



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Cálculo de los ángulos de conmutación para un convertidor
multinivel en cascada utilizando el algoritmo de Evolución
Diferencial**

presentada por
Ing. Oscar Sánchez Vargas

como requisito para la obtención del grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dra. Susana E. De León Aldaco

Codirector de tesis
Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2022.



Cuernavaca, Mor
No. de Oficio:
Asunto:

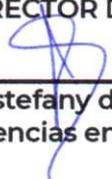
08/diciembre/2021
DIE/178/2021
Aceptación de
documentos de tesis do

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del Ing. Oscar Sánchez Vargas, con número de control M20CE023 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Cálculo de los Ángulos de Conmutación para un Convertidor Multinivel en Cascada Utilizando el Algoritmo de Evolución Diferencial" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

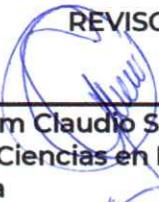
CODIRECTOR DE TESIS


Dra. Susana Estefany de León Aldaco
Doctora en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 10458245


Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1

REVISOR 2


Dr. Abraham Claudio Sánchez
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 7675050


Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 10458246

C.p. M.E. Guadalupe Carrido Rivera- Jefa de Departamento de Ingeniería Electrónica
Estudiante
Expediente

HEE/mrsr.

SEP TecNM CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO





Cuernavaca, Mor.,
No. de Oficio:
Asunto:

15/diciembre/2021
SAC/170/2021
Autorización de
impresión de tesis

**OSCAR SÁNCHEZ VARGAS
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Cálculo de los Ángulos de Conmutación para un Convertidor Multinivel en Cascada Utilizando el Algoritmo de Evolución Diferencial", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Excelencia en Educación Tecnológica"
"Educación Tecnológica al Servicio de México"

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CMAZ/CHG

Agradecimientos

A mi asesora la Dra. Susana E. De León Aldaco por el tiempo, paciencia, el conocimiento y los jalones de oreja que me daba cuando más se necesitaba, durante el desarrollo de este trabajo de tesis. Así mismo por la oportunidad y la disponibilidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico cuando más lo necesitaba.

A mi co-asesor el Dr. Jesús Aguayo Alquicira por el tiempo, el conocimiento, las clases y el soporte que me brindó para el desarrollo de la tesis.

A mis revisores de tesis el Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez y el Dr. Abraham Claudio Sánchez por sus comentarios y apoyo para mejorar esta tesis.

A la Lic. Lorena Ruiz Ramírez, por su apoyo en los trámites de titulación y su valiosa ayuda, así como al personal académico y administrativo por el apoyo recibido durante mi estancia en este centro de investigación.

A todos mis compañeros de la maestría (Cachorro, Brandon, Juanito, Carlitos y Chiquilín) que de no ser por ellos no hubiera tenido uno de mis mejores años así y haber sacado la maestría.

A mi padre Oscar Sánchez Dorantes y sobre todo a mi madre Patricia Vargas Suárez, por brindarme su amor, dedicación y la paciencia con la que cada día se preocuparon por mi salud. Siendo ellos unos de los pilares para continuar, por confiar y tener siempre expectativas buenas hacia mi persona.

A mi hermana Jimena y mi cuñado Josa por su apoyo incondicional, y aliento que me brindaron que, aunque no tenían tiempo o conocimiento alguno de ciertos temas en específico me brindaron apoyo.

A mi sobrino Nicolas, siendo tan alegre y vivaz, por brindarme tantas alegrías.

A mi amigo Daniel Arámbula por invitarme y animarme a entrar a la maestría, de no ser por el no habría logrado y pasado esta magnífica etapa.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en el área de maestría en ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme apoyo económico para realizar la maestría.

Resumen

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

Este trabajo de tesis presenta el algoritmo de Evolución Diferencial (ED) para encontrar los ángulos de conmutación óptimos en el inversor multinivel en cascada de siete niveles para eliminar los armónicos de orden inferior y reducir de forma significativa la THD en el voltaje de salida, así como encontrar un balance entre la THD y el Índice Modular (Mi) adecuado.

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. El índice modular es la relación entre la tensión fundamental de salida y la tensión fundamental máxima obtenida, si el Mi tiene un valor mayor a uno, genera una sobre modulación, por lo que afecta al equipo que se tiene a la salida. Lo que es necesario encontrar una THD y Mi adecuados, sin que se afecte uno al otro.

También este trabajo de tesis se centra en la búsqueda de los parámetros evolutivos iniciales del algoritmo de ED, para la observación y análisis de las combinaciones generadas, para discutir cual combinación se desempeña mejor, tanto en rapidez como fiabilidad, para encontrar una THD mínima casi óptima.

Además, se realizó una simulación de un inversor multinivel en cascada de siete niveles con carga RL en Simulink para validar los resultados de los ángulos obtenidos anteriormente. Con la simulación realizada obteniendo una THD de 10.46%, se realizó la implementación al algoritmo de ED la búsqueda de los ángulos de conmutación en conjunto para obtener una Mi definida por el usuario, dando múltiples combinaciones de ángulos que satisfacen el objetivo de obtener el Mi deseado, pero diferentes THD's, en algunas superando bastante al porcentaje del THD obtenido, o en caso contrario encontrando una THD cercana a la mínima, pero con un Mi insatisfactorio.

Dando al final un análisis de todos los resultados y combinaciones obtenidas con el algoritmo de evolución diferencial, así como la THD vs Mi.

Abstract

In the calculation of switching angles in multilevel inverters, metaheuristic methods have been used to effectively minimize total harmonic distortion (THD), as they provide calculation time and effective results. Within these methods, the differential evolution has been the metaheuristic method that in recent years and in several research, works has been implemented for the fast and effective reduction of THD.

This thesis work presents the Differential Evolution (DE) algorithm to find the optimal switching angles in the seven-level cascaded multilevel inverter to eliminate the lower order harmonics and significantly reduce the THD in the output voltage, as well as to find a balance between THD and the appropriate Modular Index (Mi).

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. The modulation index is the ratio of the fundamental output voltage to the maximum fundamental voltage obtained. If the Mi is greater than one, it generates an over-modulation, thus affecting the equipment at the output. So, it is necessary to find a suitable THD and Mi, without affecting each other,

Also, this thesis work focuses on the search for the initial evolutionary parameters of the ED algorithm, for the observation and analysis of the generated combinations, to discuss which combination performs better, both in speed and reliability to find a near-optimal minimum THD.

In the same way, a simulation of a seven-level cascaded multilevel inverter with RL load was performed in Simulink to validate the results of the previously obtained angles. With the simulation performed obtaining a THD of 10.46%, the ED algorithm was implemented to search for the switching angles in conjunction with obtaining a user-defined Mi, giving multiple combinations of angles that satisfy the objective of obtaining the desired Mi, but different THD's, some exceeding the percentage of THD obtained, or otherwise finding a THD close to the minimum, but with an unsatisfactory Mi.

At the end we give an analysis of all the results and combinations obtained with the differential evolution algorithm, as well as the THD vs Mi.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Tabla de contenido	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	viii
Acrónimos	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Marco Teórico	2
1.1.1 Inversores.....	2
1.1.2 Inversores Multinivel.....	3
1.1.3 Modulación	4
1.2 Problemática	5
1.2.1 Introducción a métodos metaheurísticos	5
1.2.2 Aspectos de los MLI's y los metaheurísticos que influyen en la salida. 6	6
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo Principal.....	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
Capítulo 2. Estado del arte.....	9
2.1 Clasificación de métodos metaheurísticos	9
2.2 Problema de optimización	11
2.3 Resultados del Estado del arte.....	12
2.4 Conclusión del Estado del Arte	23
Capítulo 3. Caso de estudio.....	24
3.1 Características y diseño del CHBMLI.....	25
3.2 Evolución Diferencial.....	25
3.2.1 Etapas de ED.....	26
3.2.2 Programación de ED	29
3.2.3 Manejo de restricciones.....	30

Capítulo 4. Variación de parámetros.....	32
Capítulo 5. Simulación y Resultados.....	40
5.1 Análisis de simulación del CHBMLI Matlab	40
5.2 Resultados de simulación	42
5.3 THD vs Mi.....	42
Capítulo 6. Conclusiones	47
6.1 Conclusiones.....	47
6.2 Trabajos Futuros	48
6.3 Productos académicos	48
Referencias	49
Anexo A. Código del algoritmo de ED s	56
Anexo B. Modulación del CHBMLI siete niveles.....	59
Anexo C. Pulsos en la salida de la etapa moduladora del inversor	60
Anexo D. Modificación función objetivo, para cálculo del Mi.....	62
Anexo E. Artículo publicado en la revista IETA	63
Anexo F. Artículo aceptado para el congreso de la UAM para la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE).....	64
Anexo G Artículo aceptado para el congreso de la UAM para la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE).....	65

Índice de Figuras

Figura 1.1 Clasificación de los inversores [4].	3
Figura 1.2 Clasificación de los métodos de modulación multinivel [6].	5
Figura 2.1 Clasificación de los métodos metaheurísticos	10
Figura 2.2 Número de artículos que utilizan algoritmos de optimización en los inversores multinivel	14
Figura 2.3 Distribución de los métodos metaheurísticos aplicados a la optimización de inversores multinivel.	15
Figura 2.4 Distribución de publicaciones con algoritmos evolutivos	15
Figura 2.5 Distribución de publicaciones con inteligencia de enjambre	16
Figura 2.6 Distribución de publicaciones en la categoría de reino animal	16
Figura 2.7 Distribución de publicaciones de numero de niveles de un inversor.	17
Figura 2.8 Distribución de publicaciones de las topologías utilizadas	18
Figura 2.9 Distribución de publicaciones del número de fases utilizadas	19
Figura 2.10 Distribución de publicaciones del tipo de cargas	19
Figura 2.11 Distribución de publicaciones de configuración Off/On-line	20
Figura 3.1 Inversor CHBMLI con carga RL [5].	24
Figura 3.2 Diagrama de las etapas de la Evolución Diferencial	26
Figura 3.3 Selección de 3 vectores al azar (X_1 , X_2 y X_3) y la creación del vector diferencia[85].	27
Figura 3.4 Multiplicación del vector diferencia con el factor escala F y la suma del vector base[85].	28
Figura 3.5 Etapa de recombinación o cruce, con un problema de dimensión $D=7$ [85].	29
Figura 3.6 Función objetivo para MLI 7 niveles con las restricciones.	30
Figura 4.1 Gráfica de THD vs Factor escala (F)	33
Figura 4.2 Máximo número de generaciones para converger en la menor THD posible.	34
Figura 4.3 Interacción de los parámetros (F y Cr) en relación con el tiempo de ejecución.	35
Figura 4.4 Interacción de los parámetros N_p y G en relación con el tiempo de ejecución.	36
Figura 4.5 Interacción de los parámetros N_p y G en relación con el %THD.	37

Figura 4.6 Diagrama de verificación de parámetros del algoritmo ED para el caso de estudio.....	38
Figura 5.1 Diagrama esquemático para la simulación CHBMLI Simulink.....	40
Figura 5.2 Voltaje de salida del inversor CHBMLI de siete niveles Simulink.....	41
Figura 5.3 Corriente de salida del inversor CHBMLI de siete niveles.....	41
Figura 5.4 Espectro de armónicos para forma de onda de voltaje de salida en la carga.	42
Figura 5.5 Diagrama verificación de parámetros del algoritmo ED con MI.....	44
Figura 5.6 Ángulos vs M_i en simulación CHBMLI simulink.....	45
Figura 5.7 THD vs M_i en simulación CHBMLI simulink	46
Figura A.1 Bloque de modulación CHBMLI siete niveles.	59
Figura A.2 A) Pulsos P1, P2, P5, P6, P9, P10 generados a la salida	60
Figura A.2 B) Pulsos P3, P4, P7, P8, P11, P12 generados a la salida	61

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Clasificación y metodologías de optimización aplicadas a inversores multinivel.	13
Tabla 2.2 Tabla de los artículos con inversor multinivel CHBMLI con carga RL que utilizan ED.	21
Tabla 2.3 Tabla donde muestra la minimización del THD con carga RL, comparando métodos metaheurísticos con ED.	21
Tabla 3.1 Parámetros más destacables para el diseño del CHBMLI en Matlab.	25
Tabla 4.1 Tabla de los artículos con inversor multinivel CHBMLI que utilizan ED.	32
Tabla 4.2 Valores de los parámetros para el algoritmo de Evolución Diferencial. .	38
Tabla 4.3 Ángulos óptimos de conmutación obtenidos por el algoritmo de ED para el caso de estudio con tres ángulos de disparo.	39
Tabla 5.1 Valores de los parámetros para ED con Mi.	43

Acrónimos

ASD	Variador de Velocidad
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CD	Corriente Directa
CHBMLI	Inversor Multinivel en Cascada Puente H
Cr	Factor de cruza
CSI	Inversor de Fuente de Corriente
DCMLI	Inversor Multinivel con Diodos Enclavados
ED	Evolución Diferencial
EMI	Interferencias Electromagnéticas
F	Factor escala
FCMLI	Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes
G	Generación
IGBT	Transistor Bipolar de Compuerta Aislada
Mi	Índice de Modulación
MLI's	Inversores Multinivel
Np	Población
OMTHD	Minimización Óptima de la Distorsión Armónica Total
PSO	Optimización por Enjambre de Partículas
PWM	Modulador de Ancho de Pulso
SHE	Eliminación Selectiva de Armónicos
SPWM	Modulación de Ancho de Pulso Sinusoidal
STACTCOM's	Compensadores Estáticos
SVPWM	Modulación de Espacio Vectorial
THD	Distorsión Armónica Total
UPS's	Sistemas de Alimentación Ininterrumpida
VSI	Inversor de fuente de voltaje

Capítulo 1. Introducción

Los inversores multinivel (MLI's, por sus siglas en inglés Multilevel Inverter) son dispositivos de potencia alternativos mejorados, para superar los inconvenientes de los inversores normales de dos niveles (inversores convencionales o tradicionales), proporcionan un mayor número de niveles de salida en las formas de onda de voltaje y de corriente. 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[1].

Los MLI's poseen las ventajas de sintetizar niveles de voltaje más altos con menor potencia, para alcanzar potencias elevadas, 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 enclavados (DCMLI siglas en inglés de Diode Clamped Multilevel Inverter).
- Inversor multinivel con capacitores 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, Sinusoidal Pulse Width Modulation) y las técnicas de modulación por ancho de pulso de espacios vectoriales (SVPWM, Space Vector Pulse Width Modulation) [2].

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 es una de las principales problemáticas para obtener los ángulos óptimos de conmutación para alcanzar un menor porcentaje de THD.

Es importante reducir eficazmente la THD porque la presencia de armónicos en los motores provoca un calentamiento, causando pérdidas en el núcleo, además de provocar pares parásitos en el eje, causando pares pulsantes, como resultado de los cuales el motor se degrada rápidamente. En los equipos electrónicos, provocan una distorsión de las tensiones en los nodos de alimentación, causando un mal funcionamiento en los dispositivos sensibles. En los conductores generan un aumento de la corriente, provocando el calentamiento de los cables y pérdidas térmicas [3, 4]. En los capacitores, crean resonancias paralelas en el sistema y una amplificación de los armónicos que provoca el calentamiento y el envejecimiento prematuro de los capacitores[5].

Para reducir la THD, se han utilizado los métodos clásicos. En los últimos años se han investigado e implementado los métodos metaheurísticos de optimización para la solución de las 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” [6]. Estos encuentran una solución más cercana a la óptima, pero con un tiempo reducido, que compensa la precisión de la solución con el tiempo de cálculo.

1.1 Marco Teórico

1.1.1 Inversores

Los dispositivos convertidores de CC-CA, también conocidos como inversores, se utilizan para convertir la alimentación de CC a su entrada a una forma de onda de CA en la salida. Dependiendo del tipo de suministro (voltaje o corriente) este determina la definición del inversor, como inversor de fuente de corriente (CSI, Current Source Inverter) o inversor de fuente de voltaje (VSI, Voltage Source Inverter). El tipo de inversor también determina la forma de onda controlada en la salida, en el caso que sea un CSI para controlar la fuente de corriente o un VSI para controlar la fuente de voltaje. Aunque mayoría de los inversores utilizados en la industria, el sector residencial y otras áreas son VSI.

Los principales usos de los inversores son los variadores de velocidad (ASD, Adjustable-Speed Drive) para motores de CA, sistemas de calefacción por inducción, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS's), varias fuentes de corriente continua, accionamientos de control de tracción y los recientes accionamientos controlados por vectores en

aplicaciones industriales. Además de las aplicaciones industriales, los inversores se utilizan ampliamente en la generación, transmisión, distribución e integración de fuentes de energía renovable [1].

Las topologías de dispositivos pueden clasificarse en dos categorías principales: topologías de que se construyen con la estructura convencional, y las topologías multinivel que proporcionan varias ventajas frente a la topología de dos niveles.

1.1.2 Inversores Multinivel

Los MLI's son inversores que sintetizan varios niveles de voltaje continua en una sola señal. Conforme aumenta el número de fuentes a la entrada del inversor, mayor número de niveles tiene la forma de onda a la salida, lo cual produce una forma de onda escalonada que se aproxima a una señal sinusoidal. Lo que conlleva una menor tensión en los dispositivos de conmutación, menores coeficientes dv/dt , una disminución del ruido de las interferencias electromagnéticas (EMI, ElectroMagnetic Interference) y de la distorsión armónica total (THD, Total Harmonic Distortion), en comparación con la topología de dos niveles. A continuación, en la Figura 1.1 se observa la clasificación de los inversores [7]:

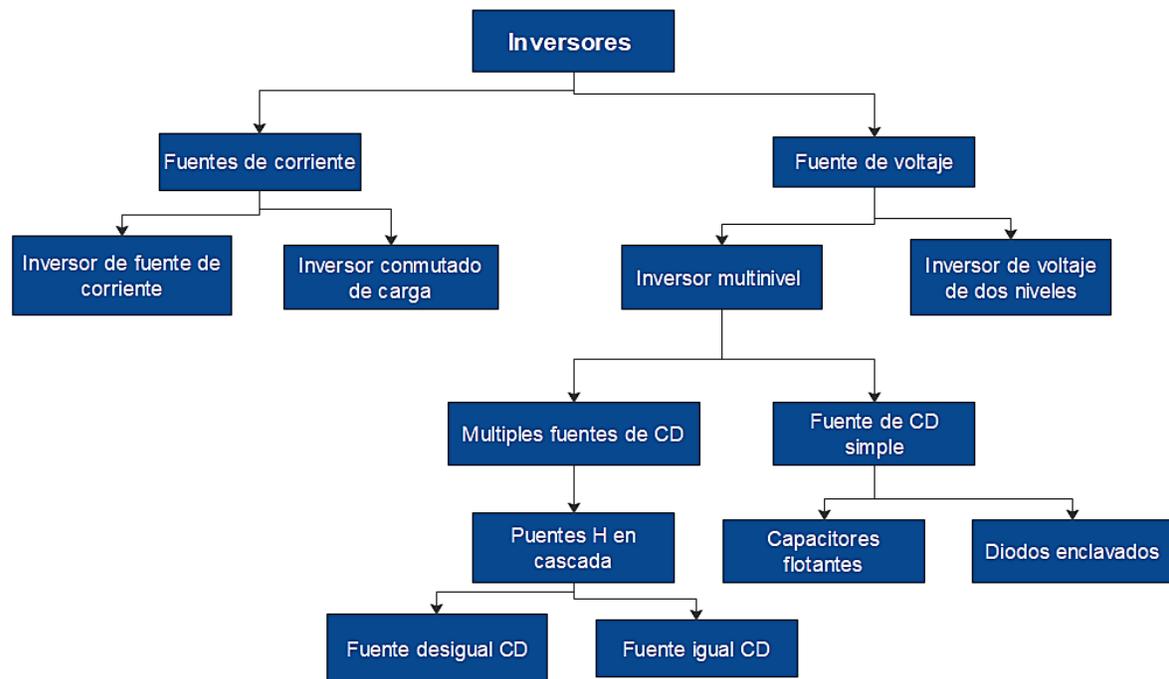


Figura 1.1 Clasificación de los inversores [7].

Como se mencionó anteriormente los MLI's se pueden clasificar en tres topologías:

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

La topología CHBMLI, es esencialmente una simple serie de conexiones del circuito inversor de puente H. En resumen, el MLI con diodos enclavados utiliza un arreglo de banco de capacitores, mientras que, en el MLI de condensadores flotantes, se aplican unos "condensadores flotantes" como restricción del voltaje producido. Los inversores de puente H básicos requieren transformadores aislados, mientras que el MLI de puente H en cascada se diseñó con varias fuentes de entrada de CC aisladas. En el MLI en cascada tiene diversas ventajas, tiene un control sencillo, utiliza cualquier técnica PWM, y la reconfiguración de la modulación permite compensar alguna falla. Por lo tanto, el MLI en cascada se ha hecho popular [8, 9].

1.1.3 Modulación

Los métodos de modulación determinan las relaciones THD, los índices de voltaje y frecuencia del voltaje de salida.

La forma de onda escalonada de salida del MLI se genera mediante los múltiples conmutadores en la topología, y depende del control del modulador, que genera señales de conmutación en tasas de ciclo de trabajo. Los métodos de conmutación se describen como conmutación de frecuencia fundamental o baja frecuencia de conmutación y conmutación de alta frecuencia[6].

Los métodos de modulación se pueden clasificar de acuerdo por la frecuencia de conmutación que se muestra en la Figura 1.2 [10].

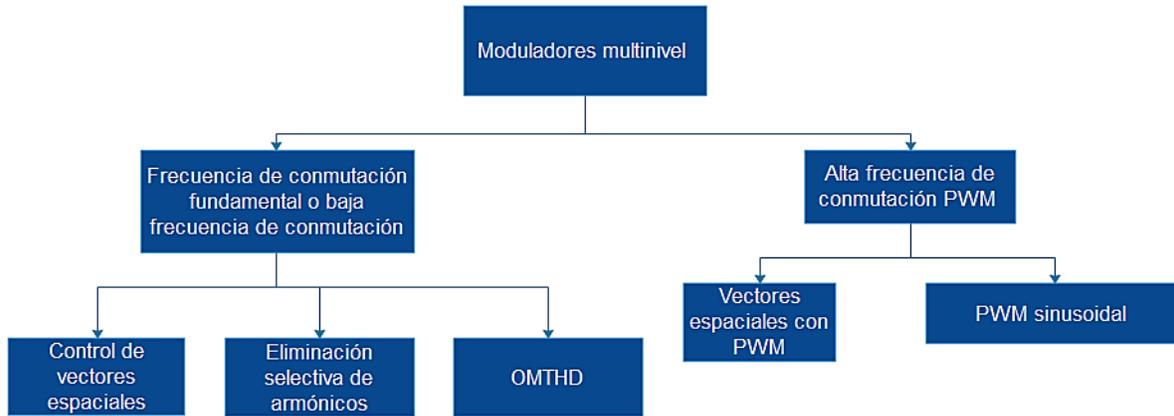


Figura 1.2 Clasificación de los métodos de modulación multinivel [10].

El control y el funcionamiento de los MLI's suelen realizarse mediante técnicas PWM mejoradas con características adicionales para eliminar el contenido armónico y aumentar la eficiencia. Los métodos más utilizados se han resumido como SPWM, Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE-PWM, Selective Harmonic Elimination) y SVPWM. Aunque estos métodos se han utilizado a lo largo de varios años, una amplia gama de nuevos esquemas de modulación se ha estado estudiando en años recientes, incluyendo métodos de control adicionales.

Varios de los nuevos métodos de modulación pertenecen a la minimización óptima de la distorsión armónica total u OMTHD (Optimal Minimization of Total Harmonic Distortion). Lo principal de este método, es ajustar la conmutación para minimizar la THD en el voltaje de salida[2].

Los esquemas mencionados se asumen como los controladores fundamentales, mientras que los nuevos controladores se mejoran con la ayuda de controladores de lógica difusa, métodos metaheurísticos y métodos de soft-computing [6].

1.2 Problemática

1.2.1 Introducción a métodos metaheurísticos

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” [6].

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 [6]. También pueden ir desde procedimientos simples de búsqueda local hasta procesos de aprendizaje complejos.

Como se menciona anteriormente, en los últimos años para la minimización de la THD en los MLI's se han utilizado nuevos métodos de modulación para reducir los armónicos.

1.2.2 Aspectos de los MLI's y los metaheurísticos que influyen en la salida.

El índice modular o índice de modulación (M_i , Modulex Index) se obtiene de la tensión fundamental entre el número de ángulos de conmutación.

Para un $M_i < 0.6$, no se buscan soluciones, ya que se pueden resolver con un inversor de dos niveles o uno de un nivel inferior al que se desea diseñar. Además, para un $M_i > 1.27$ se debe utilizar un MLI de siete o más niveles, porque el inversor multinivel ha alcanzado su límite de modulación [11].

Debido a la naturaleza escalonada de la forma de onda de salida del inversor multinivel, las trayectorias de los diversos ángulos de conmutación para todo el rango del índice modular no pueden ser cubiertas por solo un único conjunto de ángulos. Por lo tanto, se utilizan varias relaciones de distribución obteniendo así soluciones continuas para un rango más amplio de M_i [12].

En diversos artículos, mencionan realizar un barrido del M_i , y obteniendo resultados de una THD mínima, pero utilizando un $M_i > 1$, [11, 13, 14], lo cual puede producir una sobre modulación y solo consideraron utilizar el %THD mínimo encontrado.

En otros artículos [15-18], coincidentemente el %THD mínimo que se encontró tenía un $M_i > 0.6$ y < 1 . Pero revisando los ángulos encontrados en los artículos que coinciden en el número de niveles (7) obtienen un conjunto de ángulos de conmutación diferentes entre sí. También en otros artículos no mencionan que M_i utilizaron. Obviando que tienen diferentes niveles, cargas y fases implementados en los MLI's.

En los métodos metaheurísticos las posibilidades de convergencia para encontrar un conjunto de soluciones aumentan si se utilizan o varían los valores de los parámetros evolutivos. En el caso de soluciones múltiples en los MLI's, se seleccionan los ángulos que producen el mejor perfil de armónicos. Si esta configuración no produce los resultados deseados, la convergencia es muy pobre.

Dependiendo del tipo de método metaheurístico, este varía su nombre y la influencia de sus parámetros en la búsqueda de los ángulos de conmutación deseados. Para el caso de ED, los parámetros evolutivos influyen en la rapidez de convergencia en la exploración del espacio de búsqueda. Pocos artículos plantean o definen cuáles parámetros utilizaron y su efectividad para la resolución del problema de optimización [11, 14, 18-21].

Anteriormente se mencionó que los parámetros evolutivos influyen en la rapidez de convergencia, este es un aspecto muy importante en los algoritmos evolutivos, ya que dependiendo de tan rápido el algoritmo “busca” en el espacio de búsqueda, tiende a encontrar ángulos de conmutación óptimos para el MLI. Pero solo dos artículos muestran el tiempo que se llevaron a cabo sus procesos, en [15] se tomó un tiempo de 1274.46 segundos del proceso de cómputo para la búsqueda de los ángulos de conmutación junto con el Mi correspondiente. Mientras que en [17] se llevó un tiempo aproximado de 11.3 segundos. En [22], se lleva a cabo la comparación de varios métodos metaheurísticos y el proceso ronda entre los 11.19 a los 26.3 segundos, con un Mi de 0.73, ya que como se mencionó antes fue el Mi que se obtuvo con un %THD mínima.

Se observó en los artículos la influencia de estos aspectos al momento de encontrar de manera eficiente los ángulos de conmutación. Estos deben satisfacer en obtener un %THD baja, pero con un Mi viable, empezando por encontrar el balance entre rapidez y confiabilidad en los parámetros evolutivos.

El problema por abordar en este trabajo de investigación consiste en poner a prueba los recientes métodos metaheurísticos, sobre todo el algoritmo de evolución diferencial aplicado al área de los inversores multinivel, para optimizar los parámetros evolutivos que presenta el algoritmo, en términos de una función objetivo, para simular los ángulos de conmutación obtenidos con la implementación del algoritmo en un inversor multinivel y observar los resultados obtenidos, posteriormente documentarlos y discutirlos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal

Caracterización e implementación de un algoritmo de optimización bio-inspirado (Evolución Diferencial) con el objetivo de disminuir el valor de la THD en un inversor multinivel.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Validar mediante simulación el funcionamiento del conjunto de inversor y método de modulación, seleccionado como caso de estudio.
- Caracterizar implementación del conjunto Evolución Diferencial inversor multinivel.
- Desarrollar e implementar un algoritmo de optimización bio-inspirado (Evolución Diferencial) en el conjunto del inversor.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos, para su posterior interpretación y discusión.

Capítulo 2. Estado del arte

El problema más sobresaliente en los inversores multinivel es la dificultad de encontrar la mejor solución de las ecuaciones no lineales trascendentales para obtener los ángulos de conmutación óptimos y reducir de forma significativa el valor de la THD. Asimismo, se requiere de valores iniciales en las ecuaciones no lineales trascendentales bastante eficaces. Para esto, los métodos metaheurísticos pueden conseguir una solución óptima a la problemática de manera más eficiente.

2.1 Clasificación de métodos metaheurísticos

Los métodos metaheurísticos pueden dividirse en dos clases principales: basados en la trayectoria y basados en la población. El término basado en la trayectoria se refiere a un proceso de búsqueda que se caracteriza por seguir una trayectoria en el espacio de búsqueda. Empiezan con una única solución inicial y en cada iteración o paso, la solución actual se sustituye por una solución mejor. Incorporan técnicas que permiten al algoritmo escapar de los mínimos locales. Esto implica la necesidad de diferentes criterios para alcanzar un mínimo local. Comúnmente se utilizan los criterios de tiempo máximo de CPU, un número máximo de iteraciones, una solución de calidad suficiente, o alcanzar el número máximo de iteraciones sin mejorar (por ejemplo, SA siglas en inglés de Simulated Annealing y TS siglas en inglés de Tabu Search).

Mientras que el basado en la población utiliza un conjunto de soluciones también llamado población de soluciones. Estos intentan en cada iteración reemplazar la población para obtener un mejor resultado, para proporcionar una forma natural e intrínseca de explorar el espacio de búsqueda. Sin embargo, el rendimiento final depende de cómo se manipule la población[6, 23].

Los métodos basados en la población tienen un mejor rendimiento para la optimización global [24]. La siguiente figura ofrece una clasificación de los diferentes métodos metaheurísticos:

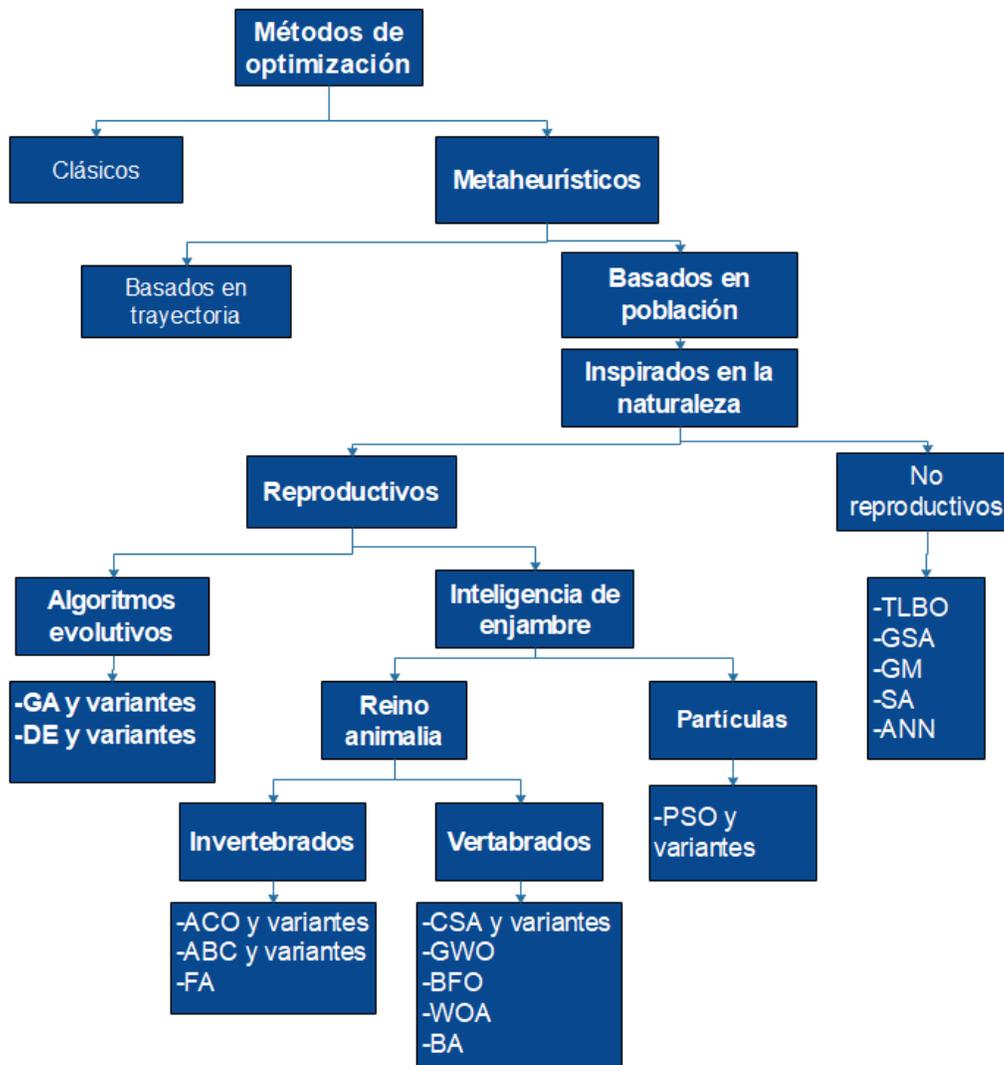


Figura 2.1 Clasificación de los métodos metaheurísticos.

A continuación, se listan los acrónimos de la Figura 2.1 por sus siglas en inglés y consecuente su traducción:

- ❖ GA= Genetic Algorithm (algoritmo genético).
- ❖ DE= Differential Evolution (evolución diferencial).
- ❖ ACO= Ant Colony Optimization (optimización por colonia de hormigas).
- ❖ CSA= Cuckoo Search Algorithm (algoritmo de búsqueda del pájaro cuco¹).
- ❖ ABC= Artificial Bee Colony (Colonia artificial de Abejas).
- ❖ FA= Firefly Algorithm (algoritmo libélula).
- ❖ PSO= Particle Swarm Optimization (optimización por enjambre de partículas).
- ❖ GWO= Greywolf Optimization (algoritmo de lobos grises).

¹ La cría y estrategia de buscar nidos ajenos para poner los huevos del cuco.

- ❖ BFO= Bacterial Foraging Optimization (optimización por forrajeo de bacterias).
- ❖ WOA = Whale Optimization Algorithm (algoritmo de optimización de la ballena).
- ❖ BA= Bat algorithm (Algoritmo murciélago).
- ❖ TLBO= Teaching-Learning-Based Optimization (Optimización basada en enseñanza-aprendizaje).
- ❖ GSA= Gravitational Search Algorithm (algoritmo de búsqueda gravitatoria).
- ❖ GM= Graphical Method (método gráfico).
- ❖ SA= Simulated Annealing (Recocido simulado, cristalización simulada, o enfriamiento simulado).
- ❖ ANN= Artificial Neural Networks (Red o redes neuronales artificiales).

2.2 Problema de optimización

En el inversor la forma de onda escalonada del voltaje de salida se analiza usando la serie de Fourier generalizada que esta expresada en la siguiente ecuación 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:

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

Donde:

V_{dc} = Voltaje de entrada.

V_1, V_2, V_m = Representan las magnitudes de voltaje del primer, segundo y último nivel de voltaje de salida, respectivamente.

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

N = número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo

m = número de fuentes de DC de entrada.

α = ángulo de conmutación.

La calidad de la forma de onda de 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:

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

Donde:

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

V_1 = Representa la magnitud del voltaje fundamental.

V_n es dado por $= \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha_N)$

Sujeto a las siguientes restricciones:

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

Donde n = número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo y α = ángulo de conmutación.

2.3 Resultados del Estado del arte

Para la revisión bibliográfica analizada y clasificada en este trabajo de tesis, se consultaron las bases de datos IEEE Explorer, ScienceDirect, IET Digital Library, Springer y WorldWideScience.

La búsqueda se centró en los métodos de optimización metaheurística aplicados a topologías básicas de inversores multinivel (multinivel en cascada, diodos enclavados y capacitores flotantes), cuya función objetivo era minimizar la THD. Se realizó una búsqueda en la base de datos utilizando palabras clave relacionadas con el enfoque propuesto y buscando artículos publicados a lo largo de 10 años, desde 2010 hasta mediados del 2020. Se revisó y clasificó un universo de publicaciones de 71 artículos [25].

Del universo de publicaciones un 4% de los artículos utilizó métodos de optimización clásicos, mientras que el 96% utilizan métodos metaheurísticos. En la Tabla 2.1 se enumeran las metodologías de optimización utilizadas según su clasificación.

Tabla 2.1 Clasificación y metodologías de optimización aplicadas a inversores multinivel.

Metodología				Función objetivo- Minimizar THD			
Metaheurísticos	Reproductivos	Algoritmos evolutivos		DE y variantes	[11-22, 26-54]		
				GA y variantes	[13, 17, 45, 55-60]		
		Inteligencia de enjambre	Partículas		PSO y variantes	[2, 36, 44-46, 49, 59, 61-68]	
					CSA y variantes	[49, 58, 66, 69-75]	
			Reino animal	Vertebrados	GWO	[21, 58, 76]	
					WOA	[67]	
					BA	[75, 77]	
				Invertebrados	ACO y variantes	[22, 66, 71, 72, 78, 79]	
			ABC y variantes		[22, 69, 73, 74, 80]		
			BFO		[81]		
			No reproductivos			FA	[70, 82]
						TLBO	[22, 49]
				GSA	[19]		
				GM	[45]		
				SA	[75]		
			ANN	[60]			
	Clásicos			NR	[59, 61, 70]		

La Figura 2.2 muestra un histograma de las publicaciones sobre procedimientos de optimización en inversores multinivel durante los últimos 10 años y extrapolado para los años siguientes. Se puede observar que el número de publicaciones ha aumentado significativamente en los últimos años, mostrando una tendencia creciente.

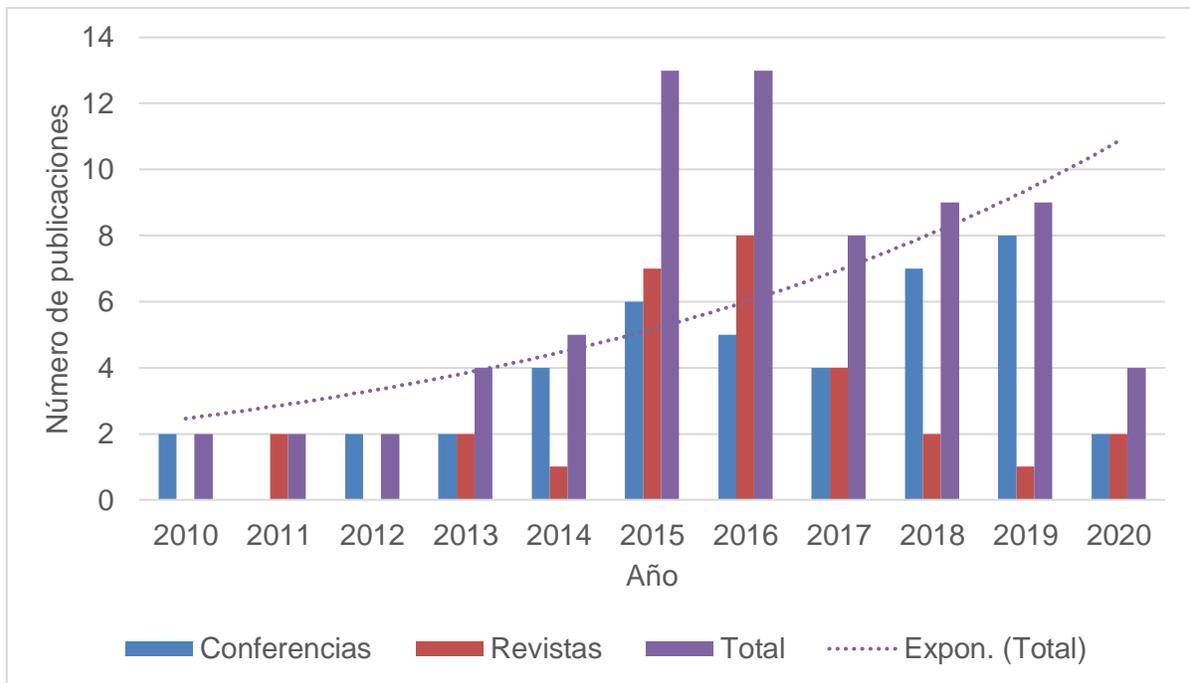


Figura 2.2 Número de artículos que utilizan algoritmos de optimización en los inversores multinivel.

Se revisaron 71 publicaciones, el 59.15% del universo de publicaciones fue de conferencias, mientras que el 40.85% de publicaciones fueron de revistas.

La Figura 2.3 muestra la distribución de publicaciones donde se aplicaron métodos metaheurísticos para reducir la THD en los inversores multinivel, se puede observar que el 95.1% de las publicaciones pertenecen a métodos reproductivos (el 53.8% para algoritmos evolutivos y el 41.3% para inteligencia de enjambre). En el universo de publicaciones analizado sólo el 4.8% de las publicaciones utiliza métodos metaheurísticos no reproductivos.

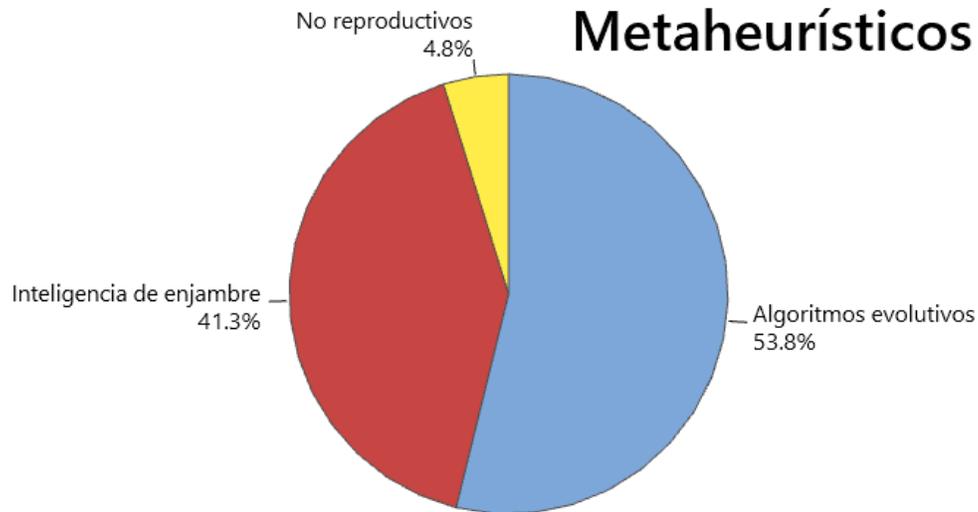


Figura 2.3 Distribución de los métodos metaheurísticos aplicados a la optimización de inversores multinivel.

La Figura 2.4 muestra la distribución de las publicaciones que utilizan algoritmos evolutivos.

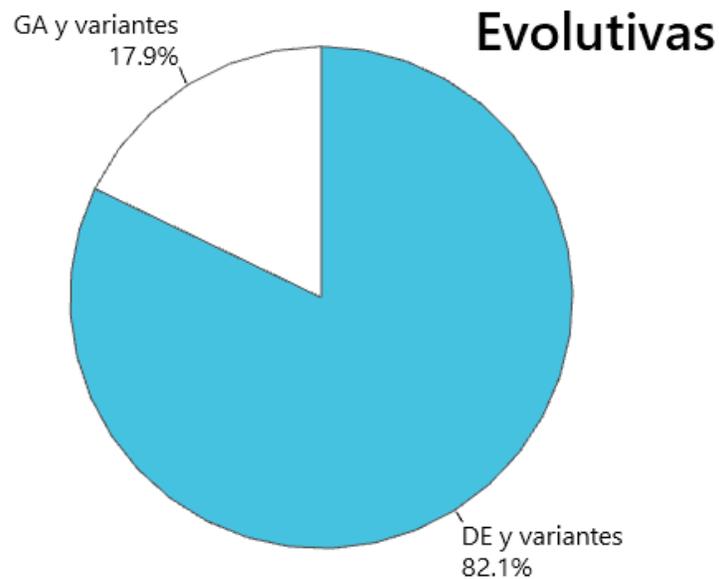


Figura 2.4 Distribución de publicaciones con algoritmos evolutivos.

En la Figura 2.4 se observa que el 82.1% de las publicaciones pertenecen a la evolución diferencial, mientras que el resto fue de algoritmo genético.

Inteligencia de enjambre

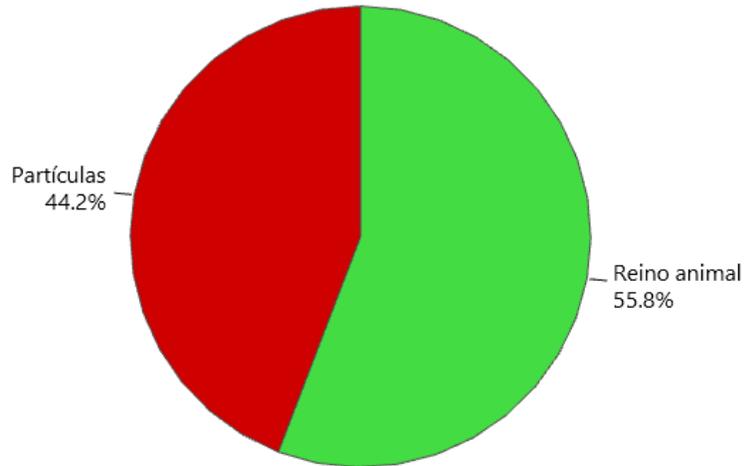


Figura 2.5 Distribución de publicaciones con inteligencia de enjambre.

En la Figura 2.5 se muestran las publicaciones que utilizaron inteligencia de enjambre, la subcategoría de nombre Partículas (PSO, Particle Sawrm Optimization y variantes) aún es muy utilizada y comparada en las publicaciones, ya que representa el 44.2 %.

Reino animal

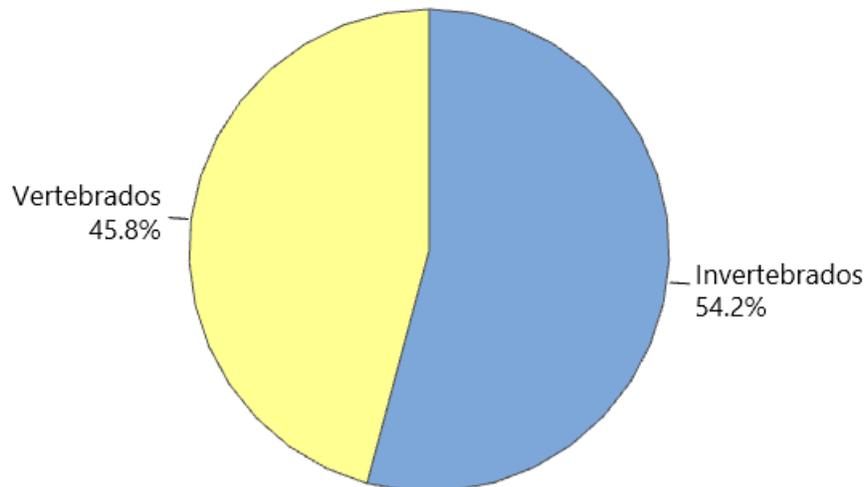


Figura 2.6 Distribución de publicaciones en la categoría de reino animal.

La Figura 2.6 se observa la distribución de la clasificación del reino animalia, los invertebrados tuvieron un 54.2% de mención en el reino animal, mientras que los vertebrados tuvieron un 45.8%.

Uno de los aspectos más importantes a la hora del diseño de un inversor multinivel es la cantidad de niveles que este tendrá. Se anotaron las veces que se mencionan en las publicaciones, y la cantidad de niveles que tiene el MLI, han tenido mejores resultados. La Figura 2.7 se muestra la distribución de niveles que utilizan las publicaciones, observando que el de mayor frecuencia fue el de siete niveles, siguiéndole de cinco y de 11.

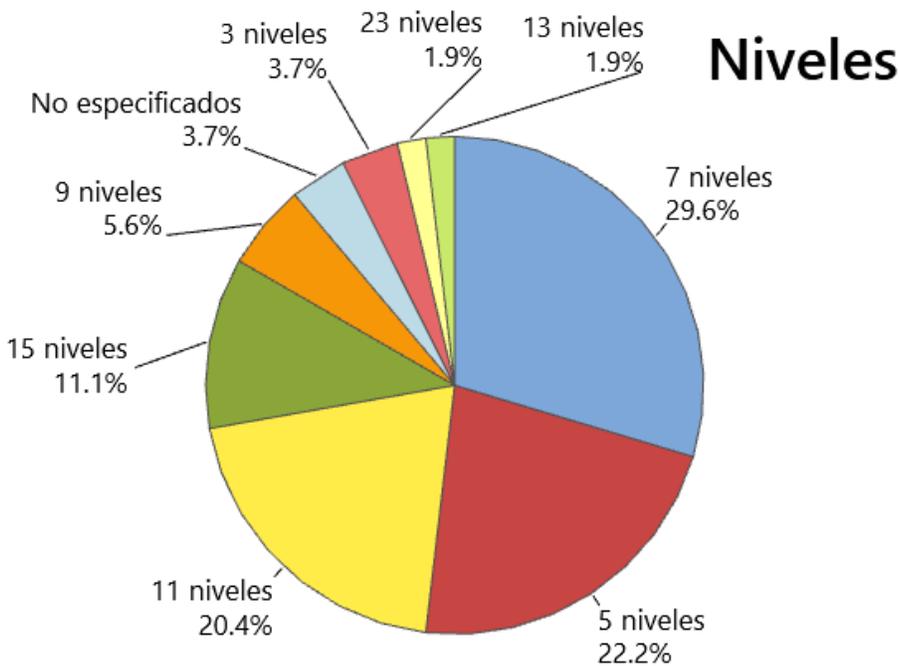


Figura 2.7 Distribución de publicaciones de numero de niveles de un inversor.

Se observa que el 29.6% de las publicaciones opta por un inversor multinivel con siete niveles.

Otro aspecto importante para el diseño de un inversor multinivel es su topología. Por lo cual en la Figura 2.8 se muestra la distribución de publicaciones con las diferentes topologías que se utilizan.

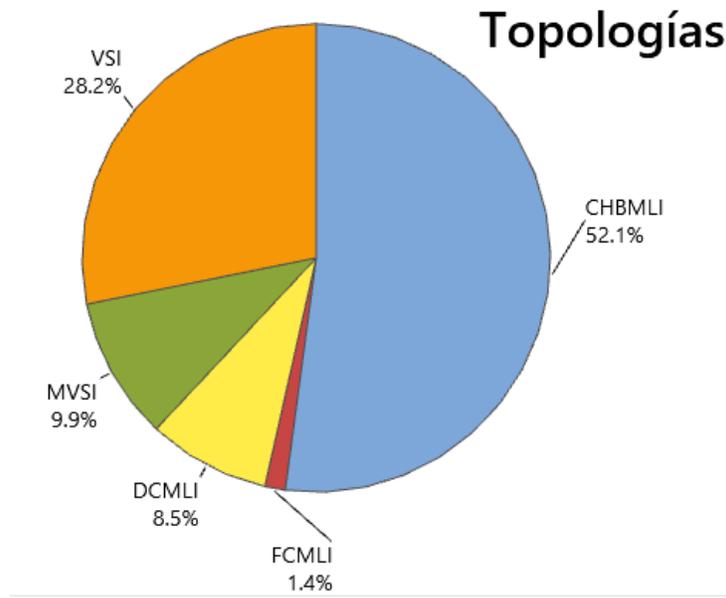


Figura 2.8 Distribución de publicaciones de las topologías utilizadas.

Se enlistan los acrónimos de la Figura 2.8:

- CHBMLI: Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (inversor multinivel en cascada puente H).
- FCMLI: Flying Capacitors Multilevel Inverter (inversor multinivel con capacitores flotantes).
- DCMLI: Diode Clamped Multilevel Inverter (inversor multinivel de diodos enclavados).
- MVSII : Multilevel Voltage Source Inverter (inversor multinivel de fuente de voltaje).
- VSI : Voltage Source Inverter (inversor de fuente de voltaje).

La Figura 2.8 muestra que, en la mayoría de los artículos analizados, el 52.1% utilizaron la topología multinivel en cascada, observándose los diodos enclavados en el 8.5% del universo de publicaciones, mientras que los capacitores flotantes fueron el 1.4%.

La Figura 2.9 muestra el gráfico del universo de publicaciones con las fases de las topologías.

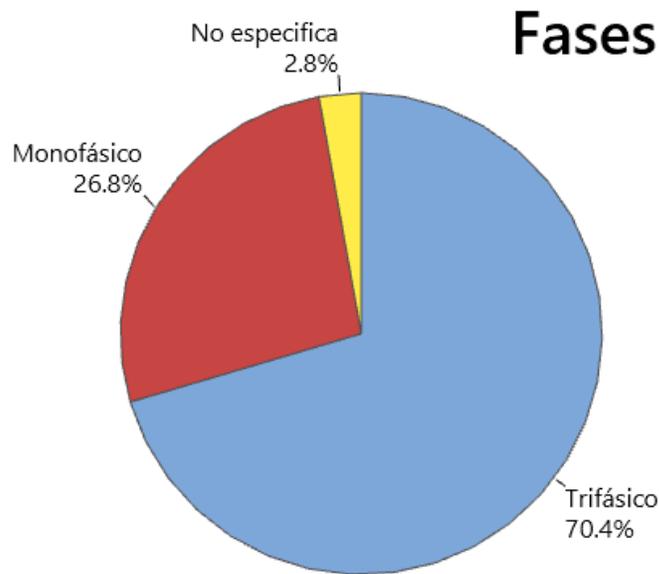


Figura 2.9 Distribución de publicaciones del número de fases utilizadas.

En la Figura 2.9 se observa que la mayoría de las publicaciones utilizaron un inversor trifásico con un 70.4%, mientras que los monofásicos solo tuvieron un 26.8% de presencia.

La Figura 2.10 muestra la distribución y los tipos de cargas a la salida de los MLI's que fueron utilizados en las publicaciones.

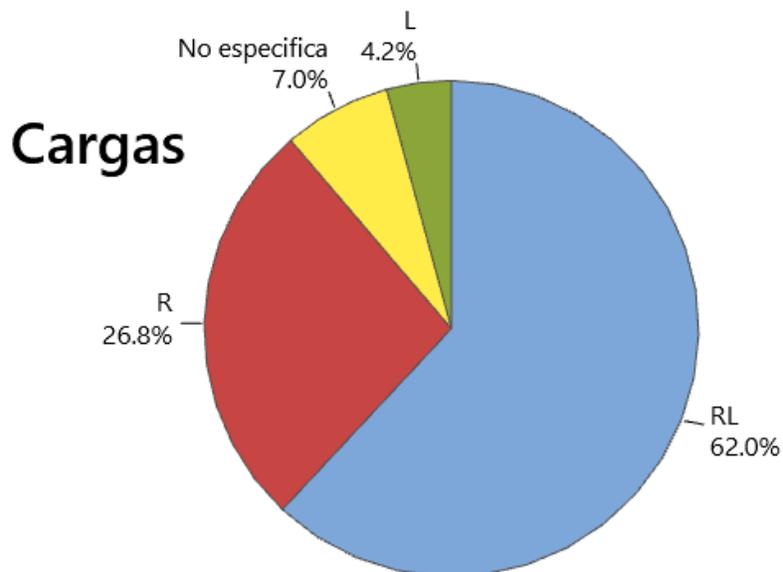


Figura 2.10 Distribución de publicaciones del tipo de cargas.

Se observa en la Figura 2.10 que la carga RL tiene un porcentaje del 62%, la carga R tiene un porcentaje del 26.8%, mientras que la carga L apenas tiene un 4.2%.

Un último aspecto a tener en cuenta en un inversor multinivel es si se realiza Off-line u On-línea, una optimización en línea permite la reestructuración y la adaptación continua mientras se ejecuta una aplicación, utilizando la información (tal vez variables, o resultados) en directo [83]. Mientras que la offline, la recogida de datos y la programación se realizan antes y se implementan después en el sistema. La distribución de las publicaciones se muestra en la Figura 2.11.

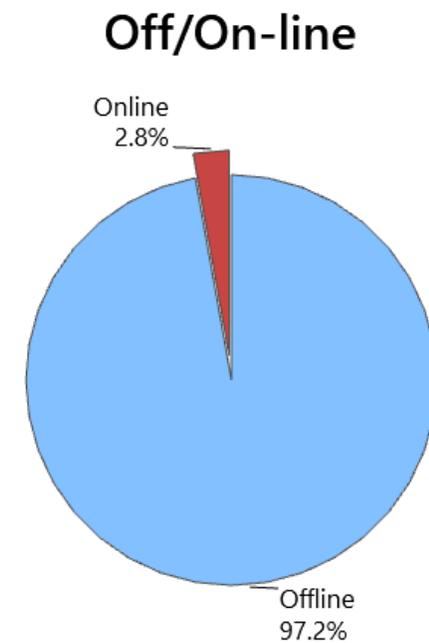


Figura 2.11 Distribución de publicaciones de configuración Off/On-line.

Las publicaciones que funcionaron On-line fueron aquellas cuyos inversores utilizaron alguna hibridación, además de utilizar algún algoritmo bio-inspirado utilizaron lógica difusa o algún otro aspecto adicional, aunque la reducción de THD fue bastante efectiva, la complejidad del control se incrementó razonablemente.

Para generar la siguiente tabla, se tomaron en cuenta los artículos que presentan una topología de inversor multinivel CHBMLI con carga RL y que utilizan Evolución Diferencial (ED) para minimizar la THD.

Tabla 1.2 Tabla de los artículos con inversor multinivel CHBMLI con carga RL que utilizan ED.

Referencia	Niveles	Fases		Parámetros eléctricos	Resultados % de THD
		1-F	3-F		
[11]	5		X	Vout I-n =200 V Vout L-L=300 V	24.25%
[15]	7	X		Vout= 50 V	15.85%
[16]	7	X		Vout=300 V	9.24%
[45]	7		X	7KW	8.07%
[17]	11		X	Vout=120V	5.23%
[13]	11	X		No dice	2.4035%
[39]	15	X		970 W	2.7%
[18]	23		X	L-L= 11kV +- 6.5MVAR, +-300A	THDI-Iv≈5.2%

En la Tabla 2.2 se muestran los hallazgos encontrados en los artículos, se tomaron en cuenta los artículos que presentan una topología de inversor multinivel CHBMLI con carga RL, también que el artículo muestra la comparación de diversos métodos metaheurísticos resaltando la comparación con evolución diferencial:

Tabla 2.3 Tabla donde muestra la minimización del THD con carga RL, comparando métodos metaheurísticos con ED.

Referencia	Niveles	Fases	Parámetros eléctricos	Comparación de % THD	Hallazgos
[22]	5	M	5 KW	TLBO 5th, 7th 11th total elimination DE total elimination ACO total elimination ABC No so efficient, GA , only 5th elimination	“Los resultados muestran superioridad, mayor precisión y probabilidad de convergencia de TLBO sobre los algoritmos mencionados (TLBO, DE, ACO, ABC, GA).”
[21]	11	M	20W	DE THD=7.7% GWO THD=5.5%	“Según el resultado, GWO ofrece la menos cantidad de THD en comparación con DE. “

[17]	11	T	120 Vout	GA = 4.39% DE= 5.23%	“Los resultados de la simulación muestran que los algoritmos propuestos GA y DEA basados en la eliminación selectiva de armónicos pueden eliminar hasta los más mortíferos armónicos de bajo orden. Y con esto disminuya drásticamente la THD de la tensión de salida.”
[45]	7	T	7kW	GM THD= 8.04% PSO =8.12% GA=10.88% DE=8.07%	“Tanto la simulación como los resultados experimentales han demostrado que el procedimiento gráfico puede ser un competidor o incluso una alternativa a los algoritmos de optimización”.
[13]	11	M	No dice	Ga THD=2.4137% DE THD=2.4035%	“Los algoritmos GA y DE resuelven las ecuaciones trascendentales no lineales con formulaciones más simples. También se puede utilizar para cualquier cantidad de niveles de voltaje sin complejos cálculos analíticos.”

Aunque en la Tabla 2.3 varios algoritmos muestran ser más “eficientes” en minimizar la THD en comparación con evolución diferencial, influyen los parámetros iniciales,

las iteraciones que se utilizaron, el índice modular que escogieron los autores, y las poblaciones que declaran, esto provoca la variación de la THD obtenida en los resultados mostrados en las Tablas 2.2 y 2.3.

2.4 Conclusión del Estado del Arte

Se presentó una clasificación de los algoritmos metaheurísticos de interés para la optimización del cálculo del ángulo de conmutación, destacando las ventajas sobre los métodos clásicos, y haciendo hincapié en los métodos evolutivos.

Se observa una tendencia creciente en el número de artículos científicos que utilizan métodos metaheurísticos para la disminución de la THD, así como nuevas variantes de algunos algoritmos. Los métodos más utilizados son los algoritmos evolutivos. Dentro de los algoritmos evolutivos, el algoritmo de evolución diferencial está teniendo un gran auge en los últimos años. Ya que han mostrado resultados fiables y con menos recursos informáticos.

La mayoría de los artículos utilizan inversores multinivel de siete niveles, aunque muchos también utilizan cinco u once niveles. Además, la topología más destacada en esta revisión del estado del arte es la multinivel en cascada. Otro aspecto importante es que los artículos utilizan más inversores trifásicos con cargas RL. La mayoría de las publicaciones utilizan la optimización Off-line, ya que muestra resultados satisfactorios, mientras que la optimización On-line sigue siendo poco frecuente, ya que utiliza un gran esfuerzo computacional, para garantizar que los parámetros estén disponibles cuando se necesiten. Por lo que la optimización Off-line se empleará en la tesis ya que ofrece más ventajas.

Capítulo 3. Caso de estudio

En este capítulo muestra las características más importantes del CHBMLI para su diseño en Matlab Simulink. Además, este capítulo describe de manera más detallada el proceso que realiza el algoritmo de Evolución Diferencial, también la implementación y programación del algoritmo en Matlab. Por último, se detalla el manejo de restricciones.

Después del análisis bibliográfico y la revisión del estado del arte, se decidió realizar un análisis de simulación de un CHBMLI de 7 niveles con carga RL monofásico, implementando el algoritmo de evolución diferencial para minimizar la THD como se muestra en la Figura 3.1:

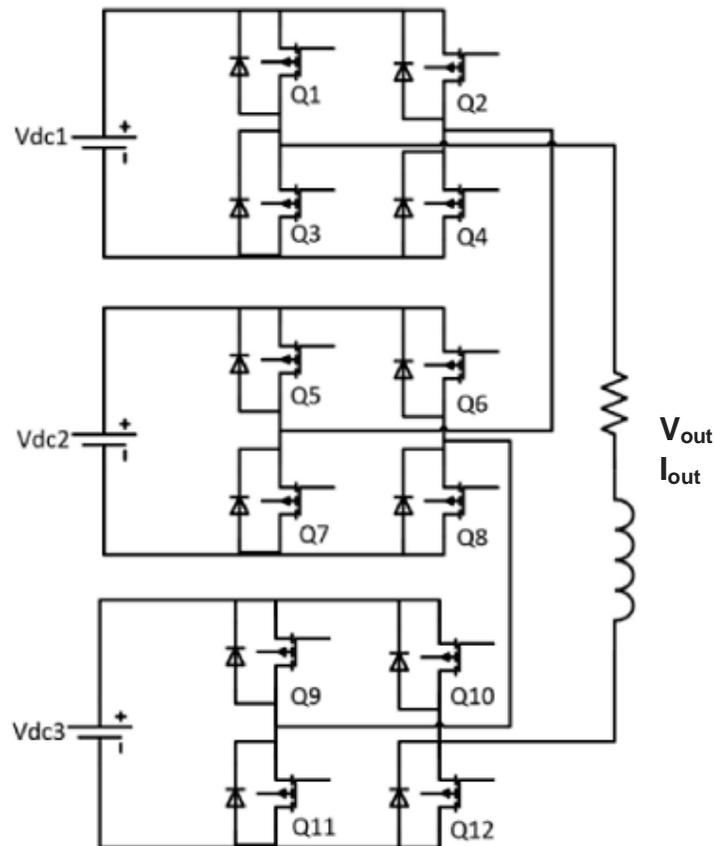


Figura 3.1 Inversor CHBMLI con carga RL [8].

3.1 Características y diseño del CHBMLI

En la Tabla 3.1 se muestra los parámetros más destacables, que se consideraron para el diseño y simulación del inversor multinivel en cascada:

Tabla 3.1 Parámetros más destacables para el diseño del CHBMLI en Matlab.

Parámetros	Especificaciones
Carga RL	100 Ω , 100 mH.
Voltaje de las fuentes (V_{cd})	83.33 V
Voltaje de salida (V_{out})	250 V
Conmutador (Q)	IGBT
Corriente de salida (I_{out})	2.5 A
Frecuencia	60 Hz

3.2 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 [84]. 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 [85]. En la Figura 3.2, se muestra un diagrama con las etapas de la ED.

3.2.1 Etapas de ED

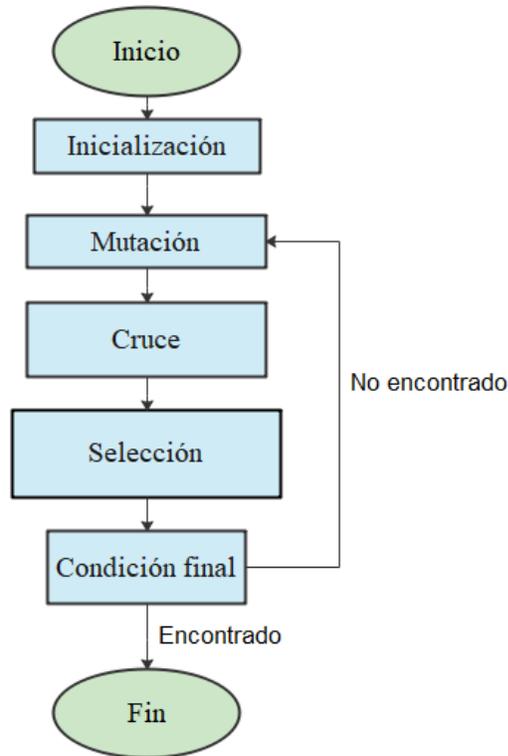


Figura 3.2 Diagrama de las etapas de la Evolución Diferencial [86].

A continuación, se describe brevemente cada etapa señalada en el diagrama de la Figura 3.2:

1. **Inicialización** (Población inicial): Se genera aleatoriamente una población de vectores Np o también llamados individuos, de la siguiente manera:

$$S^G = \{x_j^G : j = 1, 2, \dots, Np\} \quad (5)$$

sea la población de cualquiera generación de G , Np denota el tamaño de la población. D es la longitud del espacio de búsqueda (que D se observa mejor en la Figura 3.5) Como:

$$X_j^G = \{x_{1,j}^G, x_{2,j}^G, \dots, x_{D,j}^G\} \cdot x_j^G \quad (6)$$

se genera usando uniformemente un número aleatorio distribuido como: rand (0,1). Por lo que se obtiene:

$$x_j^G = x_{low} + (x_{upp} - x_{low}) * rand(0, 1) \quad (7)$$

Donde: x_{low} , x_{upp} son los límites inferior y superior del espacio de búsqueda S^G [86-88].

2. **Mutación:** Se genera un vector mutante V_j^G para cada vector objetivo X_j^G de la generación G como:

$$V_j^G = X_{r_1}^G + F * (X_{r_2}^G - X_{r_3}^G) \quad (8)$$

En otras palabras, por cada vector que tenga en la población que se generó, se crea un vector mutado.

Donde F es el factor de escala y el valor de F varía de 0 a 1, y $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, Np\}$ son mutuamente diferentes, vectores elegidos al azar.

El proceso de mutación consiste en utilizar un par de vectores ($X_{r_2}^G$ y $X_{r_3}^G$), que son seleccionados de manera aleatoria. Este par de vectores se restan, esto con el fin de dar una dirección de búsqueda (dicho de otro modo, es la orientación o rumbo que el algoritmo tomará para generar una nueva y diferente solución).

Con la diferencia obtenida previamente, se multiplica por el factor escala o F . Después de la multiplicación, este vector se le suma a un tercer vector ($X_{r_1}^G$) también llamado vector base o donante [89].

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestra de manera gráfica el proceso de mutación:

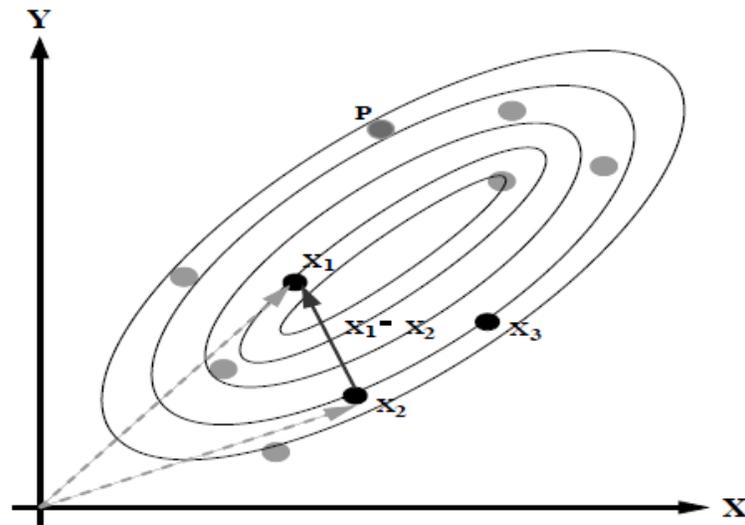


Figura 3.3 Selección de 3 vectores al azar (X_1 , X_2 y X_3) y la creación del vector diferencia con una dimensión $D=1$ [89].

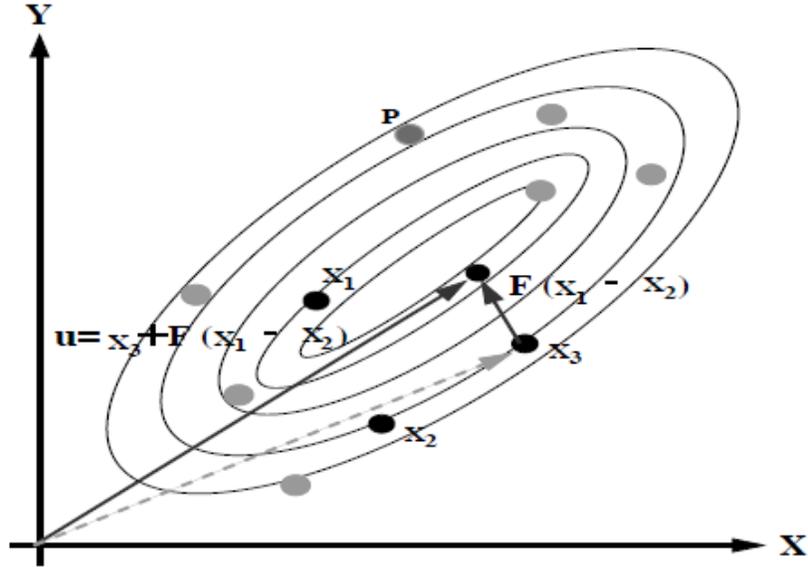


Figura 3.4 Multiplicación del vector diferencia con el factor escala F y la suma del vector base con una dimensión D=1[89].

3. Cruce o Recombinación: Se genera un nuevo vector llamado vector de prueba denotado como:

$$U_j^G = \{u_{1,j}^G, u_{2,j}^G, \dots, u_{D,j}^G\} \quad (9)$$

El cruce es realizado entre el vector objetivo:

$$V_j^G = \{U_{1,j}^G, U_{2,j}^G, \dots, U_{D,j}^G\} \quad (10)$$

utilizando una constante de recombinación o también llamada probabilidad de cruce, o Factor de cruce **Cr** cuyo valor está entre 0 y 1. U_j^G es generado como:

$$U_{ij}^G = \begin{cases} U_{ij}^G & \text{si } rand_j \leq Cr \\ x_{ij}^G & \text{otra manera} \end{cases} \quad (11)$$

Donde $i \in \{1, 2, \dots, D\}$ y $Cr \in [0, 1]$, utilizando Cr cuyo valor está entre 0 y 1 [87, 88]. El valor Cr define que tan parecido será el vector de prueba con respecto al vector mutante o al vector padre. Si Cr 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.

La Figura 3.5 muestra el proceso de cruce con un problema de dimensión D=7.

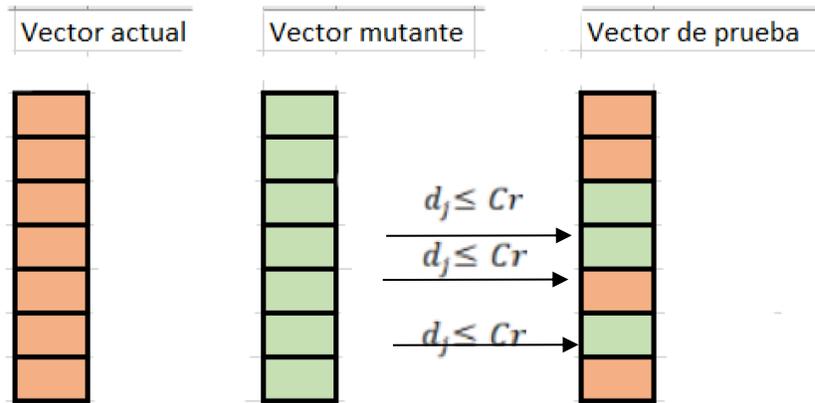


Figura 3.5 Etapa de recombinación o cruce, con un problema de dimensión $D=7$ [89].

4. **Selección:** Se realiza una comparación entre el vector objetivo y el vector de prueba según su valor de aptitud [88]. Esta operación se realiza como:

$$x_j^{G+1} = \begin{cases} U_j^G & \text{si } f(U_j^G) \leq f(x_j^G) \\ x_j^G & \text{otra manera} \end{cases} \quad (12)$$

Dicho de otra manera, se comparan los padres con los hijos, el que obtenga mejor aptitud permanecerá en la siguiente generación, mientras que el de menor aptitud es eliminado.

3.2.2 Programación de ED

Para realizar la programación del algoritmo de ED se utilizó el programa de MATLAB, realizando dos scripts, en el primero se realizó la programación de la función objetivo de acuerdo con el problema de optimización ya mencionado en el trabajo. Mientras que el otro script fue el diseño del algoritmo.

Teniendo presente que el caso de estudio es un inversor multinivel de siete niveles se adaptó la ecuación (3) para la programación de la función objetivo, como se muestra en la Figura 3.6 con sus respectivas restricciones:

```

%%% Función Objetivo THD/CMLI 7NIVELES
function [THD,ansr] = thd_71(x)
sum=0;
ansr=0;
for n=3:2:49
T = (((cos(x(1)*n*pi/180) + cos(x(2)*n*pi/180)+ cos(x(3)*n*pi/180))/n)^2);
sum = sum+T;
end
THD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)+cos(x(3)*pi/180));

if (x(1)>0 && x(1)<90)&&(x(2)>0 && x(2)<90)&&(x(3)>0 && x(3)<90)
    if x(1)< x(2)&& x(2)< x(3)
        else ansr=ansr+100;
    end
else ansr=ansr+100;
end
end

```

Figura 3.6 Función objetivo para MLI 7 niveles con las restricciones.

Mientras que el código principal (Algoritmo de ED) se muestra detalladamente en el Anexo A, dentro del algoritmo (script) se debe “llamar” a la función objetivo, ya programada anteriormente. Después los parámetros de población (N_p), generaciones (G), límite inferior, límite superior, factor escala (F) y factor de recombinación o cruza (Cr) se asignan de manera manual o mejor dicho estas dependen del criterio del programador.

3.2.3 Manejo de restricciones

Uno de los aspectos importantes fue el manejo de restricciones, adaptando la ecuación (4) al caso de estudio, se representa de la siguiente manera:

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

Para el manejo de restricciones en la programación es una parte esencial para la formulación de cualquier problema de optimización, lo cual existen diversos métodos para el manejo restricciones que pueden ser agrupados en cuatro categorías:

- I. Funciones de penalidad: El objetivo de estos es que la función objetivo arroje valores mayores para las soluciones no factibles provocando que la selección sea mejor y favorezca a las soluciones factibles. La implementación de estos es muy simple, pero los factores de penalización requieren de un ajuste fino, dependiendo del tipo de problema [90].

- II. Decodificadores: Estos métodos mapean la región factible del espacio de búsqueda en un espacio más fácil de muestrear donde el algoritmo pueda proporcionar un mejor rendimiento. La implementación de estos métodos no es trivial e implica un alto costo computacional (tiempo de ejecución, tasa de muestreo, velocidad de muestro y procesamiento). Por lo que no son muy utilizados[90].
- III. Operadores especiales: Es un mecanismo que permite conservar la factibilidad de una solución o moverse dentro de una región específica de interés del espacio de búsqueda. La mayoría de los operadores requieren de un proceso de inicialización ad-hoc o al menos una solución factible (o parcialmente) en la población inicial, esto luego es computacionalmente costoso (tiempo de ejecución, tasa de muestreo, velocidad de muestro y procesamiento) en problemas de optimización altamente restringidos[90, 91].
- IV. Separación de la función objetivo y restricciones o reglas factibles: Este método permite conocer si una solución es mejor a otra aplicando las siguientes reglas:
 - Entre dos soluciones factibles, se elige la mejor solución a la que tenga el valor más bajo en su función objetivo.
 - Entre una factible y una no factible, la mejor solución es la factible.
 - Entre dos soluciones no factibles la mejor será aquella con la menor cantidad de violaciones a las restricciones[90, 91].

Se utilizó el método de las reglas factibles, ya que la implementación es muy simple, no requieren de un ajuste fino, alguna inicialización ad-hoc o un gran costo computacional en comparación con los otros manejos de restricciones.

Capítulo 4. Variación de parámetros

En este capítulo muestra la importancia e influencia de los parámetros iniciales que tiene el algoritmo de ED implementado en el CHBMLI de siete niveles con 3 ángulos de conmutación, también se muestra las gráficas de las simulaciones realizadas en Matlab, para observar el comportamiento.

El factor escala (F) se relaciona a la orientación de búsqueda y a la velocidad de la convergencia. Si el factor F toma valores pequeños (entre 0.1 y 0.4), permite realizar una mejor búsqueda local en el espacio, en caso contrario de que F adquiere valores grandes, el algoritmo realiza una mejor búsqueda global [92]. Algunos autores recomiendan utilizar valores entre 0.4 y 0.9, sobre todo 0.9 ya que mantiene un equilibrio entre velocidad y probabilidad de convergencia [90, 92, 93] .

Mientras que el Cr algunos autores recomiendan [94, 95] emplear un Cr de 0.9, para que el vector de prueba sea un 90% similar al vector mutante y así tener una amplia variedad de individuos.

Previo al análisis de la influencia de la variación de parámetros se realizó una búsqueda en los diversos artículos utilizados en el estado del arte, acerca de la implementación de Evolución Diferencial (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 la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Tabla de los artículos con inversor multinivel CHBMLI que utilizan ED.

Referencia	Parámetros ED				CHBMLI			%THD
	F	Cr	G	Np	Niveles	Fases	Carga	
[11]	---	---	10000	70	5	3	RL	24.25
[18]	1	0.95	---	70	23	3	RL	5.2
[19]	0.9	0.55	---	---	11	3	RL	26.23
[20]	1	0.9	---	10	15	3	R	3.74
[14]	0 a 1	0.95	---	80	5 y 7	1	R	5=24.5 7=13.2
[21]	0.7	0.2	50	5	11	1	R	7.7

Observando la Tabla 4.1 pocos artículos fueron los que mencionaron los parámetros utilizados, por lo cual se decidió utilizar una población de 50 y una generación de 100 para el análisis.

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 4.1 muestra la relación entre el valor de THD y el factor escala (F), para cada valor del factor cruce (Cr) dentro del rango de 0 a 1.

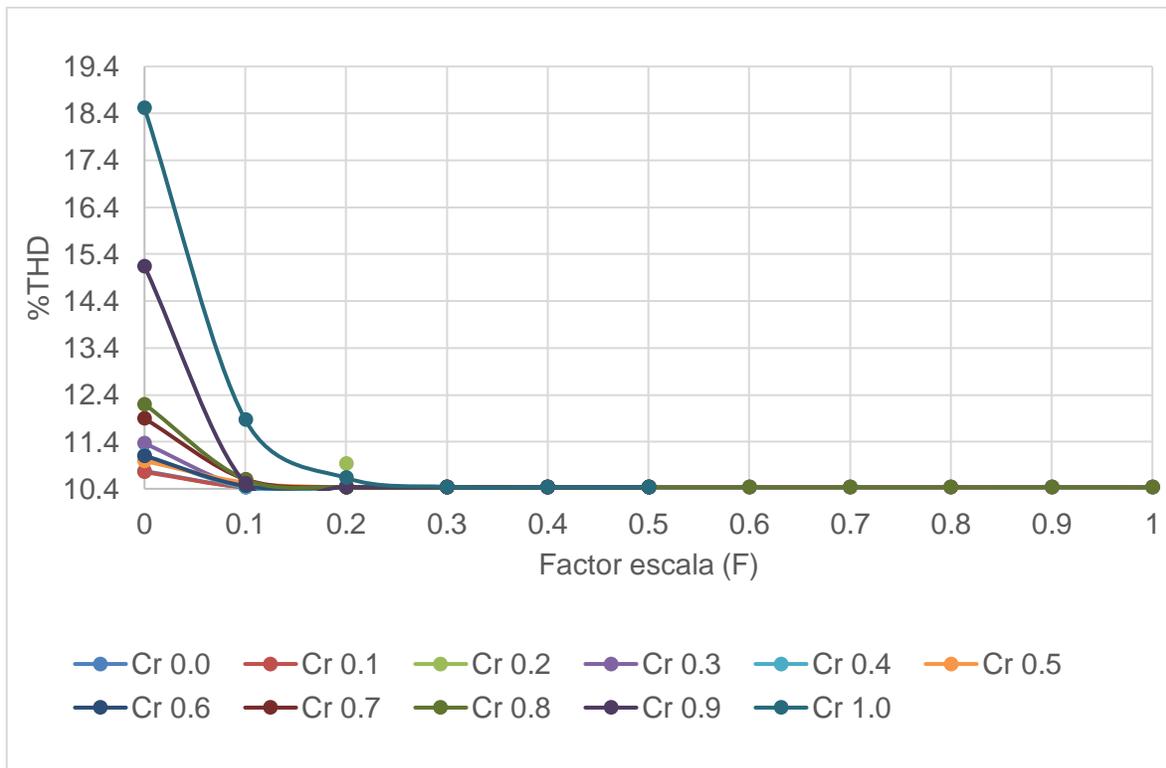


Figura 4.1 Gráfica de THD vs Factor escala (F).

En la primera sección de la cuadrícula de la Figura 4.1 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 de 10.43% (que fue el porcentaje mínimo encontrado) 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 4.2, muestra el comportamiento obtenido de esta interacción.

Analizando la Figura 4.2, 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 4.2 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 en un CHBMLI de siete niveles con tres ángulos de conmutación.

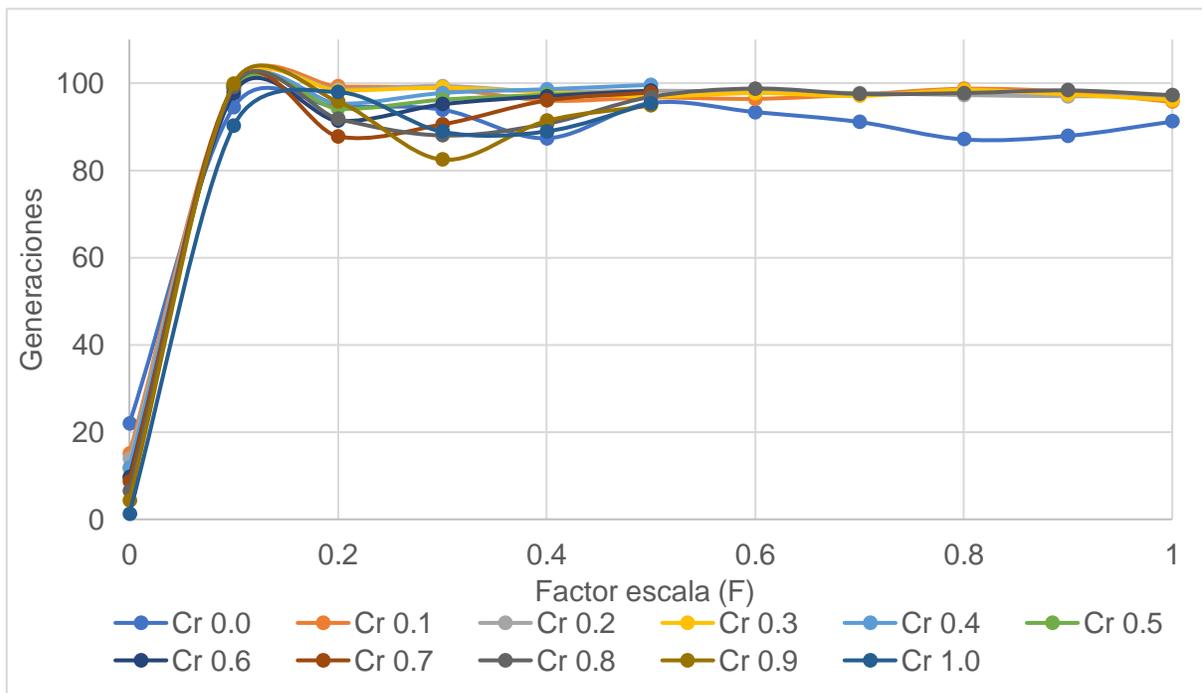


Figura 4.2 Máximo número de generaciones para converger en la menor THD posible.

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 4.3, muestra la interacción de los parámetros del algoritmo (F y Cr) en relación con el tiempo de ejecución.

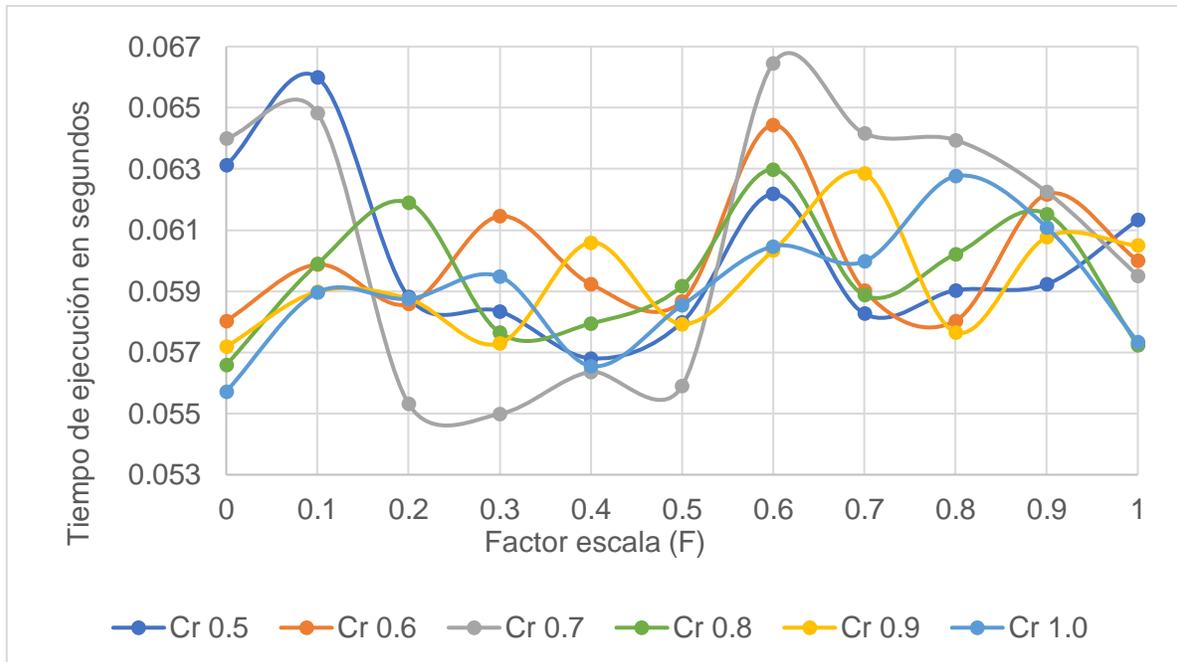


Figura 4.3 Interacción de los parámetros (F y Cr) en relación con el tiempo de ejecución.

Se puede apreciar en la Figura 4.3 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 4.2, 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 4.3 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 (N_p) y la generación (G), en relación con el tiempo de ejecución. Los resultados de esta interacción se muestran en la Figura 4.4.

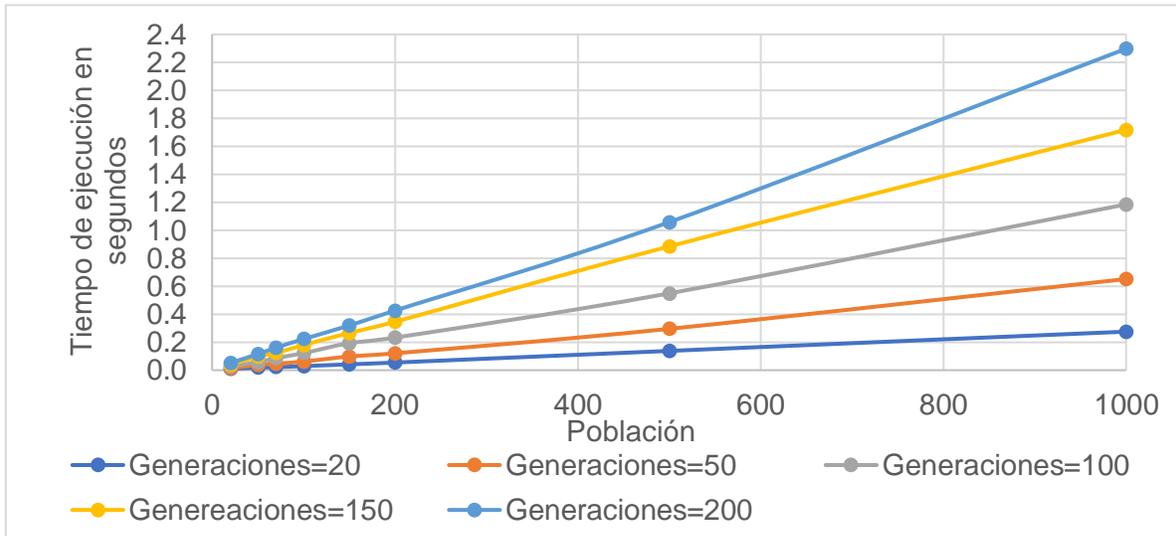


Figura 4.4 Interacción de los parámetros N_p y G en relación con el tiempo de ejecución.

En la Figura 4.4, 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 (N_p – eje x) el tiempo de ejecución del código del algoritmo también aumenta. Esta tendencia se presenta para los otros casos mostrados en la Figura 4.4 para los distintos valores de generaciones (G). Por último, se analizó la interacción entre los parámetros de población (N_p) y la generación (G), en relación con el valor porcentual de la THD. Los resultados de esta interacción se muestran en la Figura 4.5.

Observando la Figura 4.5 en la primera sección de la cuadrícula, específicamente para valores de la población (N_p – eje x) con valores de 20 a 50, se logra visualizar que, para este rango de valores de N_p , al incrementar el valor de N_p 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 N_p . Sin embargo, a partir de valores de población (N_p) superiores a 50, se obtiene un valor promedio de $THD=10.43\%$, independientemente de los valores de generaciones (G).

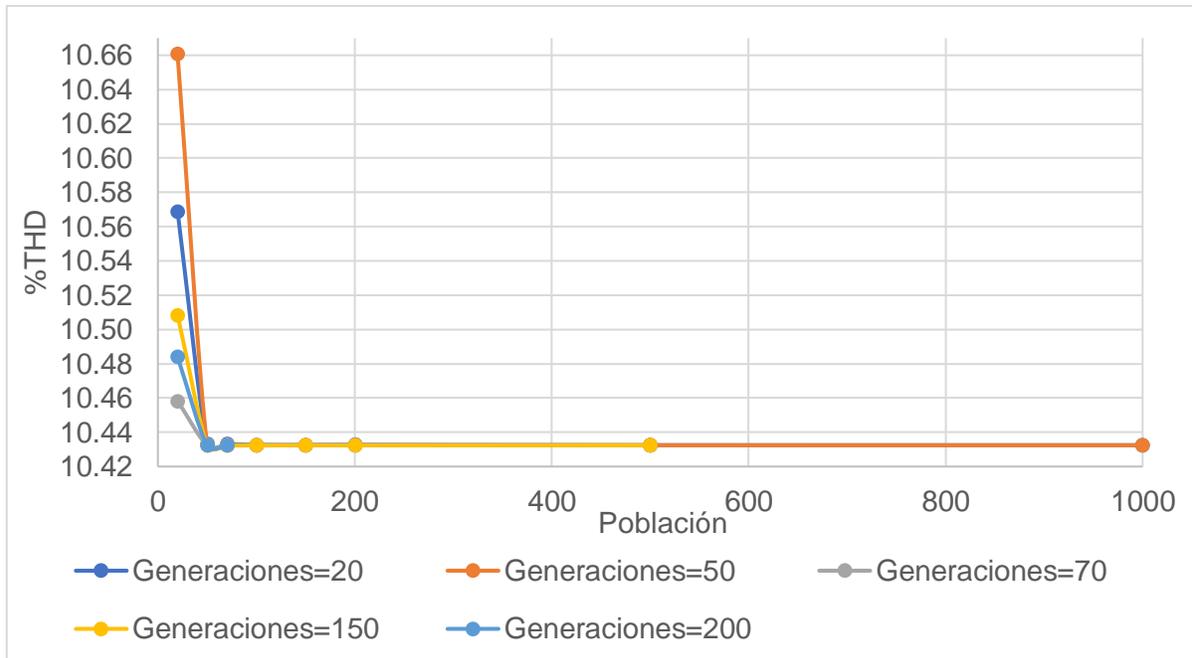


Figura 4.5 Interacción de los parámetros N_p y G en relación con el %THD.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 4.4 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 4.5. Observando a detalle la Figura 4.5 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.

En la Figura 4.6 se muestra el diagrama paso por paso del proceso para la verificación de parámetros del algoritmo que se desarrolló:

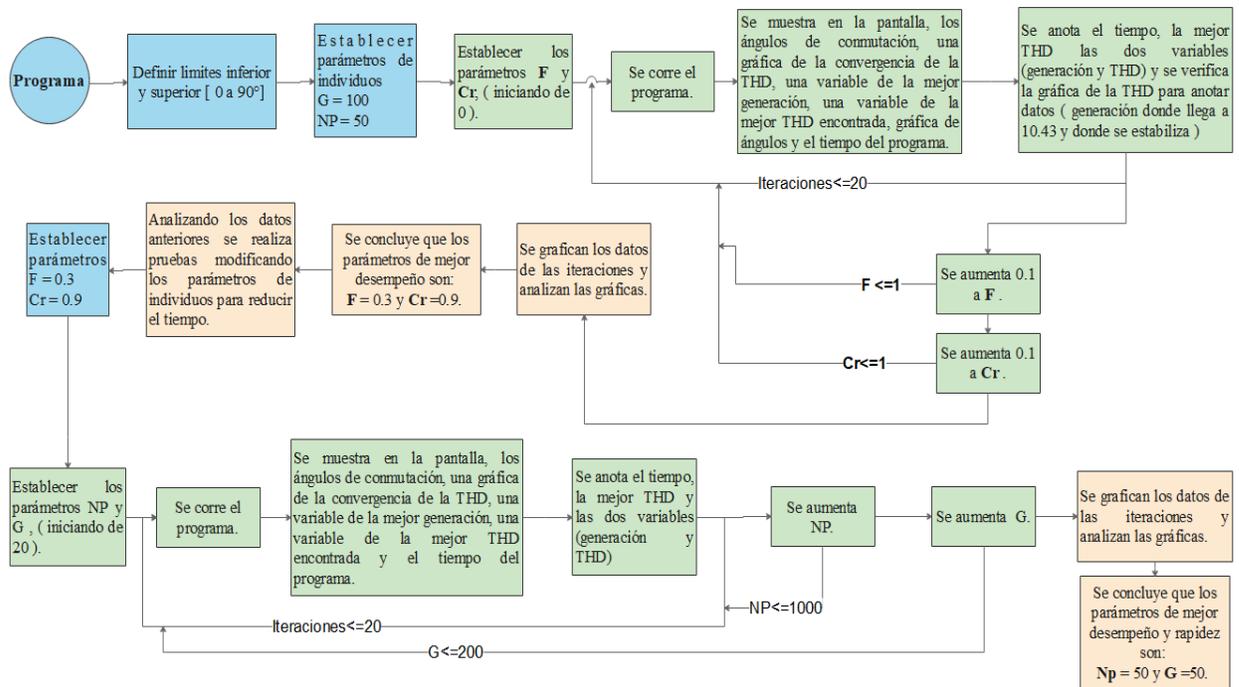


Figura 4.6 Diagrama de verificación de parámetros del algoritmo ED para el caso de estudio.

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 4.2, se muestran los valores de dichos parámetros:

Tabla 4.2 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 4.2. Una vez ejecutado el algoritmo, se obtuvieron los ángulos de conmutación óptimos mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Ángulos óptimos de conmutación obtenidos por el algoritmo de ED para el caso de estudio con tres ángulos de disparo.

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

Capítulo 5. Simulación y Resultados

En este capítulo muestra el diseño y simulación del CHBMLI en Matlab Simulink. Además, la implementación de los ángulos obtenidos por el algoritmo de Evolución Diferencial, por último, la implementación del índice de modulación en el algoritmo de ED, para observar el comportamiento que tiene en el CHBMLI.

5.1 Análisis de simulación del CHBMLI Matlab

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 4.3 y los parámetros que se consideraron para el diseño del inversor multinivel fueron mostrados en la Tabla 3.1. Mostrando en la siguiente figura la simulación del CHBMLI realizado en Simulink, mientras que la etapa de modulación se presenta en el Anexo B y los pulsos en el Anexo C.

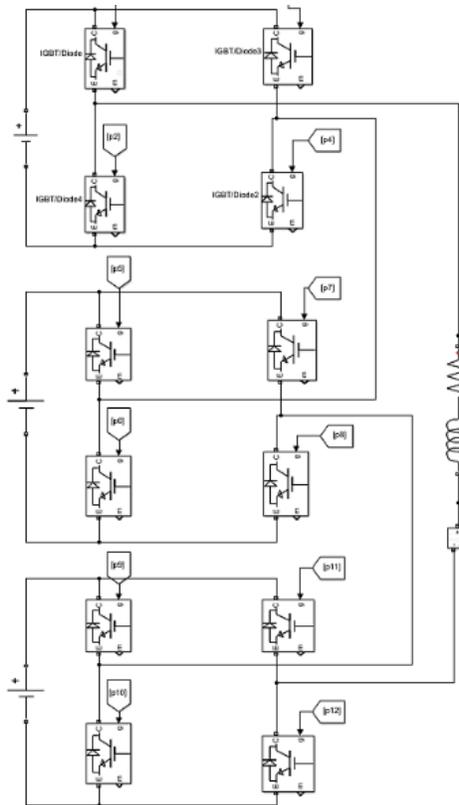


Figura 5.1 Diagrama esquemático para la simulación CHBMLI Simulink.

Después de comprobar que la etapa modulación e ingresar los ángulos obtenidos, se obtuvo la siguiente figura que muestra la forma de onda del voltaje a la salida del CHBMLI de siete niveles, que corresponde a los 250 V.

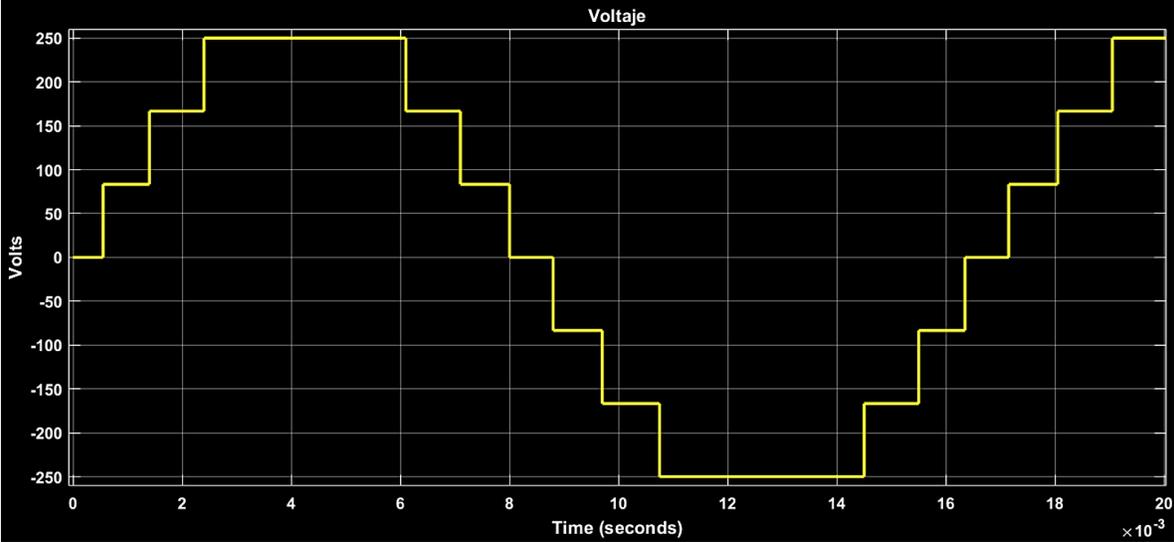


Figura 5.2 Voltaje de salida del inversor CHBMLI de siete niveles Simulink.

Mientras que en la siguiente figura se muestra la forma de onda de la corriente de salida que tiene el inversor, como se muestra en la Figura 5.3:

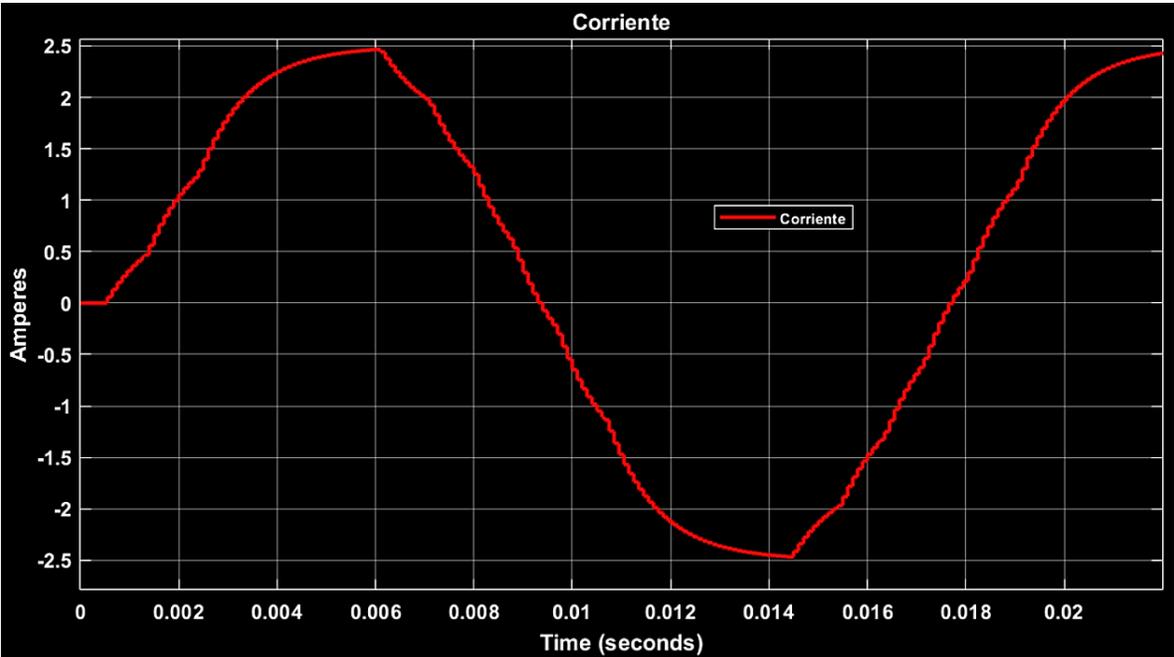


Figura 5.3 Corriente de salida del inversor CHBMLI de siete niveles.

5.2 Resultados de simulación

Después de verificar que las formas de onda de salida del inversor coinciden con los valores de las especificaciones de diseño establecidas previamente, 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, el %THD y el voltaje de la señal fundamental (primer dato mostrado en la parte superior de la Figura 5.4). El gráfico obtenido se muestra en la Figura 5.4.

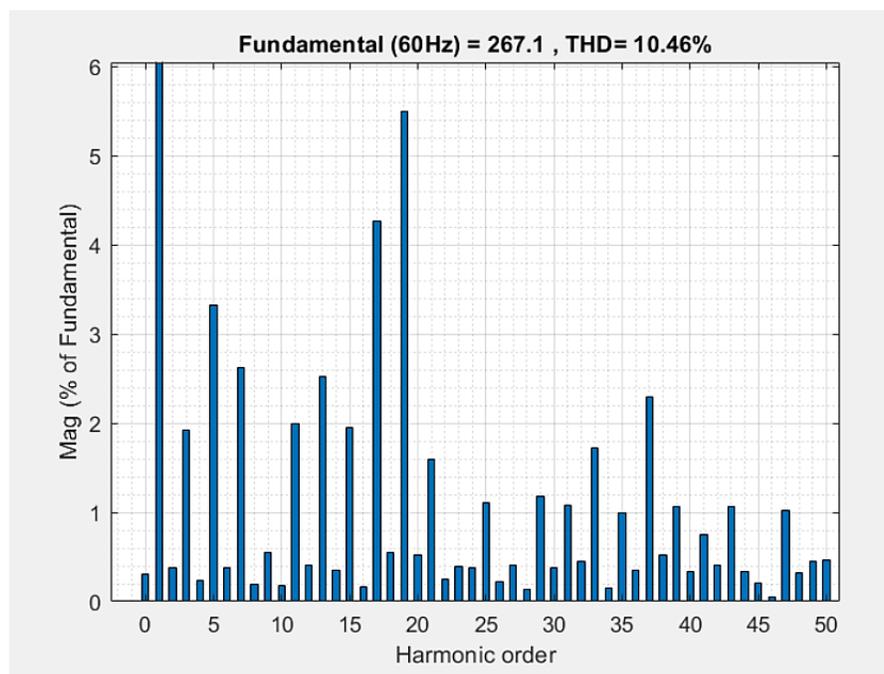


Figura 5.4 Espectro de armónicos para forma de onda de voltaje de salida en la carga.

5.3 THD vs M_i

Después de realizar las pruebas, y obtener la THD por medio de la herramienta de Powergui de Simulink se decidió implementar al algoritmo la función de obtener el índice de modulación deseado por el usuario, por lo cual se implementó en el script del programa de ED.

Índice modular o índice de modulación (M_i)= Se obtiene de la tensión fundamental entre el número de ángulos de conmutación. Cuando $M_i > 1$ se dice que existe sobre modulación, esto provoca ausencia de pulsos al momento de realizar la comparación de la señal moduladora con la señal portadora.

La relación de la modulación es la relación de V_1 sobre n .

Donde:

n = número de ángulos de conmutación por cuarto de ciclo.

Por lo cual aplicado a este caso de estudio que es un CHBMLI de siete niveles con tres ángulos de conmutación, lo cual nuestra $n= 3$ se queda la ecuación como:

$$M_i = \frac{4}{3\pi} (\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3)) \quad (14)$$

α = ángulo de conmutación.

Por lo tanto, obteniendo la ecuación, se modificó en el script de la función objetivo, introduciendo y adaptando la ecuación (15).

Después se agregó una restricción para realizar la búsqueda del M_i en el programa, en la parte de las restricciones se puede observar la modificación a detalle en el Anexo D.

A la hora de realizar pruebas, se tuvieron que modificar las ponderaciones de las restricciones para que se obtuvieran resultados cercanos a los óptimos cumpliendo con las restricciones. Por lo tanto, los nuevos parámetros quedan de la siguiente manera:

Tabla 5.1 Valores de los parámetros para ED con M_i .

Parámetro	Valor
Factor de Cruce (Cr)	0.9
Factor de escala (F)	0.3
Población (Np)	50
Generación (G)	100

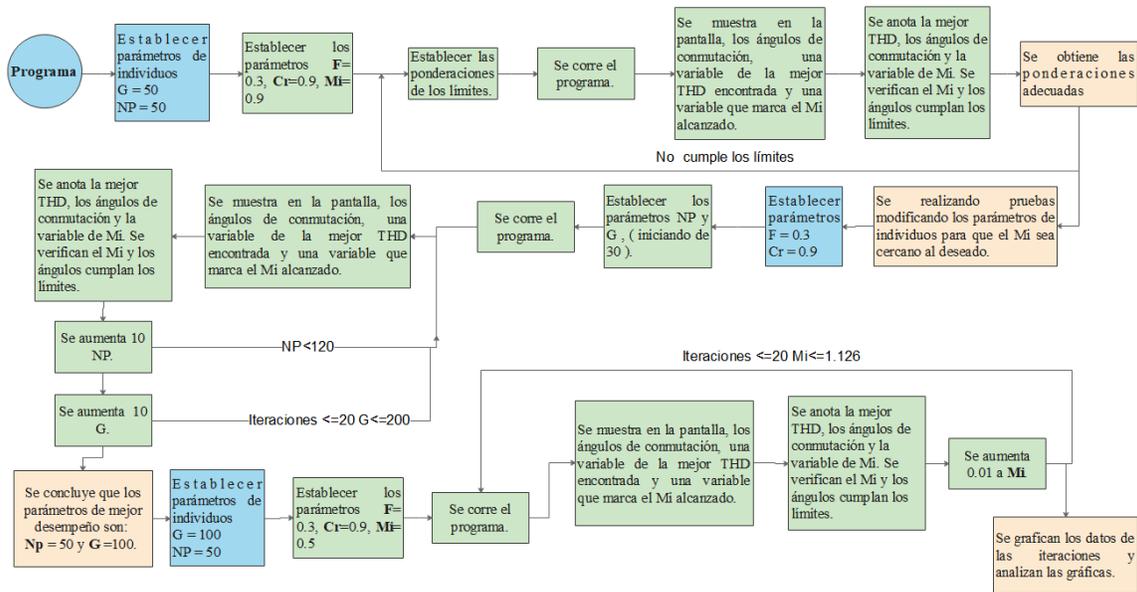


Figura 5.5 Diagrama verificación de parámetros del algoritmo ED con MI.

El cambio de parámetros se realizó para optimizar la búsqueda de la Mi, deseada, acercándose a los ángulos y Mi óptimos, además de validar los límites establecidos. Se hicieron pruebas y se graficaron los resultados del CHBMLI de siete niveles previamente simulado en Simulink para observar el comportamiento que se tiene por lo cual en la siguiente figura se muestra los resultados de los ángulos obtenidos por la implementación de este programa.

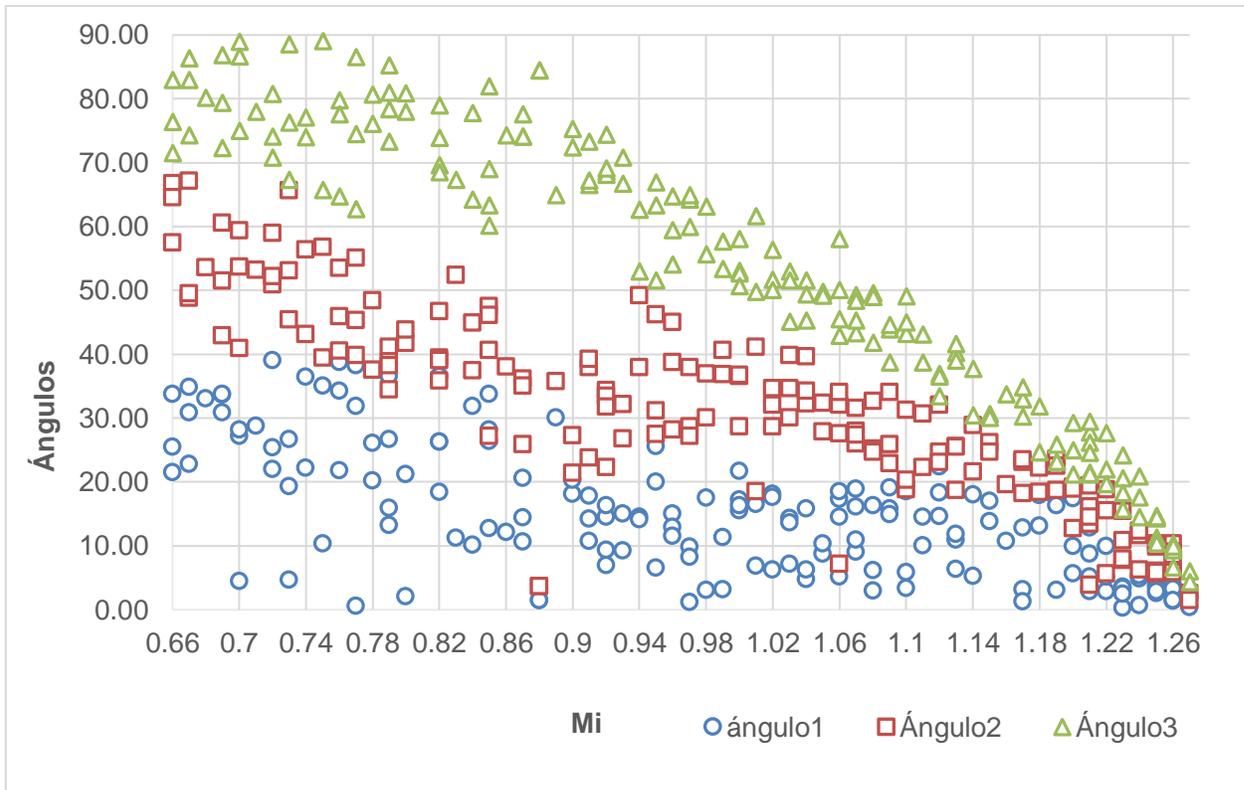


Figura 5.6 Ángulos vs Mi en simulación CHBMLI simulink.

Como se puede apreciar en la Figura 5.6 entre menor sea el Mi para el inversor, mayor cantidad de ángulos coinciden en un mismo índice modular.

En la Figura 5.7 solo se utilizó la mejor THD que se obtuvo para el índice modular, teniendo en cuenta que en la Figura 5.6 se tienen 4 combinaciones de ángulos para un Mi.

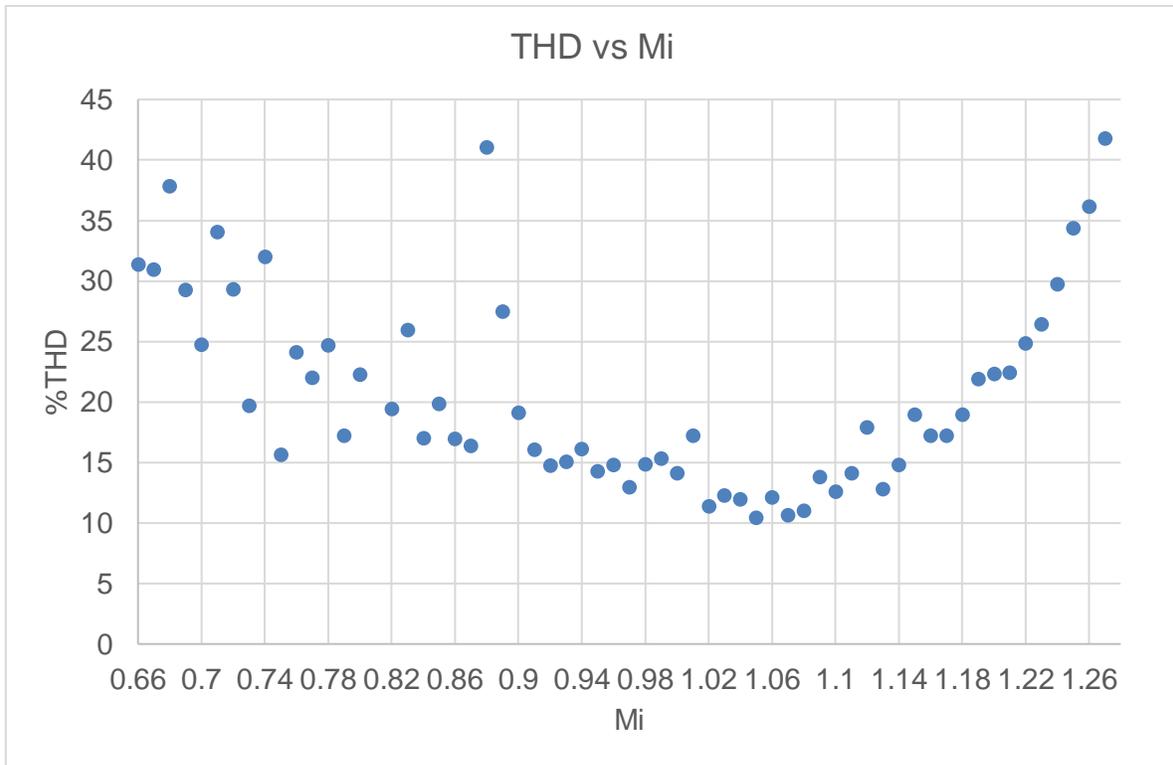


Figura 5.7 THD vs Mi en simulación CHBMLI simulink.

Como se observa en la Figura 5.7 el Mi que alcanzo el porcentaje mínimo de THD fue de 1.05. También a la hora de revisar varios artículos del estado del arte, muchos de estos no consideran el valor del Mi, solo toman el valor óptimo para la minimización del %THD, al no considerarlo se pueden encontrar los ángulos óptimos para la reducción de la THD o se genera una sobre modulación. Para este caso valores $Mi < 1$, la THD mínima encontrada fue con un Mi de 0.97 y una THD 12.98%, lo cual es un 2% más que la encontrada sin preocupación del Mi, mientras que la THD mínima encontrada obtiene un Mi de 1.05.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 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 ED, ya que por su fácil implementación y rápida convergencia a destacado en diversas áreas de la investigación.

Para el caso de estudio establecido en este trabajo, se seleccionó una topología de CHBMLI. Se llevó a cabo un análisis de la combinación de parámetros iniciales para el algoritmo de ED.

Comparando los parámetros de la Tabla 2.2 y los parámetros de la Tabla 1.1, obtenidos de un análisis de la variación de parámetros para el algoritmo ED para el caso de estudio abordado en la presente tesis, se coincide en tener un factor de cruce $Cr=0.9$. Por otra parte, contrario a lo que se presenta en la Tabla 2.2 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 $F=0.3$.

Lo cual la mejor combinación que 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.

Analizando el espectro armónico de la señal de salida del inversor, la simulación hecha en Simulink y con la herramienta de Powergui se obtuvo una $THD=10.46\%$ y si se compara con el valor de THD que arrojó el algoritmo de ED fue de $THD=10.43\%$, existe una diferencia despreciable de 0.03% entre el valor obtenido en la simulación y el valor arrojado por el algoritmo de ED.

Otro punto importante es en la parte del índice de modulación, ya que varios autores no toman en cuenta a la hora de realizar pruebas o simulaciones, solo buscan el valor óptimo para la reducción de la THD, sin considerar el valor de M_i , al no considerarlo se pueden encontrar los ángulos óptimos para la reducción de la THD o se genera una sobre modulación. En este trabajo de tesis se puede apreciar que si se requiere minimizar de manera efectiva encontrando el valor mínimo de la THD de un MLI esta puede llegar a afectar en el voltaje de salida del inversor, provocando que el M_i no sea el adecuado o requerido a la salida del inversor. Se debe considerar si se requiere un valor alto del índice modular, pero una THD no tan baja o se requiere una THD baja, pero con un índice modular bajo o deficiente.

6.2 Trabajos Futuros

En este trabajo de tesis, mediante la simulación, se abordó el análisis de la reducción y eliminación de armónicos en un CHBMLI monofásico de siete niveles, para trabajos futuros se podría realizar la construcción de un prototipo experimental de un CHBMLI monofásico de siete niveles, y realizar las pruebas debidas. Implementando los ángulos obtenidos en este trabajo, comparando los resultados que se obtienen del prototipo con los resultados de la simulación.

6.3 Productos académicos

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis obtuvo 3 productos que se enlistan a continuación:

1. Un artículo de revista publicado: 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*, Vol. 23, No. 3, pp. 237-245. <https://doi.org/10.18280/ejee.230308>.
2. Artículo de congreso, aceptado y presentado en el congreso de la UAM para la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE) llevado a cabo el 17 de noviembre de 2021 con el nombre de: Cálculo de los ángulos óptimos de conmutación para un inversor multinivel utilizando evolución diferencial. De la autoría de: Oscar Sánchez Vargas, Susana Estefany De León Aldaco, Jesús Aguayo Alquicira, Eligio Flores Rodríguez y Ricardo Eliú Lozoya Ponce.
3. Artículo de congreso, aceptado y presentado en el congreso de la UAM para la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE) llevado a cabo el 17 de noviembre de 2021 con el nombre de: Selección de los ángulos de conmutación para un inversor multinivel en cascada usando un algoritmo de búsqueda aleatoria. De la autoría de: Jesús Aguayo Alquicira, Susana Estefany De León Aldaco, Oscar Sánchez Vargas, Nicolas Torres Cruz y Adolfo Rafael López Núñez

Referencias

- [1] E. Kabalci, "Multilevel Inverters Introduction and Emergent Topologies," in *Multilevel Inverters*, E. Kabalci, Ed., 2021, pp. 1-27.
- [2] S. D. Patil and S. G. Kadwane, "Application of Optimization Technique in SHE Controlled Multilevel Inverter," presented at the International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017), 2017, 2017.
- [3] D. M. M. Martínez, *Analisis Armonico en Sistemas Electricos de Potencia*. Instituto Tecnológico de Morelia, 2019.
- [4] T. Nilsakorn, K. W. oranetsuttikul, K. Pinsuntia, N. Jumpasri, and W. Khan-ngern, "Harmonic Effect on BLDC Motor Temperature Caused by Driving System," presented at the Congreso Internacional de Ingeniería Eléctrica 2014 (iEECON), Kittapas Pinsuntia, 2014, 2014.
- [5] F. Fornieles, *Armónicos: Efectos, diagnostico y soluciones*. CIRCUTOR, 2009.
- [6] C. Blum, A. Roli, and E. Alba, "An Introduction to Metaheuristic Techniques," in *Parallel Metaheuristics A New Class of Algorithms* A. Y. Zomaya, Ed.: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005.
- [7] J. Lakwal, D. M. Deshpande, A. Suresh, and A. Mittal, "MATLAB Simulation of Single Phase Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems," presented at the ICGSEE-2013 (International Conference on Global Scenario in Environment and Energy Ca), 14th – 16th March 2013, 2013.
- [8] H. H. Hamzah, A. Ponniran, A. N. Kasiran, M. A. Harimon, D. A. Gendum, and M. H. Yatim, "A Single Phase 7-Level Cascade Inverter Topology with Reduced Number of Switches on Resistive Load by Using PWM," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 995, 2018.
- [9] S. Wei, B. Wu, F. Li, and X. Sun, "Control Method for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with Faulty Power Cells," presented at the Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003., Miami Beach, FL, USA, 9-13 Feb. 2003, 2003.
- [10] J. Rodríguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 49, pp. 724-738, AUGUST 2002 2002.
- [11] Z. Salam, A. M. Amjad, and A. Majed, "Using Differential Evolution to Solve the Harmonic Elimination Pulse Width Modulation for Five Level Cascaded Multilevel Voltage Source Inverter," presented at the 2013 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, Kota Kinabalu, Malaysia, 3-5 december 2013, 2013.
- [12] N. Bahari, Z. Salam, and Taufik, "Application of Differential Evolution to Determine the HEPWM Angles of a Three Phase Voltage Source Inverter " presented at the IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, USA, 7-10 Nov. 2010, 2010.
- [13] S. V. Pawar and S. S.L., "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. Vol.2, no. 5, pp. 144-150, May 2015 2015.
- [14] A. M. Amjad, Z. Salam, and A. M. A. Saif, "Application of differential evolution for cascaded multilevel VSI with harmonics elimination PWM switching," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 447-456, 2015.

- [15] F. Chabni, R. Taleb, and M. h. Helaimi, "Differential Evolution based SHEPWM for SevenLevel Inverter with Non-Equal DC Sources," (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7 No.9, pp. 304-311, 2016 2016.
- [16] P. Jamuna and C. C. A. Rajan, "A Heuristic Method: Differential Evolution for Harmonic Reduction in Multilevel Inverter System," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, pp. 482-486, 2013.
- [17] S. Sudha Letha, T. Thakur, and J. Kumar, "Harmonic Elimination in a Solar Powered Cascaded Multilevel Inverter Using Genetic Algorithm and Differential Evolution Optimization Techniques," presented at the Volume 6B: Energy, 2015.
- [18] A. Majed, Z. Salam, and A. M. Amjad, "Harmonics elimination PWM based direct control for 23-level multilevel distribution STATCOM using differential evolution algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 152, pp. 48-60, 2017.
- [19] P. A. Naidu and V. Singh, "Speed control of induction motor and control of multilevel inverter output with optimal PI controller using DE and GSA optimization technique " presented at the 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2018, 2018.
- [20] Z. Salam, A. Majed, and A. M. Amjad, "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*, vol. 8, no. 9, pp. 1740-1748, 2015.
- [21] A. A. Stonier, G. Chinnaraj, R. Kannan, and G. Mani, "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*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, 2020.
- [22] K. Haghdar, "Optimal DC Source Influence on Selective Harmonic Elimination in Multilevel Inverters Using Teaching–Learning–Based Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 2, pp. 942-949, 2020.
- [23] F. Herrera, "Introducción a los Algoritmos Metaheurísticos," presented at the Conferencia de la Asociación Española para Inteligencia Artificial Universidad de Granada-España, December 10, 2009, 2009.
- [24] S. De-León, H. Calleja, and J. Aguayo, "Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 6791-6803, Diciembre 2015 2015.
- [25] O. S. Vargas, S. E. D. L. Aldaco, J. A. Alquicira, and A. R. L. Núñez, "Evolutionary Metaheuristic Methods Applied to Minimize the THD in Inverters: A Systematic Review," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 237-245, 2021.
- [26] A. M. Razali, N. Kamisman, J. M. Lazi, Norhazilina Bahari, and W. A. Halim, "Differential Evolution Technique in Solving HEPWM Switching Angles of Three-Phase Voltage Source Inverter," *IEEE*, pp. 489-494, 2016 2016.
- [27] K. Imarazene, A. Ladjici, and E. M. Berkouk, "Optimized Total Harmonic Distortion PWM in Five Level Inverter with Differential evolution approach " presented at the 8th International Conference on Systems and Control, Marrakech, Morocco, October 23-25, 2019, 2019.
- [28] K. Imarazene, E. M. Berkouk, and H. Chekireb, "Optimized Total Harmonics Distortion PWM and Multi-Carries PWM: Comparison.," presented at the 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, Latvia, 11-13 May 2015, 2015.

- [29] P. P. Biswas, N. H. Awad, P. N. Suganthan, M. Z. Ali, and G. A. J. Amaratunga, "Minimizing THD of Multilevel Inverters with Optimal Values of DC Voltages and Switching Angles using LSHADE-EpSin algorithm," presented at the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), San Sebastian, Spain 5-8 June 2017, 2017.
- [30] M. I. M. Rashid, A. Hiendro, and M. Anwari, "Optimal HE-PWM Inverter Switching Patterns Using Differential Evolution Algorithm," presented at the IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2-5 December 2012, 2012.
- [31] Z. Salam and N. Bahari, "Selective Harmonics Elimination PWM (SHEPWM) Using Differential Evolution Approach," presented at the 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & Power, New Delhi, India, 20-23 December 2010, 2010.
- [32] D. Zhang and R. Dutta, "Application of Partial Direct-Pole-Placement and Differential Evolution Algorithm to Optimize Controller and LCL Filter Design for Grid-tied Inverter " presented at the Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014,, Curtin University, Perth, Australia, 28 September – 1 October 2014, 2014.
- [33] S. G. Rosu, C. Radoi, A. Florescu, P. Guglielmi, and M. Pastorelli, "The Analysis of the Solutions for Harmonic Elimination PWM Bipolar Waveform with a Specialized Differential Evolution Algorithm," presented at the 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, Romania, 24-26 May 2012, 2012.
- [34] M. Prabhu, S.rajendran, J.Kohila, and S.Kannan, "Implementation of SHE in Solar Energy Conversion System," presented at the IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram, India, 8-10 May 2014, 2014.
- [35] A. Ketabi and S. E. T. M., "Photovoltaic Single-Stage Grid Tied Inverter with One-Cycle Control," presented at the International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 3-4 February 2015, 2015.
- [36] L. D. H. Wang, G.-Q. Zeng, Z.-J. Zhang, L. Wu, R. Xiong, and Y.-X. Dai, "Optimal Droop Control of Distributed Inverters in a Microgrid Under Autonomous Mode Based on Differential Evolution " presented at the Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, China, 30 Nov.-2 Dec. 2018, 2018.
- [37] J. Wu *et al.*, "Dual-Frequency Output of Wireless Power Transfer System with Single Inverter Using Improved Differential Evolution Algorithm," *Energies*, vol. 13, no. 9, 2020.
- [38] S. Qian, Y. Ye, Y. Liu, and G. Xu, "An improved binary differential evolution algorithm for optimizing PWM control laws of power inverters," *Optimization and Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 271-296, 2017.
- [39] G. Mohapatra and M. R. Nayak, "Switching Angle and Power Loss Calculation for THD Minimization in CHB-Multilevel Inverter Using DEA," in *Information and Decision Sciences*(Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, pp. 491-502.
- [40] F. Chabni, R. Taleb, and A. Mellakhi, "Elimination of Harmonics in Modified 5-Level CHB Inverter Using DE Algorithm," *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation*, pp. 23-32, September 2016 2016.
- [41] R. Vijayakumar, C. Devalalitha, A. Nachiappan, and R. Mazhuvendhi, "Selective Harmonic Elimination PWM Method Using Two Level Inverter by Differential Evolution Optimization Technique " presented at the International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR), Chennai, India, 27-29 Nov. 2014, 2014.

- [42] L. V. Sureshkumar and U. Salma, "Differential Evaluation Base Gain Tune of Proportional–Integral–Derivative Controller for MLI Base-Integrated Wind Energy System with Multi-winding Transformer," in *Soft Computing in Data Analytics*(Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, pp. 493-505.
- [43] Y. Yu, P. Zhang, Z. Song, and F. Chai, "Composite differential evolution algorithm for SHM with low carrier ratio," *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 6, pp. 1101-1109, 2018.
- [44] L. R. Srinivas and B. M. Ram, "Voltage and Frequency control of Distribution Generation Unit in an Island Mode Microgrid Using Differential Evolution. ," presented at the 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, India, 14-15 June 2018, 2018.
- [45] F. Chabni, R. Taleb, M. G. Cimoroni, and C. Buccella, "Selective Harmonic Elimination Procedure for Uniform Step Asymmetrical 7-Level CHB Inverter," presented at the 2018 5th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA), Rome, Italy, 24-26 Sept. 2018, 2018.
- [46] R. K. Mallick, S. Sinha, S. Mohanty, and S. Kumar, "Design of Optimal Controller for DSTATCOM using Differential Evolution Technique," presented at the 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, India 3-5 March 2016, 2016.
- [47] G. Zhao and X. L. Huang, "Application of DE Algorithm over Control of Grid-Connected PV Inverter," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 380-384, pp. 664-667, 2013.
- [48] K. Imarazene, E. M. Berkouk, and H. Chekireb, "Selective Harmonics Elimination: PWM method versus Optimized Total Harmonic Distortion," presented at the 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey,, 13-17 May 2013, 2013.
- [49] H. R. Massrur, T. Niknam, M. Mardaneh, and A. H. Rajaei, "Harmonic Elimination in Multilevel Inverters Under Unbalanced Voltages and Switching Deviation Using a New Stochastic Strategy," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 716-725, 2016.
- [50] A. Hiendro, "Multiple Switching Patterns for SHEPWM Inverters Using Differential Evolution Algorithms," *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, vol. Vol.1 No.2, pp. pp.94-103, Nov 10th, 2011 2011.
- [51] A. M. Razali, N. Kamisman, J. M. Lazi, and N. Bahari, "DIFFERENTIAL EVOLUTION TECHNIQUE OF HEPWM FOR THREEPHASE VOLTAGE SOURCE INVERTER " *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. VOL.11, pp. 8958-8964, JULY 2016 2016.
- [52] A. Majed, Z. Salam, and A. M. Amjad, "HEPWM implementation for fifteen level cascaded inverter using field programmable gate array," presented at the 2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Johor Bahru, Malaysia, 13-14 Oct. 2014, 2014.
- [53] A. Darvishi, A. Alimardani, and S. H. Hosseinian, "Fuzzy multi-objective technique integrated with differential evolution method to optimise power factor and total harmonic distortion," *IET Journals*, pp. 921-929, 14th March 2011 2011.
- [54] G. Mohapatra, "Current control of a PV integrated CHB- Multilevel inverter using PR Controller," presented at the IEEE International Conference on Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP-2018), Bhubaneswar, India March 28-30, 2018,, 2018.
- [55] A. A. K. Arani, A. Ghasemi, H.Karami, and M. Akhbari, "Optimal Switching Algorithm for Different Topologies of 15-Level Inverter Using Genetic Algorithm," presented at the 5th Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2019, 2019.

- [56] A. Chatterjee, A. Rastogi, R. Rastogi, A. Saini, and S. K. Sahoo, "Selective Harmonic Elimination of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter using Genetic Algorithm," presented at the International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies [i-PACT2017], School of Electrical Engineering, VIT University, Vellore, India., 2017, 2017.
- [57] E. Deniz, O. Aydogmus, and Z. Aydogmus, "Implementation of ANN-based Selective Harmonic Elimination PWM using Hybrid Genetic Algorithm-based optimization," *Measurement*, vol. 85, pp. 32-42, 2016.
- [58] G. Nalcaci and M. Ermis, "Effect of Grey Wolf Optimization on THD of 3-Phase Voltage Source Inverter with Selective Harmonic Elimination Base," presented at the 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA),, Elazig, Turkey, 2019.
- [59] B. Alamri, A. Sallama, and M. Darwish, "Optimum SHE for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters Using: NR-GA-PSO, Comparative Study," presented at the 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, UK, 10-12 Feb. 2015, 2015.
- [60] E. Deniz, O. Aydogmus, and Z. Aydogmus, "GA-Based Optimization and ANN-Based SHEPWM Generation for Two-Level Inverter," presented at the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain, 17-19 March 2015, 2015.
- [61] S. Sudha Letha, T. Thakur, and J. Kumar, "Harmonic elimination of a photo-voltaic based cascaded H-bridge multilevel inverter using PSO (particle swarm optimization) for induction motor drive," *Energy*, vol. 107, pp. 335-346, 2016.
- [62] M. A. Memon, S. Mekhilef, and M. Mubin, "Selective harmonic elimination in multilevel inverter using hybrid APSO algorithm," *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 10, pp. 1673-1680, 2018.
- [63] A. I.A., Okediran, and O. O.O, C.A, "Particle Swarm Optimization Approach to Harmonic Reduction in Voltage Source Multilevel Inverter," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, vol. 5, November 2015 2015.
- [64] R. Omar, Nizam, M. Rasheed, and M. Sulaiman, "A Single Phase of Modified Multilevel Inverter using Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm " presented at the IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS 2019), Selangor, Malaysia, 29 June 2019, 2019.
- [65] R. Mohanty, D. Chatterjee, S. Suman, and G. Sengupta, "PSO Based Improved Topology for MLI Considering Low THD and Low Switching Loss," presented at the 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Kanpur Kanpur, India July 6-8, 2019, 2019.
- [66] M. Babaei and H. Rastegar, "Selective Harmonic Elimination PWM Using Ant Colony Optimization," presented at the 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE20 17), 2-4 May 2017, 2017.
- [67] G. Nalcaci and M. Ermis, "Selective Harmonic Elimination for Three-Phase Voltage Source Inverters Using Whale Optimizer Algorithm," presented at the 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Istanbul, Turkey, 3-5 May 2018, 2018.
- [68] J. K. Sahu, S. K. Mishra, and K. Hariharan, "Harmonic Analysis of Three Phase Inverter by using Particle Swarm Optimization Technique," presented at the Second International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT 2019), Tirunelveli, India, India, 27-29 Nov. 2019, 2019.

- [69] X. Cai, Z. Wu, Q. Li, and S. Wang, "An Improved Phase-Shifted Carrier Pulse Width Modulation Based on the Artificial Bee Colony Algorithm for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters," *Journal of Power Electronics*, vol. 16, no. 2, pp. 512-521, 2016.
- [70] L. Manai, M. Dabboussi, F. Armi, and M. Besbes, "Cascaded multilevel inverter control considering low harmonic content based on comparison study between firefly and newton raphson algorithm," presented at the 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT-2016), Tunisia, Hammamet, December, 16-18, 2016 2016.
- [71] S. D. Patil, S. G. Kadwane, and A. Kadu, "Hybrid Optimization Approach Applied for Harmonic Reduction in Multilevel Inverter," presented at the First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), 2020.
- [72] Waad Rtibi, Mohamed Yaich, Wasma Hanini, Lofti M'barji, and M. Ayadi, "The Ant Colony Optimization Algorithm Application on The Speed Control of The Electrical Vehicle System Powered by The Five-Level NPC Inverter " presented at the 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET). Auckland University of Technology, June 03,2020, 2020.
- [73] M. Babaie, M. Sharifzadeh, M. Mehrasa, and K. Al-Haddad, "Optimized Based Algorithm First Order Sliding Mode Control for Grid-Connected Packed E-Cell (PEC) Inverter," presented at the Energy Conversion Congress and Exposition, 2019, 2019.
- [74] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, H. A. Talebi, and A. Niknam-Kumle, " A Hybrid ANFIS/ABC-based Online Selective Harmonic Elimination Switching Pattern for Cascaded Multi-level Inverters of Microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1-1, 2017 2019.
- [75] N. V. Kumar, V. K. Chinnaiyan, Pradish.M, and M. Divekar, "Selective Harmonic Elimination : An Comparative Analysis for Seven level Inverter," presented at the 2016 IEEE Students' Technology Symposium (TechSym), Kharagpur, India, 30 Sept.-2 Oct. 2016, 2016.
- [76] P. Q. Dzung, N. T. Tien, N. D. Tuyen, and H. H. Lee, "Selective Harmonic Elimination for Cascaded Multilevel Inverters Using Grey Wolf Optimizer Algorithm," presented at the 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, Seoul, Korea, June 1 - 5, 2015 2015.
- [77] K. Ganesan, K. Barathi, P. Chandrasekar, and D. Balaji. (2015) Selective Harmonic Elimination of Cascaded Multilevel Inverter Using BAT Algorithm. *Procedia Technology*. 651-657.
- [78] A. I.A, Fakolujo, O.A, and G. A. Adepoju, "Ant colony optimization approach to selective harmonic elimination in multilevel inverter," *impact journals*, vol. Vol. 3, , no. 9, pp. 31-42, 9, sep 2015 2015.
- [79] Sarika D. Patil, Sumant G. Kadwane, and S. P. Gawande, "Ant colony optimization applied to selective harmonic elimination in multilevel inverters " presented at the International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT) Bangalore, India, 21-23 July 2016, 2016.
- [80] S. Y. Mousazadeh Mousavi, M. Zabihi Laharami, A. Niknam Kumle, and S. H. Fathi, "Application of ABC algorithm for selective harmonic elimination switching pattern of cascade multilevel inverter with unequal DC sources," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 4, 2018.
- [81] W. Razia Sultana, S. K. Sahoo, S. P. Karthikeyan, I. J. Raglend, A. Chandrashekar, and A. Syam Pradeep, "Application of Bacterial Foraging Optimization for Elimination of Lower Order Harmonics in Seven Level Inverter," in *Power Electronics and Renewable Energy Systems*(Lecture Notes in Electrical Engineering, 2015, pp. 1173-1181.

- [82] M. Gnana Sundari, M. Rajaram, and S. Balaraman, "Application of improved firefly algorithm for programmed PWM in multilevel inverter with adjustable DC sources," *Applied Soft Computing*, vol. 41, pp. 169-179, 2016.
- [83] J. Mars and R. Hundt, "Scenario Based Optimization: A Framework for Statically Enabling Online Optimizations," presented at the 2009 International Symposium on Code Generation and Optimization, 2009.
- [84] D. Gutiérrez, J. M. López, and W. M. Villa, "Metaheuristic Techniques Applied to the Optimal Reactive Power Dispatch: A Review," *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 14, p. 11, May 2016 2016.
- [85] I. R. Medina, "Algoritmos bioinspirados: Una revisión según sus fundamentos biológicos.," University of Manchester 2014.
- [86] Bilal, M. Pant, H. Zaheer, L. Garcia-Hernandez, and A. Abraham, "Differential Evolution: A review of more than two decades of research," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 90, 2020.
- [87] K. Price, R. Storn, and J. Lampinen, *Differential Evolution A practical Approach to Global Optimization*. Alemania, 2005, p. 542.
- [88] H. Malik, A. Iqbal, P. Joshi, S. A. ., and F. I. Bakhsh, *Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications*. 2021, p. 830.
- [89] E. M. Montes, "Paradigmas emergentes en algoritmos bio-inspirados," in *Inteligencia Artificial*, Alfaomega, Ed.: Alfaomega, 2006.
- [90] E. J. Castillo, "Esquema Adaptativo para el Manejo de Restricciones de Límite en Problemas de Optimización Numérica Restringida," Doctorado, Centro de Investigación en Inteligencia Artificial Universidad Veracruzana Xalapa, Veracruz, 2019.
- [91] H. C. Culebro, C. A. Cruz-Villar, M.-G. M. Peñaloza, and E. M. Montes, "Constraint-Handling Techniques for the Concurrent Design of a Five-Bar Parallel Robot," *IEEE*, vol. 5, p. 12, November 14, 2017. 2017.
- [92] J. Zhang and A. C. Sanderson, *Adaptive Differential Evolution A Robust Approach to Multimodal Problem Optimization*. 2009.
- [93] J. Ronkkoen, S. Kukkonen, and K. V. Price, "Real-Parameter Optimization with Differential Evolution," presented at the 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Edinburgh, UK, 2-5 Sept. 2005, 2005.
- [94] E. Mezura-Montes, M. E. Miranda-Varela, and R. del Carmen Gómez-Ramón, "Differential evolution in constrained numerical optimization: An empirical study," *Information Sciences*, vol. 180, no. 22, pp. 4223-4262, 2010.
- [95] E. Juárez-Castillo, N. Pérez-Castro, and E. Mezura-Montes, "An Improved Centroid-Based Boundary Constraint-Handling Method in Differential Evolution for Constrained Optimization," *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, vol. 31, no. 11, 2017.

Anexo A. Código del algoritmo de ED s

```
clc
clear
%% Parametros del problema
Inf = [0 0 0] %Limites inferiores
Sup = [90 90 90] % Limites superiores
%Definimos la función en otra hoja
THDFUN = @thd_71 %Fitnees Function-- es la funcion puesta en otra pagina
%%parametros esp. ED
Np= 1000 %población de individuos (no. max de generaciones)
T= 200 % No. interacciones/generaciones
Cr = 0.9 % Porcentaje de cruza/ variable de comparación
F= 0.3 % Factor de escala
%%Inicio de ED
Padre= NaN(Np,1); % Vector para almacenar el valor de la función fitness target
(vector padre)
Dimension= length(Inf); % numero de variables de desicion (dimensiones)
Prueba= NaN(Np,Dimension); % matriz para guardar los vectores de prueba(trials)
Poblacion= repmat(Inf,Np,1) + repmat((Sup-Inf),Np,1).*rand(Np,Dimension);
%Generar la población inicial//repmat devuelve una matriz que contiene n copias
H=NaN(Np,1); %guardar ansr
Bestft=[T]; %Mejor en la generación
tic
for p= 1:Np
    Padre(p),H(p) = THDFUN(Poblacion(p,:)); %CORRERA P VECES MIENTRAS
    CHECA LA FITNEES FUNCTION//guarda valores y suma de restricciones
end
%% Proceso de ED
for t = 1: T %Generaciones
    for i= 1:Np %tamaño de población
        %% Mutación
        Candidates = [1: i-1 i+1:Np]; % Asegurarse de que el miembro actual no es
similar %%mecanismo de seleccion de padres
        idx = Candidates(randperm(Np-1,3)); %seleccion de 3 candidatos al azar
        X1= Poblacion (idx(1),:); %Asignación de la solución 1 seleccionada al azar
        X2= Poblacion (idx(2),:); %Asignación de la solución 2 seleccionada al azar
        X3= Poblacion (idx(3),:); %Asignación de la solución 3 seleccionada al azar

        V = X1 + F*(X2 -X3); %GENERANDO EL VECTOR Mutante
        %tecnica de manejo de restricciones (limites)
        for k=1:3
            if V(k)<Inf(k)
                V(k)=((Inf(k)+Poblacion(i,k))/2);
            end
        end
    end
end
```

```

elseif V(k)>Sup(k)
    V(k)=((Sup(k)+Poblacion(i,k)/2));
end
end

%%Crossover
del = randi(Dimension,1); %Generación de la variable aleatoria delta
for j = 1:Dimension
    if (rand <=Cr) || del ==j % comprobar el vector donante o el vector objetivo
        Prueba(i,j) = V(j); % Aceptar la variable del vector donante
    else
        Prueba(i,j) = Poblacion(i,j); %Aceptar la variable del vector target(padre)
    end
end
end
%%Selección de límites y búsqueda de la calidad

fSon=0;%variable para guardar Funcion fitness del hijo
Son=0;%variable para guardar sumatoria restricciones
[fSon,Son] = THDFUN(Prueba(i,:)); %Evaluación de la aptitud (fitness) de la
solución de prueba
%%Mecanismo de reemplazo(tecnicade manejo de restricciones, reglas
%%factibles
if H(i)==0 && Son==0 % checar si es factible el vector padre y el vector hijo
    if fSon < Padre(i) %Seleccion
        Poblacion(i,:) = Prueba(i,:); % Incluye la nueva solución en la población
        Padre(i) = fSon; % Incluye el valor de la función de aptitud de la nueva
solución en la población
    end
elseif H(i)~=0 && Son==0
    Poblacion(i,:)=Prueba(i,:);
    Padre(i) = fSon;
    H(i)=Son;
elseif H(i)~=0 && Son~=0
    if Son < H(i)
        Poblacion(i,:)=Prueba(i,:);
        Padre(i) = fSon;
        H(i)=Son;
    end
end
end
Bestfft(t)=min(Padre);
end
toc

%%Impresión datos
[bestfitness,ind] = min(Padre);

```

```
bestsol = Poblacion(ind,:)  
Ang1=bestsol(1);  
Ang2=bestsol(2);  
Ang3=bestsol(3);  
[Bestbest,indBest]=min(Bestft)  
  
%figure;  
%plot(Bestft,'LineWidth',2);  
%semilogy(Bestft,'LineWidth',2);  
%xlabel('Generacion');  
%ylabel('Best Objective Function');  
%grid on
```

Anexo B. Modulación del CHBMLI siete niveles

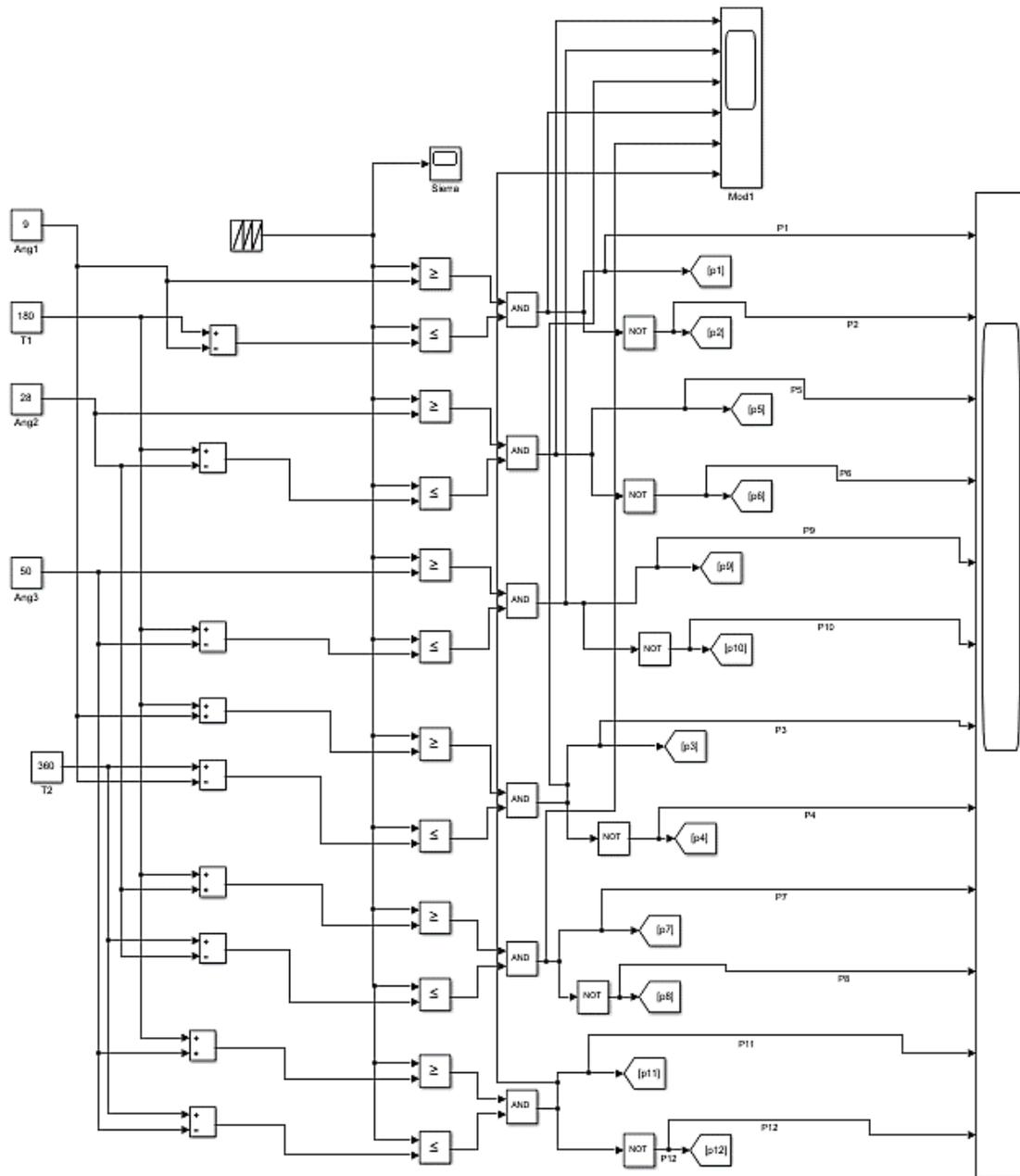


Figura A.1 Bloque de modulación CHBMLI siete niveles.

Anexo C. Pulsos en la salida de la etapa moduladora del inversor

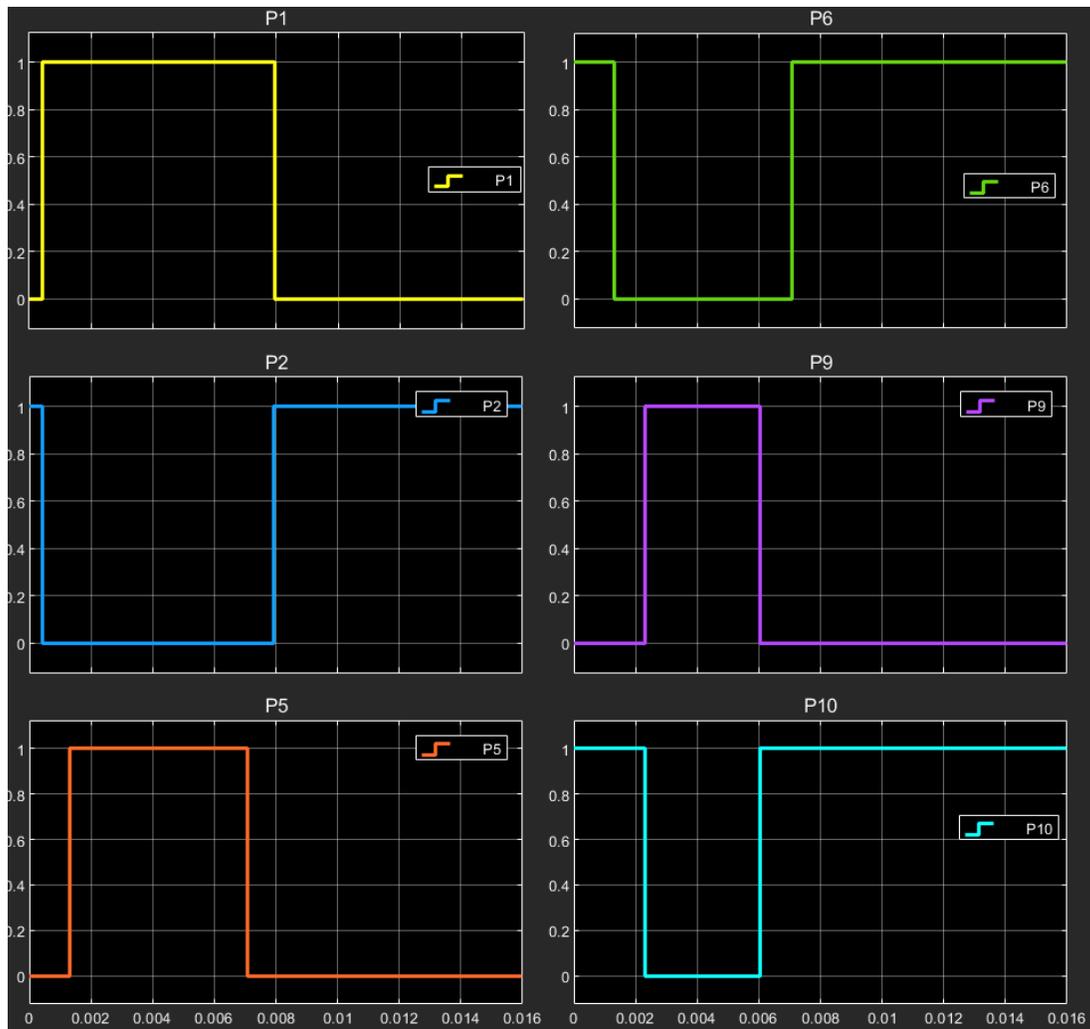


Figura A.2 A) Pulsos P1, P2, P5, P6, P9, P10 generados a la salida

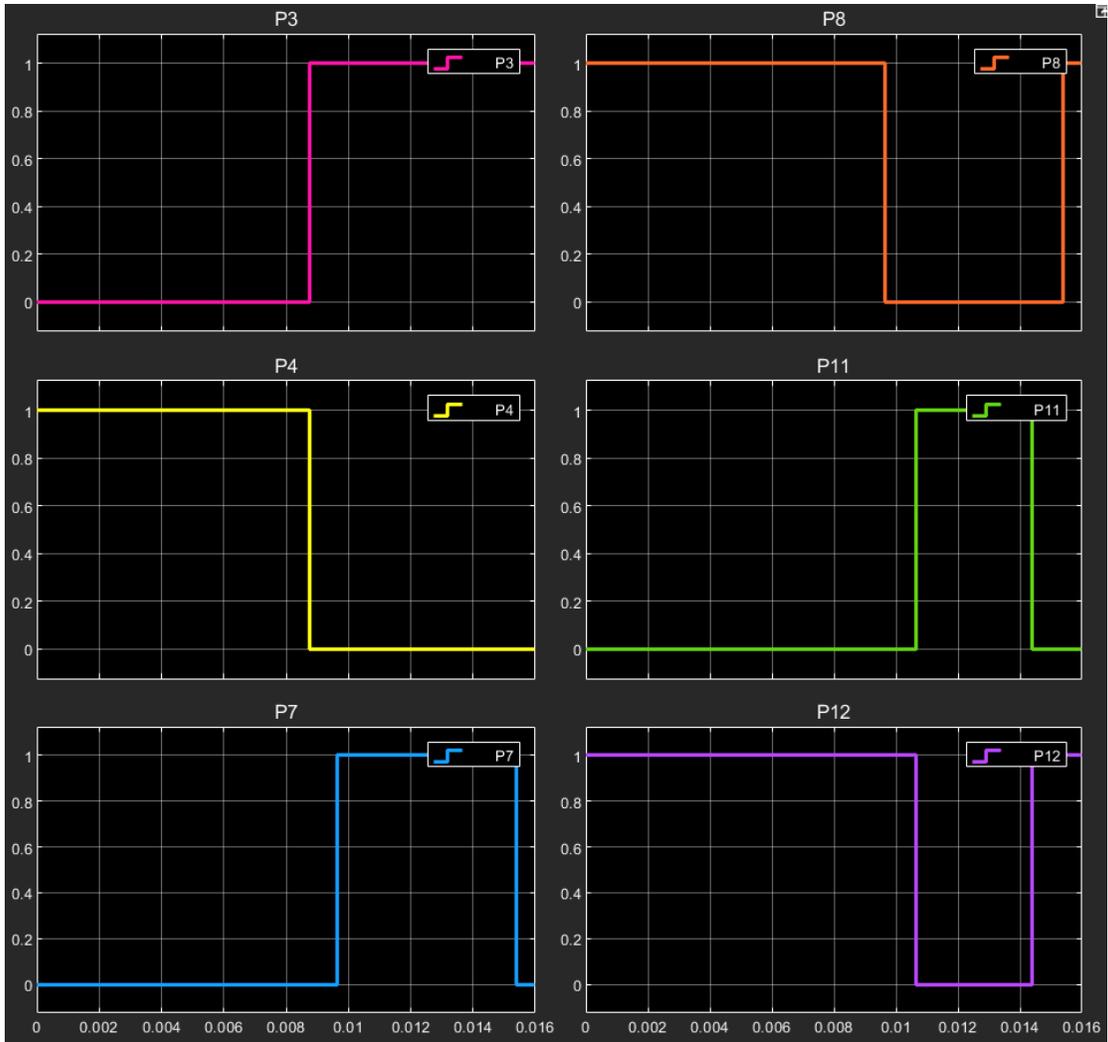


Figura A.2 B) Pulsos P3, P4, P7, P8, P11, P12 generados a la salida

Anexo D. Modificación función objetivo, para cálculo del Mi.

%%% Función Objetivo THD/CMLI 7NIVELES

```
function [THD, ansr] = thd_71(x)
```

```
sum=0;
```

```
ansr=0;
```

```
MI= 83;
```

```
for n=3:2:49
```

```
T = (((cos(x(1)*n*pi/180) + cos(x(2)*n*pi/180)+ cos(x(3)*n*pi/180))/n)^2);
```

```
sum = sum+T;
```

```
end
```

```
THD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)+cos(x(3)*pi/180));
```

```
%%%Fund*100=MI;
```

```
Fund=((400/(3*pi))*(cos(x(1)*pi/180) + cos(x(2)*pi/180)+ cos(x(3)*pi/180)))
```

```
if Fund~=MI
```

```
    ansr=ansr+70;
```

```
end
```

```
    if x(1)< x(2)&& x(2)< x(3) && x(1) < x(3)
```

```
        else ansr=ansr+120;
```

```
    end
```

```
    if (x(1)>0 && x(1)<90)&&(x(2)>0 && x(2)<90)&&(x(3)>0 && x(3)<90)
```

```
        else ansr=ansr+40;
```

```
    end
```

```
    %55,130,15
```

```
end
```

Anexo E. Artículo publicado en la revista IIETA



ABOUT SERVICES JOURNALS CONFERENCES BOOKS SUBMISSION



EJEE

- > About
- > Aims and Scope
- > Editorial Board
- > Instructions for Authors

Evolutionary Metaheuristic Methods Applied to Minimize the THD in Inverters: A Systematic Review

Oscar Sánchez-Vargas* | Susana Estefany De León-Aldaco | Jesús Aguayo-Alquicira | Adolfo Rafael López-Núñez

Corresponding Author Email: m20ce023@cenidet.tecnm.mx
Page: 237-245 · DOI: <https://doi.org/10.18280/ejee.230308>

Received: 7 April 2021 · Accepted: 6 May 2021 · Published: 21 June 2021 · Citation



DOWNLOAD PDF

OPEN ACCESS

Anexo F. Artículo aceptado para el congreso de la UAM para la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE).



lunes, 27 de septiembre de 2021

Oscar Sánchez Vargas

Presente.

Como Presidente del Comité Organizador de la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica y II Semana Iberoamericana de Ingeniería Electrónica, le informo que el Comité Técnico ha revisado la nueva versión de su artículo titulado:

Cálculo de los ángulos óptimos de conmutación para un inversor multinivel utilizando evolución diferencial

con clave:

EP-08

y considera que las recomendaciones sugeridas por los árbitros han sido tomadas en cuenta. Por lo anterior se le informa que su artículo ha sido:

Aceptado

para ser presentado en el evento.

El formato de inscripción, así como los detalles para cubrir la cuota de recuperación, se encuentran disponibles en la página electrónica del congreso: <http://senie.azc.uam.mx>.

Se le informa que su inscripción debe ser completada a más tardar el 15 de octubre.

Atentamente.

Dr. Miguel Magos Rivera
Presidente Comité Organizador
Senie 2021

Anexo G Artículo aceptado para el congreso de la UAM para la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE).



lunes, 27 de septiembre de 2021

Jesús Aguayo Alquicira

Presente.

Como Presidente del Comité Organizador de la XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica y II Semana Iberoamericana de Ingeniería Electrónica, le informo que el Comité Técnico ha revisado la nueva versión de su artículo titulado:

Selección de ángulos de conmutación para un inversor multinivel en cascada usando un algoritmo de búsqueda aleatoria

con clave:

EP-10

y considera que las recomendaciones sugeridas por los árbitros han sido tomadas en cuenta. Por lo anterior se le informa que su artículo ha sido:

Aceptado

para ser presentado en el evento.

El formato de inscripción, así como los detalles para cubrir la cuota de recuperación, se encuentran disponibles en la página electrónica del congreso: <http://senie.azc.uam.mx>.

Se le informa que su inscripción debe ser completada a más tardar el 15 de octubre.

Atentamente.

Dr. Miguel Magos Rivera
Presidente Comité Organizador
Senie 2021