
jesus.aa@cenidet.tecnm.mx

Susana Estefany De León Aldaco

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
susana.da@cenidet.tecnm.mx

Recepción: 19/septiembre/2023

Aceptación: 12/junio/2024

Resumen

La mejora del rendimiento de los inversores es crucial en aplicaciones de energía eléctrica, y un desafío importante en este contexto es la reducción de la Distorsión Armónica Total en los inversores. La Distorsión Armónica Total puede causar problemas graves, como sobrecalentamiento de equipos, pérdida de eficiencia y deterioro de la calidad de la energía eléctrica. Por lo tanto, este estudio se centra en la optimización de la reducción de la Distorsión Armónica Total en un Inversor Multinivel en Cascada de siete niveles. Para abordar este desafío, se empleó el algoritmo de Evolución Diferencial. Mediante simulaciones en MATLAB Simulink, se identificaron tres ángulos de conmutación óptimos ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) y se determinó el valor deseado del Índice Modular (M_i). Los resultados revelaron que, sin considerar M_i , la Distorsión Armónica Total se redujo significativamente al 10.46%. Sin embargo, para garantizar que el inversor funcione dentro de los límites de $M_i < 1$,

se logró una THD del 12.98%. Esta diferencia de aproximadamente el 3% en la Distorsión Armónica Total, entre los dos enfoques destaca la importancia de seleccionar adecuadamente los ángulos de conmutación y el M_i para la carga de salida.

Este estudio subraya la eficacia del algoritmo de Evolución Diferencial en la búsqueda de ángulos de conmutación óptimos, lo que mejora el rendimiento del Inversor Multinivel en Cascada en términos de distorsión armónica. Además, resalta la relevancia de considerar tanto la reducción de Distorsión Armónica Total como el valor de M_i al diseñar aplicaciones específicas. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes en la mejora de la calidad de la energía eléctrica y la eficiencia en sistemas de inversores multinivel.

Palabras Clave: Distorsión Armónica Total (THD), Evolución diferencial, Inversor multinivel en cascada, Métodos metaheurísticos.

Abstract

Improving inverter performance is crucial in electric power applications, and a major challenge in this context is the reduction of Total Harmonic Distortion in inverters. Total Harmonic Distortion can cause serious problems, such as overheating equipment, loss of efficiency, and deterioration of power quality. Therefore, this study optimizes Total Harmonic Distortion reduction in a seven-level Cascaded Multilevel Inverter. To address this challenge, the Differential Evolution algorithm was employed. Through simulations in MATLAB Simulink, three optimal switching angles ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) were identified, and the desired value of the Modular Index (M_i) was determined. The results revealed that, without considering M_i , the Total Harmonic Distortion was significantly reduced to 10.46%. However, to ensure that the inverter operates within the limits of $M_i < 1$, a Total Harmonic Distortion of 12.98% was achieved. This approximately 3% difference in Total Harmonic Distortion between the two approaches highlights the importance of properly selecting the switching angles and M_i for the output load.

This study highlights the effectiveness of the Differential Evolution algorithm in finding optimal switching angles, which improves the performance of the Cascaded

Multilevel Inverter in terms of harmonic distortion. Furthermore, it highlights the relevance of considering Total Harmonic Distortion reduction and M_i value when designing specific applications. These findings are important for improving power quality and efficiency in multilevel inverter systems.

Keywords: *Cascaded multilevel inverter, Differential evolution, Metaheuristic methods, Total Harmonic Distortion (THD).*

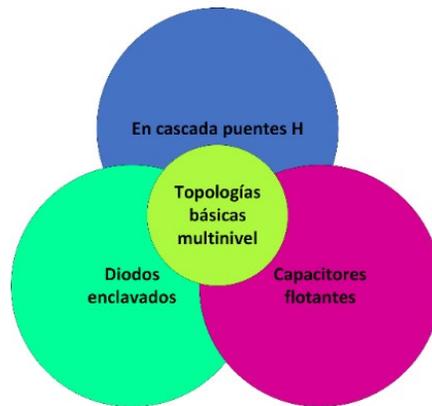
1. Introducción

Los dispositivos denominados Inversores Multinivel (MLI) son dispositivos avanzados que superan a los inversores tradicionales de dos niveles al permitir niveles de salida más altos para las formas de onda de corriente y voltaje. Dependiendo del tipo de fuente de alimentación que utilicen, definen el tipo de inversor ya sea como inversor de fuente de voltaje o inversor de fuente de corriente. Los MLI se utilizan en muchos campos, como accionamientos industriales, aplicaciones de servicios públicos como los Compensadores Estáticos de Voltaje Sincrónico y los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida, y la integración de fuentes de energía renovables en la red eléctrica. Desde su introducción a principios de la década de 1980, las topologías de los dispositivos y los métodos de control han mejorado considerablemente gracias a diversas técnicas [Kabalci, 2021].

Los inversores multinivel sintetizan múltiples niveles de voltaje de corriente directa en una sola señal, lo que les permite generar formas de onda escalonadas que se aproximan a las señales sinusoidales. Con la suma de múltiples fuentes de entrada, la forma de onda de salida resultante mostrará un aumento en el número de niveles presentes, lo que aumenta la potencia nominal del dispositivo y reduce el número de componentes electrónicos en comparación con los modelos convencionales.

El mercado de los MLI ha adquirido recientemente una importancia significativa en diversos sectores y campos industriales que requieren dispositivos de alta potencia y alto voltaje. Una de las principales ventajas del inversor multinivel es su capacidad para conectarse fácilmente a fuentes de energía renovables, vehículos eléctricos enchufables, baterías y condensadores. Además, los MLI proporcionan una forma de onda de alta calidad con una distorsión armónica reducida, pueden funcionar

tanto a frecuencias fundamentales como a altas frecuencias, y ofrecen una alta calidad de potencia, menor Distorsión Armónica Total (THD) y una compatibilidad electromagnética mejorada. La invención de los inversores multinivel ha revolucionado la eficiencia y calidad en la generación y control de energía eléctrica en diversas aplicaciones. Los MLI se pueden clasificar principalmente en tres tipos como se muestra en la figura 1.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Topologías básicas de los MLI's.

Se han empleado diversas técnicas de conmutación para optimizar el rendimiento de los inversores y minimizar la THD de forma competente. Para lograr este objetivo se han sugerido los métodos de modulación de anchura de impulso vectorial espacial (SVPWM) y modulación de anchura de impulso sinusoidal (SPWM) [Patil, 2017]. Para conseguir un porcentaje menor de la THD, es necesario emplear varios métodos de optimización para solucionar las ecuaciones no lineales trascendentales que generan las series de Fourier de los armónicos de orden inferior. Una estrategia eficaz consiste en utilizar filtros a la salida del inversor para eliminar los armónicos de orden superior. Los ángulos de conmutación óptimos pueden obtenerse resolviendo ecuaciones no lineales, lo que supone un gran reto. En los últimos años, se ha investigado mucho y se han aplicado métodos de optimización metaheurísticos para resolver ecuaciones complejas. Estos algoritmos adoptan diversas estrategias para explorar eficientemente el espacio en busca de posibles soluciones. El término "metaheurístico" es una combinación del sufijo

griego "meta", que significa "superior" o "más allá", y la palabra "heurístico", que significa "encontrar" [Blum, 2005].

Los métodos metaheurísticos no suelen seguir el mismo nivel de rigor que los métodos clásicos como Newton-Raphson o la optimización por gradiente. En lugar de seguir un planteamiento matemático estricto, los métodos metaheurísticos imitan características de la naturaleza como la selección natural o la adaptación social [Blum, 2005]. Estos métodos pueden variar desde simples procedimientos de búsqueda local hasta procesos de aprendizaje más complejos. Los métodos metaheurísticos están diseñados para facilitar una exploración eficaz del espacio de búsqueda guiando el proceso de búsqueda. Normalmente no son deterministas, estos métodos pueden dar lugar a soluciones casi óptimas [Gutiérrez, 2016], [De-León, 2015].

Este trabajo pretende emplear el algoritmo Evolución Diferencial (ED) para reducir la THD presente en la forma de onda del voltaje de salida de un inversor multinivel en cascada (CHBMLI).

El índice modular (M_i) requerido para la aplicación del inversor puede alcanzarse analizando los conjuntos de ángulos de conmutación obtenidos. Este enfoque ofrece un medio más completo y eficaz de optimizar el valor de THD en la forma de onda del voltaje de salida. En varios artículos se ha analizado la realización de un barrido del M_i para obtener unos resultados de THD mínimos. Sin embargo, en algunos trabajos se ha utilizado un $M_i > 1$ [Salam, 2013], [Pawar, 2015], [Amjad, 2015], que puede conducir a una sobre modulación, y sólo se ha tenido en cuenta el % mínimo de THD encontrado. Otros artículos [Chabni, 2016], [Jamuna, 2013], [Sudha Letha, 2015], [Majed, 2017], [Gómez-Díaz, 2022], [Sánchez-Vargas, 2022] también encontraron un %THD mínimo coincidiendo con un $0.6 < M_i < 1$. Aunque estos artículos comparten el mismo número de niveles (siete), tienen diferentes ángulos de conmutación. En ocasiones, los artículos de investigación pueden carecer de información específica sobre el M_i utilizado en su trabajo, con distintos niveles, cargas y fases presentes en el inversor multinivel. Este trabajo analiza los conjuntos de ángulos de conmutación obtenidos para alcanzar el M_i requerido en función de la aplicación del MLI.

2. Métodos

Evolución diferencial

En 1996, Rainer Storn y Kenneth Price desarrollaron el algoritmo de evolución diferencial, un enfoque metaheurístico [Storn, 1995]. Se ha convertido en uno de los algoritmos evolutivos más utilizados debido a su versatilidad, fiabilidad, y facilidad de implementación [Gutiérrez, 2016]. Este algoritmo se basa en el uso de operadores genéticos como el cruce, la mutación y la selección, y opera sobre una población de vectores.

En la etapa de mutación, los vectores de la población se perturban aleatoriamente, lo que introduce diversidad en la población [Gutiérrez, 2016]. Por otro lado, el proceso de cruce se encarga de controlar la diversidad de la población al combinar características de diferentes vectores [Gutiérrez, 2016]. La selección se realiza para elegir los vectores que contienen la solución más apta, asegurando así que las mejores soluciones sean preservadas en la siguiente generación [Zhang, 2009].

El método ED presenta varias ventajas destacables. En primer lugar, es fácil de aplicar y entender, lo que lo hace accesible incluso para aquellos que no tienen experiencia previa en algoritmos evolutivos. Además, el algoritmo tiene una rápida convergencia, lo que significa que tiende a encontrar soluciones óptimas en un tiempo relativamente corto. También se destaca su tendencia a alcanzar la solución global óptima, evitando quedarse atascado en soluciones locales [Medina, 2014], [Bałchanowski, 2022]. En resumen, la ED es una poderosa herramienta para la optimización, con características que la hacen altamente efectiva y ampliamente utilizada en diversos campos de aplicación.

En la figura 2 se muestra un diagrama que ilustra las etapas del algoritmo ED. Este diagrama permite visualizar cómo se desarrollan las operaciones de mutación, cruce y selección:

- Inicialización (Población inicial): Se genera un grupo de individuos o vectores (NP) de forma aleatoria, donde G representa el número de generaciones [Bilal, 2020], [Price, 2005], [Malik, 2021].
- Mutación: El proceso de mutación implica seleccionar aleatoriamente dos vectores, X_2 y X_3 , para calcular una dirección de búsqueda. Esta dirección

se obtiene restando los dos vectores y multiplicando el resultado por un factor escala o F (valor entre 0 y 1). Luego, se suma el vector resultante a un tercer vector, $X1$, para obtener un vector mutado [Montes, 2006]. Este proceso de obtener un vector mutado se aplica a cada vector de la población.



Fuente: Bilal, 2020.

Figura 2 Diagrama de las etapas del algoritmo de Evolución Diferencial.

- Cruce o Recombinación: Se utiliza una constante de recombinación o probabilidad de cruce (Cr) para crear un nuevo vector de prueba. El valor de Cr se sitúa entre 0 y 1, y desempeña un papel crucial a la hora de determinar el grado de parecido entre el vector de prueba y el vector padre o el mutante. Si Cr está más cerca de 1, el vector de prueba resultante se parecerá más al vector mutante. Por el contrario, si Cr está más cerca de 0, el vector de prueba se parecerá más al vector padre [Price, 2005], [Malik, 2021].
- Selección: Para determinar la siguiente generación, se compara la aptitud de los vectores objetivo y de prueba [Malik, 2021]. Esta comparación consiste en evaluar a los padres y a los hijos, seleccionando para la siguiente generación el vector que presente la mejor aptitud y eliminando el otro vector.

Problema de optimización

La optimización consiste en encontrar la mejor solución a diversos problemas de diseño e ingeniería. Un problema de optimización consta de tres elementos clave:

- Función objetivo: es la propiedad que debe optimizarse y puede expresarse como una función lineal o no lineal.
- Variable de decisión: es un elemento desconocido del problema de optimización.
- Restricciones: son las limitaciones que deben cumplirse para lograr un resultado aceptable.

Para una función objetivo establecida que se define en el conjunto de todas las variables de decisión, debe encontrarse una decisión que optimice (minimice o maximice) el objetivo [Kumar, 2020], [Yong, 2018]. Un problema de optimización puede ser la ecuación 1.

$$\min f(x), \text{ sujeto a } x \in \Omega \quad (1)$$

Donde:

- f : Función de valor real denominada función objetivo.
- x : Vector de "n" variables independientes $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$
- x_1, x_2, \dots, x_n : Variables de decisión, son elegidas por el usuario o diseñador.
- Ω : Subconjunto de R denominado conjunto de restricciones o factible.

Se trata de un problema de decisión, que consiste en encontrar el vector "minimizador" x que satisfaga las restricciones (todos los vectores posibles dentro de Ω) y tenga el menor valor de función objetivo. El vector "minimizador" puede no ser único, ya que existen muchos minimizadores.

En ingeniería, es frecuente optimizar objetivos contrastados, en los que la mejora de un objetivo puede provocar el deterioro de otro. La variable de decisión óptima suele encontrarse satisfaciendo las restricciones dadas y optimizando la función objetivo, que puede consistir en múltiples funciones objetivo. Sin embargo, los problemas multiobjetivo pueden no tener una única solución óptima [Chong, 2013], [Yong, 2018].

Este trabajo se centra en la optimización de la reducción de la THD en un CHBMLI y en encontrar el valor deseado del Mi de acuerdo con la aplicación. El análisis comienza examinando la forma de onda escalonada del voltaje de salida utilizando

la serie de Fourier y expresándola en la ecuación 2 con una simetría de cuarto de onda.

$$V_{out}(\theta) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} b_n \sin(n\theta) \quad (2)$$

Donde $n = 1,3,5$ son armónicos impares y b_n es dado por la ecuación 3.

$$b_n = \sum_{n=1,3,5}^{2N-1} \frac{4V_{dc}}{n\pi} (V_1 \cos(n\alpha_1) + V_2 \cos(n\alpha_2) + \dots + V_s \cos(n\alpha_N)) \quad (3)$$

Donde:

- n : 1,3,5 2N-1 son armónicos impares.
- N : Número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo.
- α : Ángulo de conmutación.
- s : Número de fuentes de CD.

El nivel de armónicos en una forma de onda de voltaje de salida es un factor crucial para determinar su calidad. Según la norma IEEE 519, la ecuación 4 presenta la función objetivo que esboza la fórmula de la THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=1,3,5,7\dots}^{50} V_n^2}}{V_1} * 100 \quad (4)$$

Donde la V está dada por la ecuación 5.

$$V = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha_1) + \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha_2) + \dots + \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha_n) \quad (5)$$

Los ángulos deben cumplir las siguientes restricciones mostradas en la ecuación 6.

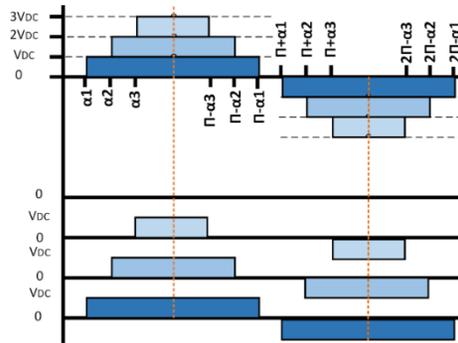
$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \dots \leq \alpha_n \leq \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Donde n = número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo y α_1 = ángulo de conmutación 1, α_2 = ángulo de conmutación 2, y α_3 = ángulo de conmutación n (Los ángulos de conmutación son las variables de decisión).

Cuando $M_i > 1$, se dice que hay sobre modulación, lo que se traduce en la ausencia de pulsos al comparar la señal moduladora con la señal portadora.

Con respecto al M_i , la relación de modulación es igual a V_1 sobre n , ecuación 7. La figura 3 muestra una forma de onda escalonada de un MLI de 7 niveles.

$$M_i = \frac{4}{3\pi} (\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \dots \cos(\alpha_n)) \quad (7)$$



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Forma de onda escalonada de un MLI de 7 niveles con tres puentes H.

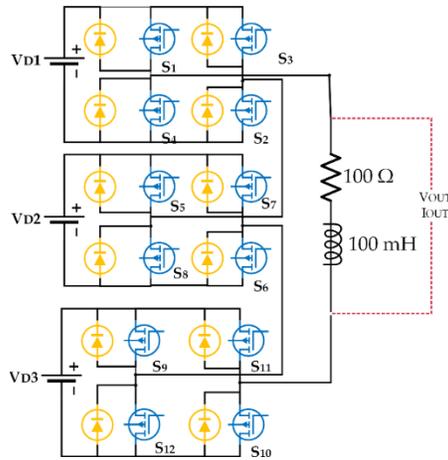
Inversor multinivel en cascada de siete niveles - caso de estudio

La referencia [Vargas, 2021] ofrece un análisis detallado de los trabajos de investigación que utilizan técnicas metaheurísticas para reducir la THD en los MLI. La publicación destaca que la topología y el algoritmo más empleados son el inversor multinivel monofásico en cascada con siete niveles y el algoritmo de evolución diferencial, respectivamente.

Las características más destacadas del CHBMLI son:

- El proceso de generación de señales de conmutación puede realizarse con relativa facilidad y ofrece la oportunidad de utilizar diversas técnicas de modulación de anchura de impulsos (PWM) basadas en principios de multi portadora o de espacio vectorial. [Hamzah, 2018], [Siddiqui, 2021].
- Los estados de conmutación pueden modificarse para compensar los fallos.
- Los condensadores de entrada no presentan problemas de equilibrio de voltaje [Wei, 2003].

El proyecto se centró en el estudio de la topología CHBMLI monofásica de siete niveles, la cual fue conectada a una carga RL, como se muestra en la figura 4. Para llevar a cabo las simulaciones, se utilizó el software MATLAB Simulink.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Diagrama esquemático del inversor multinivel caso de estudio.

La tabla 1 muestra los parámetros utilizados para el diseño y la simulación del inversor multinivel en cascada:

Tabla 1 Parámetros más importantes para la simulación de CHBMLI en MATLAB.

Parámetros	Especificaciones
Fuentes de voltaje (Vd 1,2,3)	83.33 V
Carga R	100 Ω
Carga L	100 mH
Potencia	625 W
Voltaje pico (V_{out})	250 V
Frecuencia	60 Hz

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Se utilizó el software MATLAB para programar el algoritmo ED con el propósito de identificar eficazmente tres ángulos de conmutación, α_1 , α_2 y α_3 , para el CHBMLI de siete niveles, con el objetivo de minimizar la THD. Los parámetros de inicialización se basaron en el algoritmo de ED presentado por [Vargas, 2022] para comenzar el proceso. Los parámetros empleados en el caso de estudio se describen en la tabla 2.

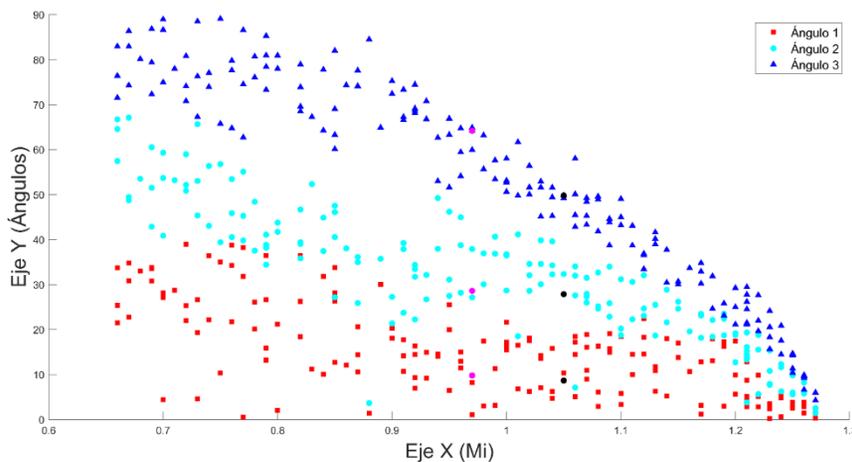
Tras simular el CHBMLI de siete niveles en Simulink, se probaron y graficaron los resultados para observar su comportamiento. La figura 5 muestra el gráfico de los distintos conjuntos de ángulos obtenidos (cuadrados del ángulo 1, círculos del

ángulo 2 y triángulos del ángulo 3) que coinciden con algunos Mi . El conjunto de ángulos depende de Mi ; A medida que el Mi disminuye, hay más conjuntos de ángulos disponibles.

Tabla 2 Valores de los parámetros del algoritmo de Evolución Diferencial.

Parámetros	Valor
Población (NP)	100
Generaciones (G)	100
Factor de escala (F)	0.3
Factor de cruce o recombinación (Cr)	0.9

Fuente: elaboración propia.



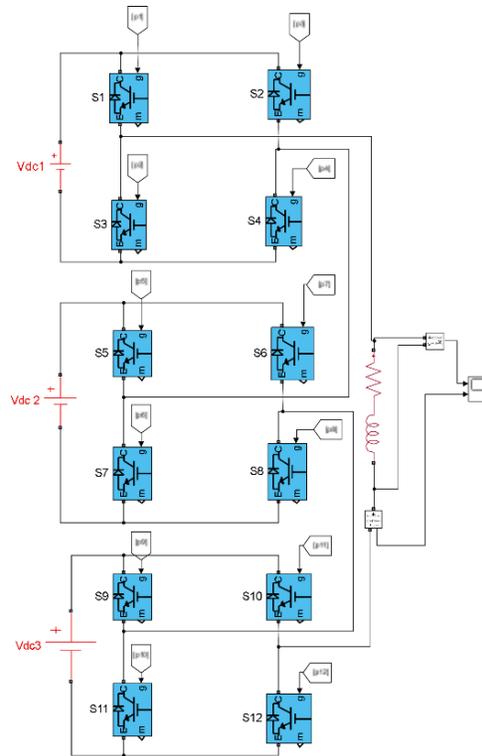
Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Ángulos vs índice de modulación (Mi) en la simulación CHBMLI Simulink.

Análisis de simulación

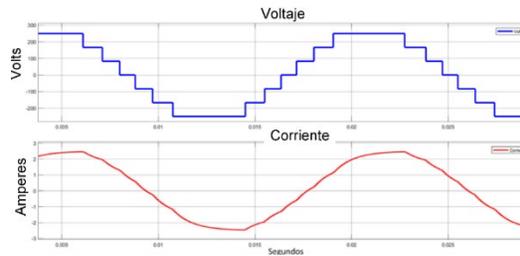
El análisis de simulación del CHBMLI monofásico de siete niveles se realizó con el software Simulink, utilizando los ángulos obtenidos. En la figura 6 se muestra un diagrama esquemático del inversor multinivel empleado para la simulación. La figura 7 presenta las formas de onda de voltaje y corriente a ± 250 V y ± 2.5 A para la salida del inversor.

Tras confirmar que las formas de onda de salida del inversor se ajustaban a las especificaciones de diseño establecidas en el caso práctico, se realizó un análisis exhaustivo del espectro armónico de la señal. Para ello, se utilizó la herramienta de análisis FFT Powergui de Simulink, que genera un gráfico que ilustra los armónicos y el %THD de la señal. La figura 8 muestra el gráfico obtenido de este análisis.



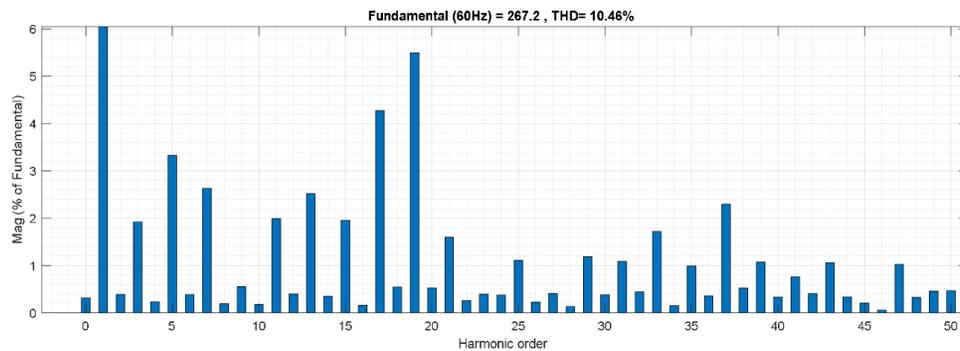
Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Diagrama esquemático de la simulación del CHBMLI siete niveles.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Diagrama esquemático la simulación del CHBMLI siete niveles.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Espectro de armónicos del voltaje de salida.

La figura 8 muestra el espectro de armónicos y la THD obtenida. Se buscó obtener la menor THD posible, y se encontró que era de 10.46% con ángulos de $\alpha_1 = 9.80$, $\alpha_2 = 27.89$ y $\alpha_3 = 49.81$. Sin embargo, es importante destacar que se obtuvo un valor de Mi de 1.05. Como se mencionó anteriormente, el valor de Mi debe ser menor a 1 para evitar cualquier sobre modulación. Por lo tanto, se llevó a cabo la búsqueda y análisis de diferentes conjuntos de ángulos para lograr una THD mínima y un valor de Mi inferior a 1.

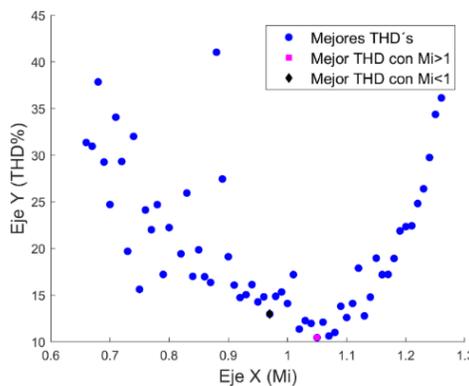
4. Discusión

Como se mencionó anteriormente entre menor sea el Mi , más conjuntos estarán disponibles. Se han marcado en figura 4 dos conjuntos de ángulos que muestran los mejores ángulos (con menor THD) encontrados para un Mi de 0.97 (con color magenta) y 1.05 (marcado con color negro) para generar la tabla 3. En la figura 9, se eligió la THD más baja entre los distintos ángulos correspondientes a cada Mi .

Tabla 3 Los mejores conjuntos de ángulos encontrados y su Mi .

Mi	α_1	α_2	α_3
0.97	9.80°	28.63°	64.2°
1.05	8.69°	27.89°	49.81°

Fuente: elaboración propia.

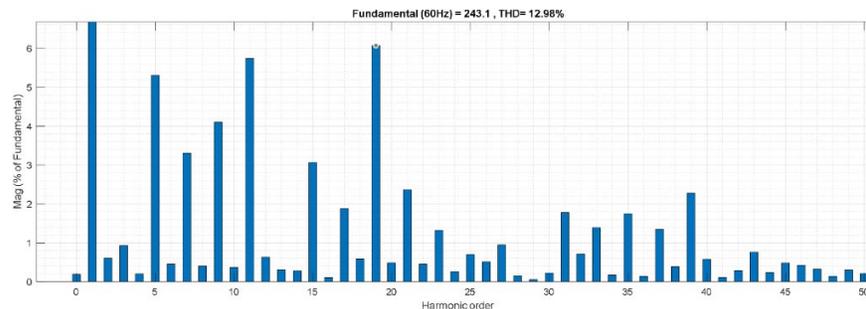


Fuente: elaboración propia.

Figura 9 THD vs. Mi en la simulación CHBMLI simulink.

Como puede verse en la figura 9, el Mi que alcanzó el porcentaje mínimo de THD fue 1.05 con un 10.46%.

Varios artículos no tienen en cuenta el valor de Mi ; existe la probabilidad de no encontrar los ángulos óptimos para reducir la THD o generar una sobre modulación. Observando los valores con un $Mi < 1$, el Mi con un bajo porcentaje de THD fue un Mi de 0.97 con una THD del 12.98%, como se muestra en la figura 9. Se encontró casi un 3% de diferencia con el porcentaje de THD sin considerar el Mi (10.46%). En la figura 10 se muestra el espectro de armónicos generado con el conjunto de ángulos considerando el que $Mi < 1$.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Espectro armónico generado con $Mi=0.97$.

5. Conclusiones

Durante décadas, los investigadores han trabajado en la THD utilizando diversos métodos. En los últimos años se han aplicado enfoques metaheurísticos para lograr una reducción óptima de la THD. Uno de estos métodos es el algoritmo ED, que ha demostrado su eficacia debido a su facilidad de implementación y rápida convergencia en diferentes campos de investigación. Este trabajo se centra en la aplicación del algoritmo ED para minimizar la THD en un inversor monofásico con topología CHBMLI formado por siete niveles. La simulación se realizó utilizando el software MATLAB/Simulink para implementar el algoritmo de evolución diferencial en el inversor.

Los ángulos óptimos de conmutación obtenidos (sin considerar el Mi) lograron reducir el porcentaje de THD a 10.46% (con un Mi de 1.05). Sin embargo, recordando que el valor de Mi debe ser menor a uno, se encontró que el valor del Mi que satisface los límites establecidos y proporciona una reducción adecuada de la THD es de 0.97, con una THD del 12.98%.

Tanto en la programación como en la simulación, se observó una diferencia de aproximadamente del 3% en la THD en comparación con los valores de M_i obtenidos.

El algoritmo ED pretende encontrar conjuntos óptimos de ángulos para reducir la THD y proporcionar una relación de modulación adecuada para la carga de salida. En conclusión, la minimización efectiva de la THD en un inversor MLI puede afectar al voltaje de salida, dando lugar a un valor M_i inadecuado. Por lo tanto, es necesario considerar si se requiere un valor M_i alto con una THD no tan baja o una THD baja con un valor M_i pobre para una carga específica.

El algoritmo ED ha demostrado ser una solución fiable y rentable para resolver ecuaciones complejas con gran precisión y se ha aplicado con éxito en numerosas disciplinas científicas, lo que demuestra su versatilidad y practicidad.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Amjad, A. M., Salam, Z. & Saif, A. M. A. Application of differential evolution for cascaded multilevel VSI with harmonics elimination PWM switching. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, No. 64, 447-456, 2015.
- [2] Bałchanowski, M. & Boryczka, U. Aggregation of Rankings Using Metaheuristics in Recommendation Systems. *Electronics*, 11, 2022.
- [3] Bilal, Pant, M., Zaheer, H., Garcia-Hernandez, L. & Abraham, A. Differential Evolution: A review of more than two decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, No.90, 2020.
- [4] Blum, C., Roli, A. & Alba, E. An Introduction to Metaheuristic Techniques. In: Zomaya, A. Y. (ed.) *Parallel Metaheuristics A New Class of Algorithms*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005.
- [5] Chabni, F., Taleb, R. & Helaimi, M. H. Differential Evolution based SHEPWM for SevenLevel Inverter with Non-Equal DC Sources. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7 No.9, 304-311, 2016.

- [6] Chong, E. K. P. & AK, S. H. An Introduction To Optimization, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2013.
- [7] De-León, S., Calleja, H. & Aguayo, J. Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, No. 30, 6791-6803, 2015.
- [8] Gómez Díaz, K. Y., De León Aldaco, S. E., Aguayo Alquicira, J., Ponce-Silva, M. & Olivares Peregrino, V. H. Learning-Based Optimization Algorithm Applied in Electronic Engineering: A Survey. No. 11, 3451, 2022.
- [9] Gutiérrez, D., López, J. M. & Villa, W. M. Metaheuristic Techniques Applied to the Optimal Reactive Power Dispatch: A Review. *IEEE Latin America Transactions*, No. 14, 11, 2016.
- [10] Hamzah, H. H., Ponniran, A., Kasiran, A. N., Harimon, M. A., Gendum, D. A. & Yatim, M. H. A Single Phase 7-Level Cascade Inverter Topology with Reduced Number of Switches on Resistive Load by Using PWM. *Journal of Physics: Conference Series*, 995, 2018.
- [11] Jamuna, P. & Rajan, C. C. A. A Heuristic Method: Differential Evolution for Harmonic Reduction in Multilevel Inverter System. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 482-486, 2013.
- [12] Kabalci, E. Multilevel Inverters Introduction and Emergent Topologies. In: Kabalci, E. (ed.) *Multilevel Inverters*, 2021.
- [13] Kumar, D., Gandhi, B. G. R. & Bhattacharjya, R. K. Firefly Algorithm and Its Applications in Engineering Optimization. In: Bennis, F. & Bhattacharjya, R. K. (eds.) *Nature-Inspired Methods for Metaheuristics Optimization, Algorithms and Applications in Science and Engineering*, 2020.
- [14] Majed, A., Salam, Z. & Amjad, A. M. Harmonics elimination PWM based direct control for 23-level multilevel distribution STATCOM using differential evolution algorithm. *Electric Power Systems Research*, 152, 48-60, 2017.
- [15] Malik, H., Iqbal, A., Joshi, P., S. A. & Bakhsh, F. I. *Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications*, 2021.
- [16] Medina, I. R. *Algoritmos bioinspirados: Una revisión según sus fundamentos biológicos.*, University of Manchester, 2014

- [17] Montes, E. M. Paradigmas emergentes en algoritmos bio-inspirados. In: Alfaomega (ed.) *Inteligencia Artificial*. Alfaomega, 2006.
- [18] Patil, S. D. & Kadwane, S. G. Application of Optimization Technique in SHE Controlled Multilevel Inverter. *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017)*. 2017.
- [19] Pawar, S. V. & S.L., S. Harmonic Elimination in Cascade Multilevel Inverter with Non Equal Dc Sources Using Genetic and Differential Evolution Algorithm. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol.2, 144-150, 2015.
- [20] Price, K., Storn, R. & Lampinen, J. *Differential Evolution A practical Approach to Global Optimization*, Alemania, Springer Verlag, 2005.
- [21] Salam, Z., Amjad, A. M. & Majed, A. Using Differential Evolution to Solve the Harmonic Elimination Pulse Width Modulation for Five Level Cascaded Multilevel Voltage Source Inverter. *1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*. Kota Kinabalu, Malaysia, 2013.
- [22] Sánchez Vargas, O., De León Aldaco, S. E., Aguayo Alquicira, J., Vela Valdés, L. G. & Mina Antonio, J. D. Differential Evolution Applied to a Multilevel; A Case Study. *Applied Sciences*. 12, 9910, 2022.
- [23] Siddiqui, N. I., Alam, A., Quayyoom, L., Sarwar, A., Tariq, M., Vahedi, H., Ahmad, S. & Mohamed, A. S. N. Artificial Jellyfish Search Algorithm-Based Selective Harmonic Elimination in a Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter. *Electronics*, 10, 2021.
- [24] Storn, R. M. & Price, K. V. *Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces*. International Computer Science Institute, 1995.
- [25] Sudha Letha, S., Thakur, T. & Kumar, J. Harmonic Elimination in a Solar Powered Cascaded Multilevel Inverter Using Genetic Algorithm and Differential Evolution Optimization Techniques. *Volume 6B: Energy*, 2015.
- [26] Vargas, O. S., Aldaco, S. E. D. L., Alquicira, J. A. & Núñez, A. R. L. Evolutionary Metaheuristic Methods Applied to Minimize the THD in Inverters: A Systematic Review. *European Journal of Electrical Engineering*, 23, 237-245, 2021.

- [27] Vargas, O. S., Aldaco, S. E. D. L., Alquicira, J. A., Rodríguez, E. F. & Ponce, R. E. L. Cálculo de los ángulos óptimos de conmutación para un inversor multinivel utilizando evolución diferencial. *Pistas Educativas*, 43, 1-19, 2022.
- [28] Wei, S., Wu, B., Li, F. & Sun, X. Control Method for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with Faulty Power Cells. Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Miami Beach, FL, USA, 2003.
- [29] Yong, J. Optimization Theory a concise introduction, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2018.
- [30] Zhang, J. & Sanderson, A. C. Adaptive Differential Evolution: A Robust Approach to Multimodal Problem Optimization (Adaptation, Learning, and Optimization,1), 2009.