

CÁLCULO DE LOS ÁNGULOS ÓPTIMOS DE CONMUTACIÓN PARA UN INVERSOR MULTINIVEL UTILIZANDO EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

*CALCULATION OF OPTIMAL SWITCHING ANGLES FOR A
MULTILEVEL INVERTER USING DIFFERENTIAL EVOLUTION*

Oscar Sánchez Vargas

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
m20ce023@cenidet.tecnm.mx

Susana Estefany De León Aldaco

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

Jesús Aguayo Alquicira

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

Eligio Flores Rodríguez

Tecnológico Nacional de México / ITS de Los Reyes, México
eligio.fr@losreyes.tecnm.mx

Ricardo Eliú Lozoya Ponce

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

Recepción: 1/noviembre/2021

Aceptación: 24/febrero/2022

Resumen

Actualmente en varios trabajos de investigación se han utilizado los métodos metaheurísticos para minimizar de forma efectiva la distorsión armónica total (THD, Total Harmonic Distortion) en inversores multinivel, ya que estos proporcionan tiempo de cálculo y resultados efectivos. Dentro de estos métodos la evolución diferencial ha sido el algoritmo que en recientes años se ha implementado para la reducción de la THD.

Este trabajo presenta el algoritmo de Evolución Diferencial (ED) para encontrar los ángulos de conmutación óptimos en un inversor multinivel en cascada de siete niveles para eliminar los armónicos de orden inferior. Los armónicos impares de orden inferior no pueden eliminarse fácilmente, ya que contienen ecuaciones no

lineales trascendentales, resultantes de la serie de Fourier. Las soluciones a estas ecuaciones son complicadas y requieren mucho tiempo. También este trabajo se centra en la búsqueda de los parámetros iniciales del algoritmo de Evolución Diferencial para observar cual combinación se desempeña mejor, tanto en rapidez como fiabilidad para encontrar una THD mínima casi óptima.

Además, realizó una simulación de un inversor multinivel en cascada de siete niveles con carga RL en Simulink para validar los resultados, además de realizar diferentes iteraciones variando los parámetros para así verificar cuál de estos proporciona una mejor búsqueda de los ángulos de conmutación, además de brindar una discusión de los resultados obtenidos.

Palabras Clave: Evolución diferencial, inversor multinivel, métodos metaheurísticos, reducción de THD.

Abstract

In different research papers, metaheuristic methods have been used to effectively minimize the Total Harmonic Distortion (THD) in multilevel inverters, since they provide calculation time and effective results. Among these methods, differential evolution has been the algorithm that has been implemented in recent years for THD reduction.

This paper presents the Differential Evolution (DE) algorithm to find the optimal switching angles in a seven-level cascaded multilevel inverter to eliminate the lower order harmonics. The lower-order odd harmonics cannot be easily eliminated, as they contain transcendental non-linear equations, resulting from the Fourier series. The solutions to these equations are complicated and time consuming. Also, this work focuses on finding the initial parameters of the Differential Evolution algorithm to observe which combination performs best, both in speed and reliability to find a near-optimal minimum THD.

It also performed a simulation of a seven-level cascaded multilevel inverter with RL load in Simulink to validate the results, in addition to performing different iterations varying the parameters to verify which of these provides a better search of the switching angles, in addition to providing a discussion of the results obtained.

Keywords: *Differential evolution, metaheuristic methods, multilevel inverter, THD reduction.*

1. Introducción

Los inversores multinivel (MLIs, Multilevel Inverter) son dispositivos alternativos mejorados a los inversores normales de dos niveles (inversores convencionales o tradicionales), proporcionan un mayor número de niveles de salida en las formas de onda de corriente y tensión. Las formas de onda de salida se generan en corriente o tensión en escalera, dependiendo del tipo de suministro, como inversor de fuente de corriente (CSI, Current Source Inverter) o inversores de fuente de tensión (VSI, Voltage Source Inverter). Se utilizan en muchas áreas de aplicación, como accionamientos industriales, aplicaciones de servicios públicos como compensadores estáticos (STATCOMs, STATic COMPensators), sistemas de alimentación ininterrumpida (UPSs, Uninterruptible Power Supplies) e integración de fuentes de energía renovables en la red de servicios públicos. Las topologías de los dispositivos y los métodos de control se han mejorado utilizando una amplia variedad de técnicas desde que se propusieron por primera vez a principios de la década de 1980 [Kabalci, 2021].

Los MLIs poseen las ventajas de sintetizar niveles de tensión más altos con menor potencia, para para alcanzar potencias elevadas y formas de onda a la salida de alta calidad, y tener respuestas dinámicas razonables.

Los inversores multinivel se pueden clasificar principalmente en tres tipos:

- Inversor multinivel con diodos de enclavamiento (DCMLI siglas en inglés de Diode Clamped Multilevel Inverter).
- Inversor multinivel con condensadores flotantes (FCMLI siglas en inglés de Flying Capacitors Multilevel Inverter).
- Inversor multinivel en cascada puente H (CHBMLI siglas en inglés de Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter).

Entre estas tres topologías destaca el CHBMLI debido a su modularidad y simplicidad de control, entre otras ventajas. Hasta ahora se han aplicado diferentes

técnicas de conmutación para mejorar el rendimiento del inversor y minimizar la distorsión armónica total (THD, Total Harmonic Distortion) de forma efectiva. Se sugieren varios métodos de modulación de anchura de pulso sinusoidal (SPWM) y las técnicas de modulación por ancho de pulso de espacios vectoriales (SVPWM) [Patil, 2017].

Para eliminar los armónicos de orden superior, pueden utilizarse filtros en la salida de los inversores, mientras que los de orden inferior necesitan distintos métodos de optimización para resolver las ecuaciones no lineales trascendentales que generan las series de Fourier. La solución de las ecuaciones no lineales es una de las principales problemáticas para obtener los ángulos óptimos de conmutación para alcanzar un menor porcentaje de THD.

En los últimos años se han investigado e implementado los métodos metaheurísticos de optimización para la solución de este tipo de ecuaciones no lineales trascendentales. Los métodos metaheurísticos son algoritmos que exploran de manera eficiente el espacio de búsqueda de la solución utilizando diferentes estrategias. El nombre o término *metaheurístico* deriva del sufijo en griego “meta” que significa “más allá” o “superior” y la palabra “heurístico” que significa “encontrar” [Blum, 2005].

El procedimiento que realizan los métodos metaheurísticos no suele ser tan riguroso como los métodos clásicos (Por ejemplo, Newton-Raphson, Optimización gradiente, entre otros). Los métodos metaheurísticos imitan ciertas características de la naturaleza, las cuales se pueden basar en la selección natural o adaptación social [Blum, 2005]. También pueden ir desde procedimientos simples de búsqueda local hasta procesos de aprendizaje complejos. Los métodos metaheurísticos orientan el proceso de búsqueda en un espacio, de tal manera que este espacio de búsqueda puede ser explorado de manera eficiente. Estos métodos no suelen ser deterministas por lo tanto estas proporcionan soluciones muy cercanas a las óptimas. [Gutiérrez, 2016], [De León, 2015].

Entre los diversos métodos metaheurísticos existentes, el algoritmo de Evolución Diferencial tiene diversas ventajas, entre ellas destacan su fácil implementación, rápida convergencia, y tiende a llegar a la solución óptima global.

Este artículo se enfoca en la implementación del algoritmo de Evolución Diferencial (DE, Differential Evolution) con la finalidad de conocer el desempeño aplicado a la resolución de un problema de optimización cuya función objetivo es minimizar el valor de THD en la forma de onda de voltaje de salida de un inversor multinivel en cascada, y que estará sujeto a ciertas restricciones. Para lograr minimizar la función objetivo es necesario obtener los ángulos de conmutación óptimos (variables de decisión), de modo que se minimicen los armónicos de orden inferior. Otro aspecto que se aborda en el presente artículo es la búsqueda y comprobación de los parámetros de inicialización para el algoritmo de ED, con la finalidad de lograr un menor tiempo de ejecución y rápida convergencia.

2. Métodos

Evolución diferencial

Evolución Diferencial (ED) es un método metaheurístico que fue creado por Rainer Storn y Kenneth Price en 1996. Este método perturba la población generada aleatoriamente en el proceso de mutación, mientras que la diversidad de la población se controla mediante el proceso de cruce [Gutiérrez, 2016]. Durante el proceso de selección, utiliza la supervivencia de la solución más apta. Entre las ventajas del método de ED destaca que es fácil de implementar, tiene una rápida convergencia, tiende a llegar a la solución óptima global y no suele quedarse en soluciones locales [Medina, 2014]. En la figura 1, se muestra un diagrama con las etapas de la ED:

- Inicialización (Población inicial): Se genera aleatoriamente una población de vectores NP o individuos, con G que son las generaciones que tiene el algoritmo [Bilal, 2020], [Price, 2005], [Malik, 2021].
- Mutación: El proceso de mutación consiste utilizar un par de vectores $X2$ y $X3$ seleccionados de manera aleatoria, los cuales se restan para definir una dirección de búsqueda. Con la diferencia se multiplica por el factor escala o F (el valor de F varía de 0 a 1). Después de la multiplicación, este vector se le suma a un tercer vector $X1$ [Montes,2006]. Por cada vector que tenga en la población se crea un vector mutado.



Figura 1 Diagrama de las etapas de la Evolución Diferencial [Bilal, 2020].

- Cruce o Recombinación: Se genera un nuevo vector llamado vector de prueba, utilizando una constante de recombinación o también llamada probabilidad de cruce C_r cuyo valor esta entre 0 y 1 [Price, 2005], [Malik, 2021]. El valor C_r define que tan parecido será el vector de prueba con respecto al vector mutante o al vector padre. Si C_r es cercano a 1 el vector de prueba será bastante parecido al vector mutante; mientras que si es cercano a 0 el vector de prueba será parecido al vector padre.
- Selección: Se realiza una comparación entre el vector objetivo y el vector de prueba según su valor de aptitud [Malik, 2021]. Dicho de otra manera, se compara los padres con los hijos, el que obtenga mejor aptitud permanecerá en la siguiente generación, mientras que el otro es eliminado.

Inversor multinivel en cascada - caso de estudio

De acuerdo con la publicación de [Sánchez, 2021] en la que se realiza una revisión sistemática de publicaciones que utilizan métodos metaheurísticos para la minimización de THD en inversores, uno de los resultados de su revisión, que la topología más utilizada en combinación con el algoritmo de Evolución Diferencial es la del inversor multinivel en cascada monofásico con siete niveles.

Entre las características del CHBMLI destaca que la generación de sus señales de conmutación sea sencilla, esto permite que se pueda utilizar cualquier técnica PWM basadas en multi-portadoras o espacios vectoriales [Hamzah, 2018].

La reconfiguración de la modulación permite cambiar los estados de conmutación adecuados para compensar alguna falla y esta topología no tiene problemas de balance de tensión en los condensadores de entrada [Wei, 2003].

Tal como se mencionó anteriormente, la topología seleccionada como caso de estudio es el CHBMLI monofásico de siete niveles, con una carga RL conectada a la salida. El diagrama esquemático de la topología seleccionada se muestra en la figura 2.

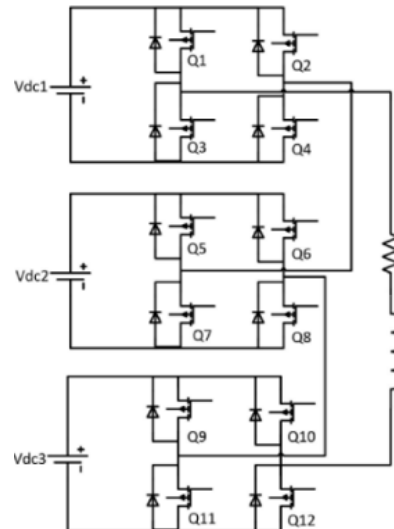


Figura 2 Diagrama esquemático del inversor multinivel caso de estudio.

Los parámetros que se consideraron para el diseño del inversor multinivel caso de estudio son:

- Carga RL =100 ohms, y 100 mH.
- Voltaje de salida = 250 V.
- Valor de Vdc1= Vdc2= Vdc3= 83.33 V.
- Frecuencia= 60 Hz.
- Corriente = 25 A.
- Potencia = 6.25 kW.

Problema de optimización

En el inversor multinivel, la forma de onda escalonada del voltaje de salida se analiza usando la serie de Fourier que esta expresada en la ecuación 1 teniendo en cuenta que es de simetría de cuarto de onda.

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

Donde $n = 1,3,5$ son armónicos impares y b_n es dado por la ecuación 2.

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

Donde:

$n = 1,3,5 \dots 2N-1$ (armónicos impares).

$N =$ número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo.

$m =$ número de fuentes de DC.

$\alpha =$ ángulo de conmutación.

La calidad de la forma de onda del voltaje a la salida se determina por cuantos armónicos contiene, por lo cual en la ecuación 1 se demuestra la fórmula de la THD que sigue la norma IEEE 519 para establecerse como la función objetivo siguiente, ecuación 3.

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

Donde:

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

Siguiendo las restricciones, ecuación 4.

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \dots \leq \alpha_n \leq \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

Donde $n =$ número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo y $\alpha =$ ángulo de conmutación (variables de decisión).

3. Resultados

Análisis de influencia de la variación de parámetros del algoritmo de evolución diferencial

Para resolver el problema de optimización previamente establecido en la sección anterior, se aplicó el algoritmo de evolución diferencial utilizando el software MATLAB para resolver las ecuaciones no lineales trascendentales y obtener para el caso de estudio seleccionado (CHBMLI monofásico de siete niveles), los tres ángulos de conmutación óptimos para lograr una minimización de la THD. Para ejecutar el algoritmo de ED en MATLAB, en el programa se llama a la función objetivo en un script de Matlab aparte y se asignan de manera manual (proporcionados por el programador-usuario) los valores para los parámetros iniciales del algoritmo tales como población (NP), generaciones (G), límite inferior, límite superior, factor escala (F) y factor de recombinación o cruza (Cr).

En el presente artículo se realizó un análisis de la influencia de la variación de los principales parámetros de inicialización (NP , G , F y Cr) del algoritmo de ED, con la finalidad de identificar el conjunto de parámetros más adecuados para lograr un desempeño satisfactorio del algoritmo, obteniendo un menor tiempo de ejecución para el cálculo de los ángulos de conmutación óptimos para el inversor multinivel, y al mismo tiempo una menor THD.

Previo al análisis de la influencia de la variación de parámetros se realizó una búsqueda en diversos artículos publicados en diversas bases de datos, acerca de la implementación de ED en inversores.

La finalidad de la búsqueda era obtener una referencia de la población y las generaciones que se utilizaron en dichas publicaciones, arrojando como resultado que la mayoría de las publicaciones utilizó una población de 50 y una generación de 100.

A continuación, se presentan gráficamente los resultados obtenidos del análisis de influencia de la variación de parámetros del algoritmo de Evolución Diferencial para el caso de estudio previamente establecido. La figura 3 muestra la relación entre el valor de THD y el factor escala (F), para cada valor del factor cruza (Cr) dentro del rango de 0 a 1.

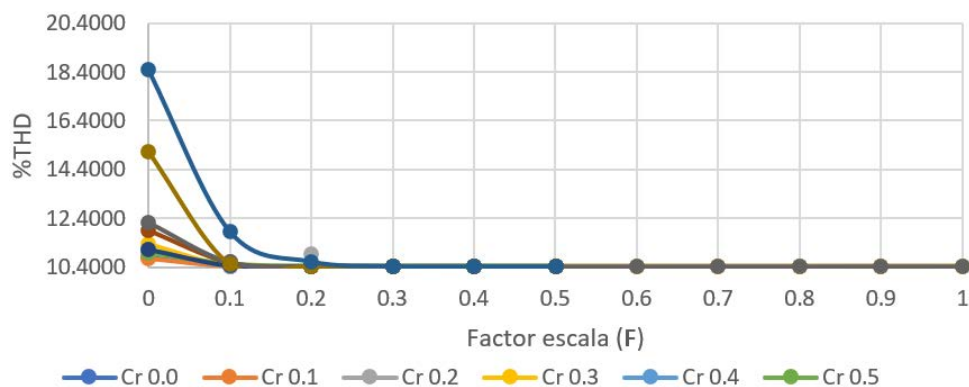


Figura 3 Gráfica de THD vs Factor escala (F).

Observando la figura 3 en la primera sección de la cuadrícula para valores del factor escala (F – eje x) con valores de 0 a 0.2, se logra visualizar que a menor valor del factor escala, el valor porcentual de la THD (eje y) incrementa. Esta tendencia se presenta para todos los valores del factor de Cruce (Cr). Respecto al parámetro de Cr , se observa en la gráfica que a partir de un valor de 0.3 para el factor de escala, se obtiene un %THD con valor promedio aproximado a 10.43% para cualquier valor de Cr . Posteriormente, se analizó la respuesta del algoritmo para conocer la interacción entre el número de generaciones, y los factores de escala (F) y el factor de cruce (Cr). La finalidad consistía en identificar con que combinación de F y Cr se obtenía un menor número de generaciones necesarias para que el algoritmo converja en la solución de la menor THD. La figura 4, muestra el comportamiento obtenido de esta interacción. Observando la figura 4 los mejores promedios para el número máximo de generaciones para la convergencia se presentaron para los valores de $F = 0.2$ y $F = 0.3$. Conforme se incrementa el valor de F , el promedio del número máximo de generaciones necesarias para la convergencia también incrementa su tiempo de convergencia. Se puede apreciar en la figura 4 que la combinación de un factor $F = 0.3$ y un factor $Cr = 0.9$ exhiben un mejor desempeño en comparación con los otros casos, ya que solo requirió un promedio de 82 generaciones máximo para encontrar la solución al problema de optimización y minimizar la función objetivo para obtener la menor THD.

Otro aspecto que se consideró fue obtener la combinación de parámetros del algoritmo de ED para lograr un menor tiempo de ejecución para la resolución del

problema de optimización. El tiempo de ejecución del algoritmo se obtuvo utilizando la función *tic toc* de MATLAB. La figura 5, muestra la interacción de los parámetros del algoritmo (F y Cr) en relación con el tiempo de ejecución.

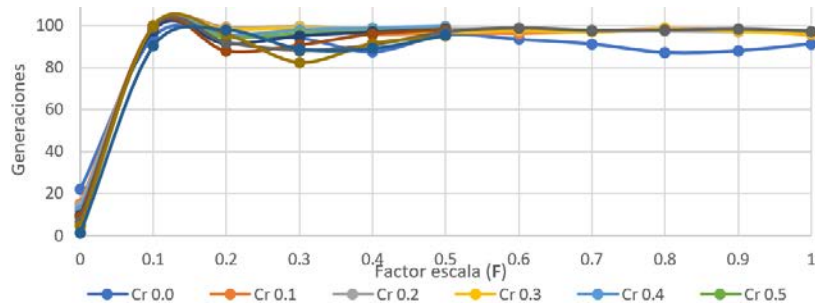


Figura 4 Máximo número de generaciones para converger en la menor THD posible.

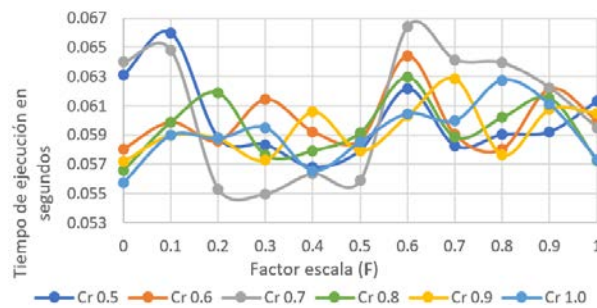


Figura 5 Interacción de los parámetros (F y Cr) en relación con el tiempo de ejecución.

Se puede apreciar en la figura 5 que la combinación de un factor de cruce $Cr = 0.7$, y $F = 0.3$ consume un tiempo de ejecución de 54.9 milisegundos (curva inferior, color gris). Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos en la figura 4, la combinación de $Cr = 0.9$ y $F = 0.3$ mostró un mejor desempeño respecto a la rapidez de convergencia, y tal como se observa en la figura 5 requirió de un tiempo de ejecución de 57.2 milisegundos. Posteriormente, utilizando la combinación de parámetros obtenidos anteriormente ($F = 0.3$ y $Cr = 0.9$). Se analizó la respuesta del algoritmo para conocer la interacción entre la población (NP) y la generación (G), en relación con el tiempo de ejecución. Los resultados de esta interacción se muestran en la figura 6. Observando la recta inferior (color azul) que representa el comportamiento del tiempo de ejecución del algoritmo con generaciones $G = 20$, se

logra visualizar que al incrementar el número de población (NP – eje x) el tiempo de ejecución del código del algoritmo también aumenta. Esta tendencia se presenta para los otros casos mostrados en la figura para los distintos valores de generaciones (G). Por último, se analizó la interacción entre los parámetros de población (NP) y la generación (G), en relación con el valor porcentual de la THD.

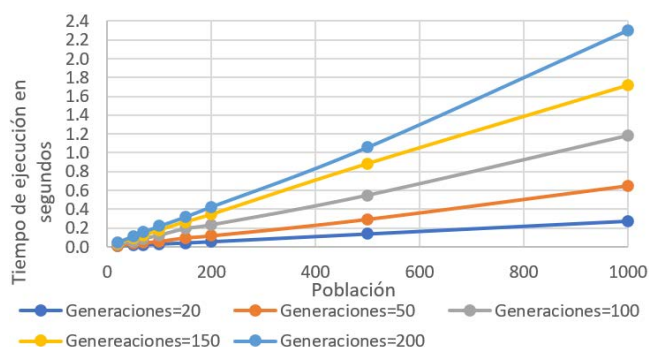


Figura 6 Interacción de los parámetros NP y G en relación con el tiempo de ejecución.

Los resultados de esta interacción se muestran en la figura 7. Observando la figura 7 en la primera sección de la cuadrícula, específicamente para valores de la población (NP – eje x) con valores de 20 a 50, se logra visualizar que, para este rango de valores de NP , al incrementar el valor de NP disminuye el valor porcentual de THD (eje y), y esta tendencia se presenta para todos los valores de generaciones (G) para ese rango de valores de NP . Sin embargo, a partir de valores de población (NP) superiores a 50, se obtiene un valor promedio de THD=10.43%, independientemente de los valores de generaciones (G).

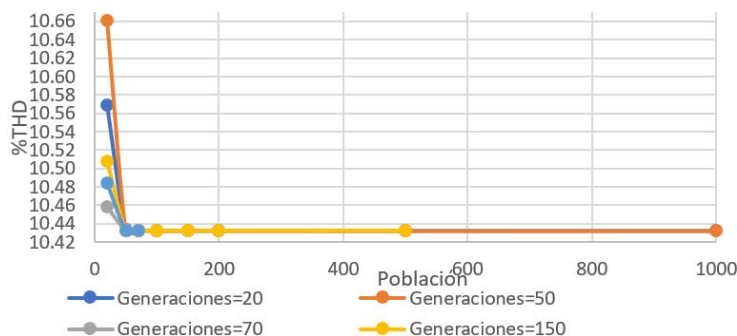


Figura 7 Interacción de los parámetros NP y G en relación con el %THD.

De acuerdo con lo mostrado en la figura 6 se señaló que el menor tiempo de ejecución se obtenía con $G = 20$. Sin embargo, con ese valor se obtiene una $THD = 10.57\%$ tal como se muestra en la figura 7. Observando a detalle la figura 7 en la primera sección de la cuadrícula se logra apreciar que un valor de $G = 50$ obtiene una $THD = 10.43\%$. Por lo tanto, se seleccionó el parámetro $G = 50$ como el más adecuado para el caso de estudio.

Una vez finalizado el análisis de la variación de parámetros del algoritmo de ED para el caso de estudio previamente establecido, se logró identificar a los valores de los parámetros que exhibieron mejor desempeño. En la tabla 1, se muestran los valores de dichos parámetros:

Tabla 1 Valores de los parámetros para el algoritmo de Evolución Diferencial.

Parámetro	Valor
Factor de Cruce (Cr)	0.9
Factor de escala (F)	0.3
Población (NP) y Generación (G)	50

Para resolver el problema de optimización de minimización de THD, obteniendo los ángulos óptimos de conmutación para CHBMLI monofásico de siete niveles establecido como caso de estudio, se inicializó el algoritmo de ED con los parámetros mostrados en la tabla 1. Una vez ejecutado el algoritmo, se obtuvieron los ángulos de conmutación óptimos mostrados en la tabla 2.

Tabla 2 Ángulos óptimos de conmutación obtenidos por el algoritmo de ED.

Ángulo (Variable de decisión)	Valor
θ_1	8.69°
θ_2	27.89°
θ_3	49.81°

Análisis de simulación

Posteriormente, se realizó un análisis de simulación del CHBMLI monofásico de siete niveles en el software Simulink utilizando los ángulos óptimos de conmutación señalados en la tabla 2. El diagrama esquemático del inversor multinivel para la simulación se muestra en la figura 8.

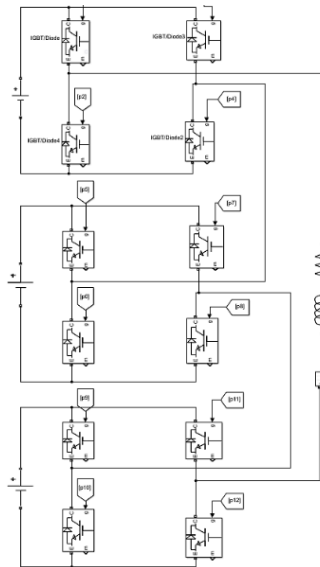


Figura 8 Diagrama esquemático para la simulación del CHBMLI.

La figura 9a muestra la forma de onda del voltaje de salida del inversor con un valor de 250 V. La figura 9b muestra la forma de onda escalonada de la corriente de salida del inversor con un valor de 25 A.

Después de verificar que las formas de onda de salida del inversor coinciden con los valores de las especificaciones de diseño establecidas previamente en la sección relacionada al caso de estudio.

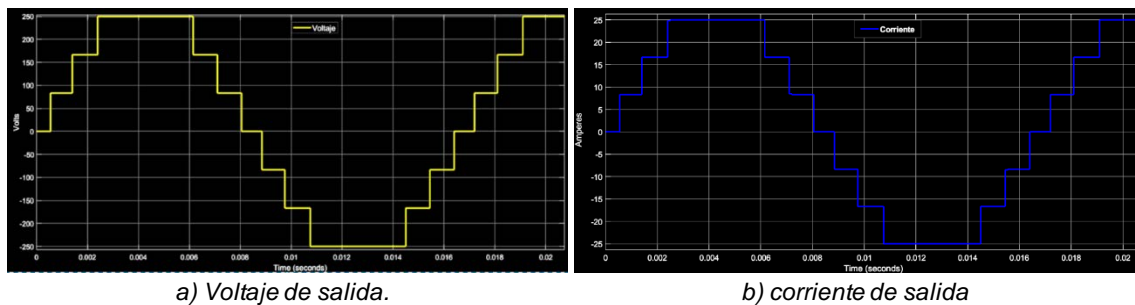


Figura 9 Forma de onda escalonada.

Posteriormente, se procedió a analizar el espectro armónico de la señal de salida del inversor. Se utilizó una herramienta de Simulink llamada Powergui FFT Analysis Tool, que despliega un gráfico que muestra los armónicos correspondientes de la señal analizada y el %THD. El gráfico obtenido se muestra en la figura 11.

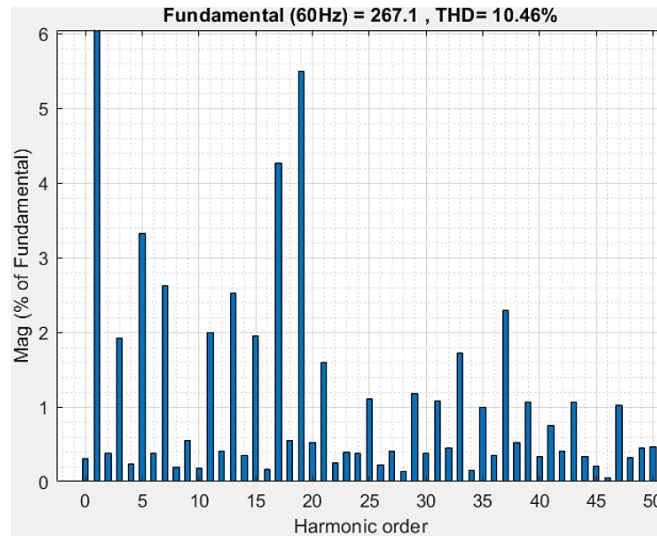


Figura 11 Espectro de armónicos para forma de onda de voltaje de salida en la carga.

4. Discusión

En la tabla 3, se muestra un resumen de los parámetros de inicialización del algoritmo de ED y de las características de los inversores CHBMLIs utilizados como caso de estudio en diversas publicaciones. Revisando las publicaciones relacionadas a la temática de los parámetros de inicialización para el algoritmo de Evolución Diferencial, algunos autores recomiendan utilizar valores de F de entre 0.4 y 0.9. Un factor de escala $F = 0.9$ mantiene un equilibrio entre velocidad y probabilidad de convergencia [Ronkkonen, 2005], [Zhang, 2009], [Castillo, 2019].

Tabla 3 Parámetros para el algoritmo de ED utilizados en diferentes casos de estudios.

Referencia	Parámetros ED				CHBMLI			%THD
	F	Cr	G	NP	Niveles	Fases	Carga	
[Salam, 2013]	---	---	10000	70	5	3	RL	24.25
[Majed, 2017]	1	0.95	---	70	23	3	RL	5.2
[Naidu, 2018]	0.9	0.55	---	---	11	3	RL	26.23
[Salam, 2015]	1	0.9	---	10	15	3	R	3.74
[Amjad, 2015]	0 a 1	0.95	---	80	5 y 7	1	R	5=24.5 7=13.2
[Stonier, 2020]	0.7	0.2	50	5	11	1	R	7.7

Por otra parte, para el factor de cruce (Cr) algunos autores [Mezura, 2010], [Juárez, 2017] recomiendan emplear un $Cr = 0.9$, para que el vector de prueba sea un 90% similar al vector mutante y así tener una amplia variedad de individuos.

Observando la tabla 3, muchos autores optaban por utilizar un factor escala (F) con valores altos (entre 0.7 y 1). Para el factor de recombinación o factor de cruce (Cr), la mayoría de las publicaciones utiliza un valor de 0.9 o superior. La mayoría de los artículos de la tabla no indica el número de generaciones utilizadas. Por otra parte, la mayoría de las publicaciones de la tabla 3 utilizan para la población valores menores a 100. Comparando los parámetros de la tabla 3 y los parámetros de la tabla 1, obtenidos de un análisis de la variación de parámetros para el algoritmo ED para el caso de estudio abordado en el presente artículo, se coincide en tener un factor de cruce $Cr = 0.9$. Por otra parte, contrario a lo que se presenta en tabla 3 en donde la mayoría de las publicaciones utiliza un factor de escala (F) superior a 0.7, para el caso de estudio de este artículo el valor adecuado resultó ser $F = 0.3$. La combinación de ambos factores $F = 0.3$ y $Cr = 0.9$ obtuvieron una mayor rapidez de convergencia y un menor tiempo de ejecución del algoritmo.

5. Conclusiones

La disminución de la THD de forma efectiva ha sido tema de investigación durante varias décadas, se han utilizado e implementado varios métodos para reducir la THD. En recientes años se han implementado los métodos metaheurísticos para reducir la THD muy cercana a la óptima, entre estos métodos ha destacado el algoritmo de Evolución Diferencial, ya que por su fácil implementación y rápida convergencia a destacado en diversas áreas de la investigación.

En este artículo se presenta la aplicación del algoritmo de ED para resolver un problema de optimización con la finalidad de minimizar la THD en un inversor CHBMLI monofásico de siete niveles, obteniendo los ángulos óptimos de conmutación.

Además, se realizó un análisis de la influencia de la variación de los principales parámetros de inicialización (NP , G , F y Cr) del algoritmo de ED con la finalidad de identificar el conjunto de parámetros más adecuados para lograr un desempeño satisfactorio del algoritmo obteniendo un menor tiempo de ejecución para el cálculo de los ángulos de conmutación óptimos para el inversor multinivel, y al mismo tiempo una menor THD.

Para el caso de estudio establecido en este trabajo, la combinación de parámetros que mejor se desempeñó fue $F = 0.3$, $Cr = 0.9$, $G = 50$, y $NP = 50$ esta combinación obtuvo un menor tiempo de ejecución y una rápida convergencia.

Posteriormente, se procedió a analizar el espectro armónico de la señal de salida del inversor mediante simulación obteniendo una $THD = 10.46\%$ y compararlo con el valor de $THD = 10.43\%$ que arrojó el algoritmo de ED. Al realizar la comparación entre ambos valores de THD existe una diferencia despreciable de 0.03% entre el valor obtenido en la simulación y el valor arrojado por el algoritmo de ED.

El algoritmo de ED es un método metaheurístico potente y eficiente para resolver las ecuaciones no lineales trascendentales con alta precisión para la búsqueda de las soluciones óptimas con un costo computacional reducido, por esta razón su aplicación se ha extendido a diversas áreas de la ciencia.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bilal, Pant, M., Zaheer, H., Garcia-Hernandez, L. & Abraham, A., (2020). Differential Evolution: A review of more than two decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 90.
- [2] Amjad, A. M., Salam, Z. & Saif, A. M. A., (2015). Application of differential evolution for cascaded multilevel VSI with harmonics elimination PWM switching. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 447-456.
- [3] Blum, C., Roli, A. & Alba, E., (2005). An Introduction To Metaheuristic Techniques. In: Zomaya, A. Y. (Ed.) *Parallel Metaheuristics A New Class Of Algorithms* A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [4] Castillo, E. J., (2019). Esquema Adaptativo para el Manejo de Restricciones de Límite en Problemas de Optimización Numérica Restringida. Doctorado, Universidad Veracruzana.
- [5] Hamzah, H. H., Ponniran, A., Kasiran, A. N., Harimon, M. A., Gendum, D. A. & Yatim, M. H., (2018). 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.

- [6] De León, S., Calleja, H. & Aguayo, J., (2015). Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 6791-6803.
- [7] Gutiérrez, D., López, J. M. & Villa, W. M., (2016). Metaheuristic Techniques Applied To The Optimal Reactive Power Dispatch: A Review. *IEEE Latin America Transactions*.
- [8] Juárez Castillo, E., Pérez Castro, N. & Mezura Montes, E. (2017). An Improved Centroid-Based Boundary Constraint-Handling Method in Differential Evolution for Constrained Optimization. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 31.
- [9] Kabalcı, E., (2021). Multilevel Inverters Introduction and Emergent Topologies. In: KABALCı, E. (ed.) *Multilevel Inverters*.
- [10] Malik, H., Iqbal, A., Joshi, P. & Bakhsh, F. I., (2021). *Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications*.
- [11] Majed, A., Salam, Z. & Amjad, A. M., (2017). Harmonics elimination PWM based direct control for 23-level multilevel distribution STATCOM using differential evolution algorithm. *Electric Power Systems Research*, 152, 48-60
- [12] Medina, I. R., (2014). *Algoritmos bioinspirados: Una revisión según sus fundamentos biológicos.*, University of Manchester.
- [13] Mezura Montes, E., Miranda Varela, M. E. & Del Carmen Gómez Ramón, R., (2010). Differential evolution in constrained numerical optimization: An empirical study. *Information Sciences*, 180, 4223-4262.
- [14] Montes, E. M., (2006). Paradigmas emergentes en algoritmos bio-inspirados. In: ALFAOMEGA (ed.) *Inteligencia Artificial*. Alfaomega.
- [15] Naidu, P. A. & Singh, V., (2018). Speed control of induction motor and control of multilevel inverter output with optimal PI controller using DE and GSA optimization technique 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES).
- [16] Patil, S. D. & Kadwane, S. G., (2017). Application of Optimization Technique in SHE Controlled Multilevel Inverter. *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017)*.

- [17] Price, K., Storn, R. & Lampinen, J., (2005). *Differential Evolution A practical Approach to Global Optimization*, Alemania.
- [18] Sánchez Vargas, O., De León Aldaco, S. E., Aguayo Alquicira, J. & López-Núñez, A. R., (2021). *Evolutionary Metaheuristic Methods Applied to Minimize the THD in Inverters: A Systematic Review*. *European Journal of Electrical Engineering*, 23, 237-245.
- [19] Salam, Z., Amjad, A. M. & Majed, A., (2013). *Using Differential Evolution to Solve the Harmonic Elimination Pulse Width Modulation for Five Level Cascaded Multilevel Voltage Source Inverter*. 2013 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation. Kota Kinabalu, Malaysia.
- [20] Salam, Z., Majed, A. & Amjad, A. M., (2015). *Design and implementation of 15-level cascaded multi-level voltage source inverter with harmonics elimination pulse-width modulation using differential evolution method*. *IET Power Electronics*, 8, 1740-1748.
- [21] Stonier, A. A., Chinnaraj, G., Kannan, R. & Mani, G., (2020). *Investigation and validation of an eleven level symmetric modular multilevel inverter using grey wolf optimization and differential evolution control algorithm for solar PV applications*. *Circuit World*, ahead-of-print.
- [22] Ronkkonen, J., Kukkonen, S. & Price, K. V., (2005). *Real-Parameter Optimization with Differential Evolution*. 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Edinburgh, UK.
- [23] Wei, S., Wu, B., Li, F. & Sun, X., (2003). *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.
- [24] Zhang, J. & Sanderson, A. C., (2009). *Adaptive Differential Evolution A Robust Approach to Multimodal Problem Optimization*.