

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Estudio de los métodos de optimización en el
convertidor multinivel en cascada monofásico

presentada por
Ing. Manuel Marín Reyes

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

Director de tesis
Dr. Jesus Aguayo Alquicira

Codirector de tesis
Dra. Susana E. De León Aldaco

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2019



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor., 14 de diciembre de 2018.

OFICIO No. DIE/0197/2018

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Manuel Marín Reyes**, con número de control **M17CE008** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"ESTUDIO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN EN EL CONVERTIDOR MULTINIVEL EN CASCADA MONOFÁSICO"** 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

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

CODIRECTOR DE TESIS

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

REVISOR 1

Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4033213

REVISOR 2

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9526506

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente
RFEJ/lrr.

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 2 62 77 79, ext. 4106, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Morelos, **25/enero/2019**

OFICIO No. SAC/042/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. MANUEL MARÍN REYES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Estudio de Métodos de Optimización en el Convertidor Multinivel en Cascada Monofásico", 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®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

CVGR/mcr



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4106, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx



Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Jesús Aguayo Alquicira y a mi co-asesora la Dra. Susana E. De León Aldaco, por el tiempo, paciencia y conocimiento invertido durante el desarrollo de este trabajo de tesis. Así mismo por la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico cuando más lo necesitaba.

A mis revisores de tesis el Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich y en especial al Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez que en cualquier momento me brindaba de su tiempo y apoyo para continuar con 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 que de no ser por ellos no hubiera sido posible todo esto (compañeros de fiestas).

A mis padres Manuel Reyes Marín Altamirano y Alma Delia Reyes Oropeza, por brindarme su amor, dedicación y la paciencia con la que cada día se preocuparon por mi salud, gracias a ellos por ser los principales motores en mis sueños por confiar y tener siempre expectativas buenas hacia mi persona.

A mi hermana Alma Giselle por su apoyo incondicional, sin lugar a dudas la hermana que todo hombre debería tener.

A Osiris (*mi marmota Reyes*), por brindarme tantas alegrías al final de la elaboración de esta tesis, por ser el arcoíris al final de mi tormenta.

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 solventar económicamente el desarrollo de esta investigación.

“Si he de vivir que sea sin timón y en el delirio.”

Mario Santiago Papasquiario

“Con un cigarrillo en la boca y con miedo. A veces los ojos verdes. Y 26 años. Un servidor.”

Roberto Bolaño

Resumen

Los inversores multinivel tienen múltiples aplicaciones industriales, así como su uso en aplicaciones de energía renovables. Los inversores multinivel en cascada con las fuentes de alimentación equilibradas son los más utilizados actualmente en la investigación. Este trabajo presenta la aplicación de los métodos de Algoritmo Genético (GA, por sus siglas en inglés), Optimización por Enjambre de Partículas (PSO, por sus siglas en inglés) y Newton Raphson (NR, por sus siglas en inglés), para resolver el sistema de ecuaciones no lineales trascendentales y obtener los ángulos de conmutación óptimos para disminuir el valor de distorsión armónica total (THD). Con el objetivo de obtener un valor de THD más bajo, se puede conseguir una forma de onda de tensión de salida de mejor calidad en un inversor monofásico, multinivel y en cascada.

El análisis comparativo de los resultados obtenidos en este trabajo, muestra que los algoritmos (Genético y enjambre de partículas) tienen un mejor desempeño para optimizar los armónicos en inversores multinivel en comparación con el método Newton Raphson. Por otra parte, se comparó el algoritmo genético con el de enjambre de partículas, y se encontró que producen resultados muy similares.

En este documento se exponen técnicas de modulación que se encuentran en la categoría de baja frecuencia, esto con el fin de poder obtener una forma de onda de tensión a la salida escalonada. En esta categoría se encuentra la llamada forma de onda armónica escalonada optimizada (OHSW, por sus siglas en inglés) en la que se puede dividir: Eliminación selectiva de armónicos (SHE, por sus siglas en inglés) y minimización óptima de la distorsión armónica total (OMTHD, por sus siglas en inglés). Además, se agregó un método analítico (solo se hizo para el caso de MLI de 3 niveles debido a que puede converger en una solución satisfactoria a causa de que es una sola variable a calcular).

La simulación fue llevada a cabo en la plataforma de Psim. Para la obtención de este trabajo se elaboró la construcción de una plataforma experimental para un convertidor multinivel en cascada (CMLI, por sus siglas en inglés) de 3, 5, 7 y 9 niveles.

Abstract

Multi-level inverters have multiple industrial applications, as well as their use in renewable energy applications. Multilevel cascade inverters with balanced power supply are the most commonly used and are currently the most widely used in research. This work presents the application of Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm (PSO) and Newton Raphson (NR) methods to solve the system of transcendental nonlinear equations and obtain the optimal switching angles to decrease the total harmonic distortion (THD) value. In order to obtain a lower THD value, a better quality of the output voltage waveform can be achieved in a single-phase, multi-level, cascading inverter.

Having made a comparison of the results obtained in this work shows that the algorithms (Genetic and Swarm) has a better approach to optimize harmonics in multilevel inverters compared to the Newton Raphson method. On the other hand, the genetic algorithm was compared with that of swarming particles, and was found to produce very similar results.

In this paper we present modulation techniques that are in the low-frequency category, in order to obtain a voltage waveform at the staggered output. In this category is the so-called Optimized Stepped Harmonic Waveform (OHSW) into which it can be divided: Selective Harmonic Elimination (SHE) and Optimal Minimization of Total Harmonic Distortion (OMTHD). In addition to adding an analytical method (it was only done for the case of MLI 3 levels because it can converge into a satisfactory solution because it is a single variable to calculate).

The simulation was carried out on the Psim platform. In order to obtain this work, the construction of an experimental platform for a multi-level cascade converter (CMLI) of 3, 5, 7 and 9 levels were elaborated.

Tabla de contenido.....	i
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de figuras.....	x
Índice de tablas	xii
Acrónimos	xii
Capítulo 1 Introducción	1
1.Introducción.....	1
1.1. Antecedentes y motivación	1
1.2. Inversor Multinivel.....	2
1.3. Inversor Multinivel en Cascada.....	3
1.4. Técnicas de modulación	5
1.5. Distorsión armónica	6
1.5.1. <i>Distorsión armónica total (THD)</i>	6
1.5.2. <i>Factor de distorsión (Weighted Total Harmonic Distortion o WTHD)</i>	7
1.5.3. <i>Normativa</i>	8
1.6. Estado del arte.....	8
1.7. Planteamiento del problema.....	8
1.8. Propuesta de solución	9
1.9. Objetivos	9
1.9.1. <i>Objetivo general</i>	9
1.9.2. <i>Objetivos específicos</i>	10
1.10. Alcances y limitaciones del trabajo de investigación	10
1.11. Estructura general de la tesis.....	10

Capítulo 2 Métodos metaheurísticos de optimización aplicados a inversores multinivel	11
2.Métodos metaheurísticos de optimización aplicados a inversores multinivel11
2.1. Introducción	11
2.2. El problema de optimización.....	12
2.3. Métodos de optimización	12
2.3.1. <i>Newton Raphson</i>	13
2.3.2. <i>Algoritmo Genético</i>	15
2.3.3. <i>Optimización por enjambre de partículas</i>	17
2.4. Resultado de la revisión del estado del arte	19
2.5. Conclusiones	21
Capítulo 3 Optimización.....	23
3.Análisis de minimización	23
3.1. Método OMTHD.....	23
3.2. Método SHE.....	25
3.3. Método Analítico.....	27
Capítulo 4 Diseño e implementación.....	34
4.Introducción.....	34
4.1. Desarrollo del algoritmo NR.....	35
4.2. Desarrollo del algoritmo GA.....	36
4.3. Desarrollo del algoritmo PSO	39
4.4. Lenguaje VHDL y FPGA.....	41
4.5. Elaboración de la implementación en programación VHDL	41
4.5.1. <i>Generación del proyecto en Quartus II</i>	41
4.5.2. <i>Designación de librerías</i>	45
4.5.3. <i>Declaración de entidades</i>	45

4.5.4. Descripción de arquitectura.....	46
4.6. Descripción de la implementación digital en VHDL.....	46
Capítulo 5 Presentación de resultados	49
5. Introducción.....	49
5.1. Inversor multinivel en cascada (OMTHD).....	51
5.1.1. CMLI 3 niveles	54
5.1.2. CMLI 5 niveles	54
5.1.3. CMLI 7 niveles	55
5.1.4. CMLI 9 niveles	55
5.2. Inversor multinivel en cascada (SHE).....	56
5.2.1. CMLI 3 niveles	57
5.2.2. CMLI 5 niveles	58
5.2.3. CMLI 7 niveles	58
5.2.4. CMLI 9 niveles	59
5.3. Observaciones y conclusiones.....	59
Capítulo 6 Conclusiones	60
6.1. Resumen de conclusiones	60
6.2. Trabajos futuros	61
6.3. Publicaciones	61
Referencias	62
ANEXO A. Diseño de placas del convertidor multinivel.....	66
ANEXO B. Código para algoritmo PSO	70
ANEXO C. CONFIGURACIÓN DE PROGRAMACIÓN DE ALTERA.....	75
ANEXO D. Descripción del hardware utilizado.....	77
ANEXO E. Código en lenguaje VHDL para MLI 9 niveles	78

ANEXO F. Artículo aceptado y presentado en CIEP 81

ANEXO G. Artículo en revisión en ELSEVIER 82

Índice de figuras

Figura 1. Configuración del inversor multinivel en cascada monofásico.....	4
Figura 2. Forma de onda de tensión de un inversor monofásico multinivel de 7 niveles.....	5
Figura 3. Clasificación de las técnicas de modulación.	6
Figura 4. Diagrama de flujo general del algoritmo NR.	14
Figura 5. Diagrama de flujo general del algoritmo GA.	16
Figura 6. Diagrama de flujo general del algoritmo PSO.	18
Figura 7. Forma de onda de salida en un convertidor multinivel simétrico[46].	24
.....	24
Figura 8. 3 niveles 1 ángulo por $\frac{1}{4}$ ciclo (Fourier)	27
Figura 9. Curva de la función de la componente fundamental.	29
Figura 10. Vista ecuaciones no lineales agrupadas como bloque de función.	35
Figura 11. Función objetivo para MLI 9 niveles (minimización THD).	36
Figura 12. Algoritmo GA expresado en script en MATLAB	37
Figura 13. Toolbox GA.....	38
Figura 14. Función objetivo para MLI 9 niveles (minimización THD).	39
Figura 15. Algoritmo GA expresado en script en MATLAB	40
Figura 16. Ventana principal de inicio del programa QUARTUS II versión 13.	41
.....	41
Figura 17. Menú de archivos del QUARTUS II.....	42
Figura 18. Tarjeta Altera CYCLONE IV EP4CE22F17C6N.	42
Figura 19. Ventanas de configuración de proyecto. a) Ventana de introducción. b) Ventana de ubicación de archivos y nombramientos. c) Ventana de adjunción de archivos. d) Ventana de designación de hardware. e) Ventana de configuraciones avanzadas.	43
Figura 20. Project Navigator	44
Figura 21. Menú de creación de archivos	44
Figura 22. Editor de código VHDL.	45
Figura 23. Asignación de librerías en proyecto VHDL	45
Figura 24. Declaración de entidades	46
Figura 25. Comportamiento de la arquitectura	46
Figura 26. Reporte de compilación	47

Figura 27. RTL vista final.....	48
Figura 28. Función objetivo de la curva de ejecución frente al número de iteraciones en el algoritmo PSO. Caso MLI 7 niveles.....	51
Figura 29. Curva de ejecución del valor de aptitud vs. número de generaciones en el algoritmo GA. Caso MLI 7 niveles.	52
Figura 30. Comportamiento típico del modelo PSO. Caso MLI 5 niveles	52
Figura 31. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 3, comparativa	54
Figura 32. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 5, comparativa	54
Figura 33. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 7, comparativa	55
Figura 34. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 9, comparativa	55
Figura 35. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 3, comparativa	57
Figura 36. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 5, comparativa	58
Figura 37. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 7, comparativa	58
Figura 38 Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 9, comparativa	59

Índice de tablas

Tabla I. Variables de optimización	21
Tabla II. Parámetros del algoritmo PSO	50
Tabla III. Parámetro del algoritmo GA.....	50
Tabla IV. Comparación de los algoritmos NR, GA y PSO para los niveles 5, 7 y 9 de CHB-MLI. OMTHD	53
Tabla V. Valor fundamental de la amplitud de la tensión (m). Usando OMTHD.....	53
Tabla VI. Comparación de los algoritmos NR, GA y PSO para los niveles 5, 7 y 9 de CHB-MLI. OMTHD	56
Tabla VII. Valor fundamental de la amplitud de la tensión (m). Usando SHE.	57

Acrónimos

Símbolo	Significado
CMLI	Convertidor inversor multinivel
FCMLI	Inversor multinivel con condensador flotante
DCMLI	Inversor multinivel con diodos de enclavamiento
CC	Corriente continua
FFT	Transformada rápida de Fourier
CHB-MLI	Convertidor inversor multinivel en cascada puente H
PD	Disposición de fase
POD	Disposición opuesta de fase
APOD	Disposición alterna opuesta de fase
SPWM	Modulación por ancho de pulso sinusoidal
SVC	Control vectorial espacial
THD	Distorsión armónica total
WTHD	Distorsión armónica total ponderada
GA	Algoritmo genético
PSO	Optimización por enjambre de partículas
NR	Newton Raphson
OMTHD	Minimización óptima de la distorsión armónica total
SHE	Eliminación selectiva de armónicos
RLT	Nivel de transferencia de registro

Capítulo 1 **Introducción**

Los convertidores multinivel suelen diseñarse utilizando dispositivos de conmutación de potencia como MOSFET o IGBT. Para obtener una forma de onda de salida de buena calidad, se requiere una compensación entre dos conceptos: la topología (conexión de los interruptores) y la secuencia de conmutación de los interruptores (encendido/apagado).

Un reto importante en el campo de los inversores multinivel es el cálculo de los ángulos de conmutación óptimos para los interruptores de potencia que resuelven mediante la solución de ecuaciones no lineales trascendentales, con el fin de eliminar los armónicos de bajo orden en su forma de onda de salida. Para ello, existen diferentes métodos para eliminar los armónicos de bajo orden y así lograr una reducción en la distorsión armónica total (THD).

1. Introducción

En este capítulo se describen los antecedentes y la motivación de este trabajo de investigación. Así mismo se incluye un resumen de la ubicación del problema de optimización en los convertidores multinivel de potencia. Además, la descripción de las diferentes técnicas que se han presentadas para solucionar dichos problemas. Al final de este capítulo se presenta una breve descripción de la estructura del documento en forma general.

1.1. Antecedentes y motivación

Actualmente, la energía eléctrica se genera a gran escala en las grandes centrales usando las máquinas rotatoria síncronas en donde el campo se encuentra excitado con un voltaje en CC e impulsado de manera mecánica mediante una turbina, dando como resultado una tensión de salida sinusoidal trifásica en las terminales de su armadura [1, 2].

La continua mejora y evolución de los procesos industriales han aumentado la demanda en cuanto a estrategias confiables para el control y funcionamiento óptimo de los mismos. Por esto se requieren estudios para satisfacer estas necesidades [3].

Algunos de los tópicos de gran interés para la industria de la electrónica de potencia para el desarrollo de convertidores de potencia (inversores) están relacionados con la disminución del consumo energético de los dispositivos semiconductores de potencia (DSEP), la reducción de las pérdidas debidas a la conmutación de los interruptores y la reducción del contenido armónico en la salida del convertidor [4].

El uso del término “calidad de la energía” se encuentra relacionado con el rendimiento del convertidor de potencia, no deben existir problemas de inestabilidad o deformación en la forma de onda proporcionada por el módulo electrónico. Además, el convertidor puede estar sujeto a ciertos criterios en cuanto a especificaciones de diseño que implican parámetros fijos o dinámicos (por ejemplo, amplitud, frecuencia, fase) [5, 6].

Los convertidores convencionales presentan ciertos problemas en cuanto a la calidad de energía se refiere, debido a la distorsión armónica que generan en su salida. Así como al comportamiento de los equipos eléctricos alimentados por los mismos, especialmente para aplicaciones de gran potencia. En la literatura se han propuesto numerosas técnicas con enfoques de la optimización que buscan minimizar la distorsión armónica total (THD). Estas técnicas están en función de la topología utilizada, objetivo y la forma de la búsqueda del punto óptimo. Existen estrategias muy prometedoras en la línea de algoritmos evolutivos inspirados en la naturaleza como optimización por enjambre de partículas (PSO) y los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) dando como resultado, múltiples comparativas entre algoritmos inspirados en la naturaleza y los algoritmos clásicos como el Newton Raphson (NR). Además, algunos trabajos han usado la hibridación de estas técnicas con inteligencia artificial, estableciendo una nueva herramienta para la optimización, a pesar de su relativa actualidad, por lo que constituye una herramienta eficaz y atractiva en el momento oportuno para resolver un problema de optimización.

1.2. Inversor Multinivel

En los últimos años el uso de inversores multinivel se ha incrementado de manera considerable. Son muy utilizados en múltiples aplicaciones en donde se requiera la manipulación de la energía eléctrica. Debido al amplio proceso de investigación y desarrollo de nuevos dispositivos

semiconductores de potencia, que los desarrolla más económicos y eficientes. Últimamente se ha incrementado la aplicación de los inversores multinivel para servicios públicos generales, control de energía y sector industrial. Las topologías de convertidores multinivel son ampliamente utilizadas por los diseñadores en el campo de la electrónica de potencia haciendo uso de ellas para diferentes aplicaciones tales como: accionamientos eléctricos para motores, accionamientos de potencia media para aplicaciones en vehículos eléctricos e híbridos, compensadores estáticos de potencia reactiva, sistemas de alimentación ininterrumpida y aplicaciones de fuentes de energía renovables, etc. [7, 8].

Los inversores multinivel producen una forma de onda de salida con un menor contenido armónico, esto a costa de un incremento en el número de dispositivos electrónicos de potencia, fuentes de voltajes de CC, tamaño, costo, etc. Debido al incremento en cuanto al número de interruptores utilizados en los inversores multinivel, se incrementa la dificultad de implementar el control.

La topología multinivel presenta múltiples ventajas en comparación con los inversores convencionales de dos niveles, por ejemplo: la tensión de salida se puede generar con una forma de onda a una menor frecuencia de conmutación dando como resultados la reducción de pérdidas por efecto de conmutación en los interruptores de potencia, una mayor eficiencia, baja distorsión armónica y una salida en su forma de onda con una mayor semejanza a una sinusoidal. Además, presentan baja interferencia electromagnética [9].

En la literatura, se han propuesto tres topologías clásicas de inversores multinivel: Inversor multinivel con condensador flotante (FCMLI, por sus siglas en inglés), inversor multinivel con diodos de enclavamiento (DCMLI, por sus siglas en inglés) e inversor multinivel con puente en H en cascada (CHB-MLI o CMLI, por sus siglas en inglés) [10, 11].

Cada topología tiene diferentes ventajas y desventajas. Sin embargo, las CMLI tienen un mayor rendimiento en aplicaciones de energías renovables que utilizan fuentes de CC independientes, como baterías, paneles solares [12], celdas de combustible de biomasa o cualquier otro tipo de fuente de CC [13].

1.3. Inversor Multinivel en Cascada

El inversor multinivel en cascada CMLI demuestra una gran ventaja frente a otras importantes topologías reportadas en la literatura. Presenta un diseño más modular y sencillo en comparación con las topologías diodos de enclavamiento y condensadores flotados. Además, no requiere de algún

transformador diseñado especialmente, comparado con los inversores multipulso. Requiere una estrategia de conmutación simple además de ocupar menos espacio.

En la topología de los inversores multinivel en cascada(CHB-MLI), el objetivo principal es sintetizar el voltaje deseado en cada celda H-bridge de la etapa de potencia a partir de la suma de varios niveles de voltajes de CC conectados en serie para obtener una forma de onda de voltaje de salida escalonada [14]. La Figura 1 muestra la configuración de un inversor multinivel en cascada monofásico de n niveles.

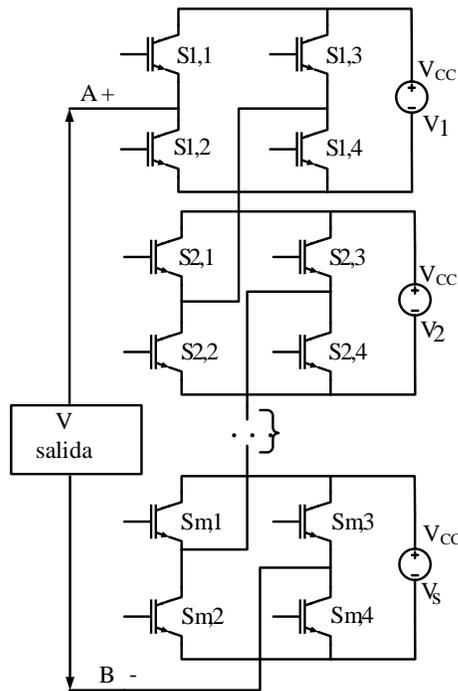


Figura 1. Configuración del inversor multinivel en cascada monofásico.

Los inversores multinivel utilizan como interruptores a dispositivos semiconductores de potencia, tales como MOSFET o IGBT. Para obtener una forma de onda de salida de buena calidad, se requiere una compensación entre dos conceptos: la topología (conexión de los interruptores) y la secuencia de conmutación de los interruptores (encendido/apagado). La Figura 2 muestra la forma de onda de tensión de salida proporcionada por un CHB-MLI monofásico de 7 niveles.

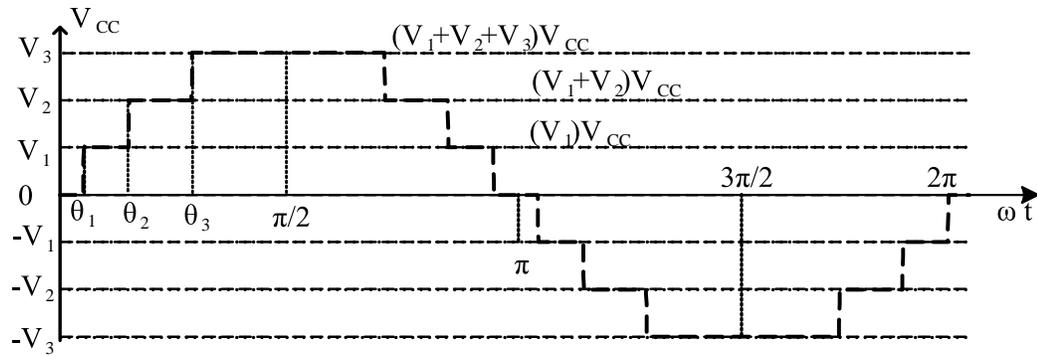


Figura 2. Forma de onda de tensión de un inversor monofásico multinivel de 7 niveles

1.4. Técnicas de modulación

Para obtener un buen rendimiento en el funcionamiento de los interruptores de potencia del inversor multinivel, se han desarrollado múltiples técnicas de modulación para ser utilizadas en numerosas topologías y aplicaciones. Estas técnicas de modulación, se pueden clasificar como técnicas en baja o alta frecuencia de conmutación [15].

Entre las técnicas de alta frecuencia de conmutación se pueden encontrar: Disposición alterna opuesta de fase (APOD, por sus siglas en inglés), disposición de fase (PD, por sus siglas en inglés), disposición opuesta de fase (POD, por sus siglas en inglés) etc., En estas técnicas los interruptores de potencia conmutan un número de veces mucho mayor que la frecuencia fundamental dando como resultado un incremento en las pérdidas de los interruptores debidos al efecto de conmutación.

Entre las técnicas de baja frecuencia de conmutación se pueden ubicar las siguientes: eliminación selectiva de armónicos (SHE) [16, 17], control vectorial espacial (SVC, por sus siglas en inglés), etc. En estas técnicas los interruptores de potencia conmutan a una frecuencia más baja (cercana a la frecuencia de la fundamental) y resultan menos afectados por las pérdidas por conmutación.

Actualmente existe un gran número de técnicas de modulación cuyo objetivo es controlar el voltaje de salida del CMLI. En la Figura 3 se muestra la clasificación general de las técnicas de modulación.

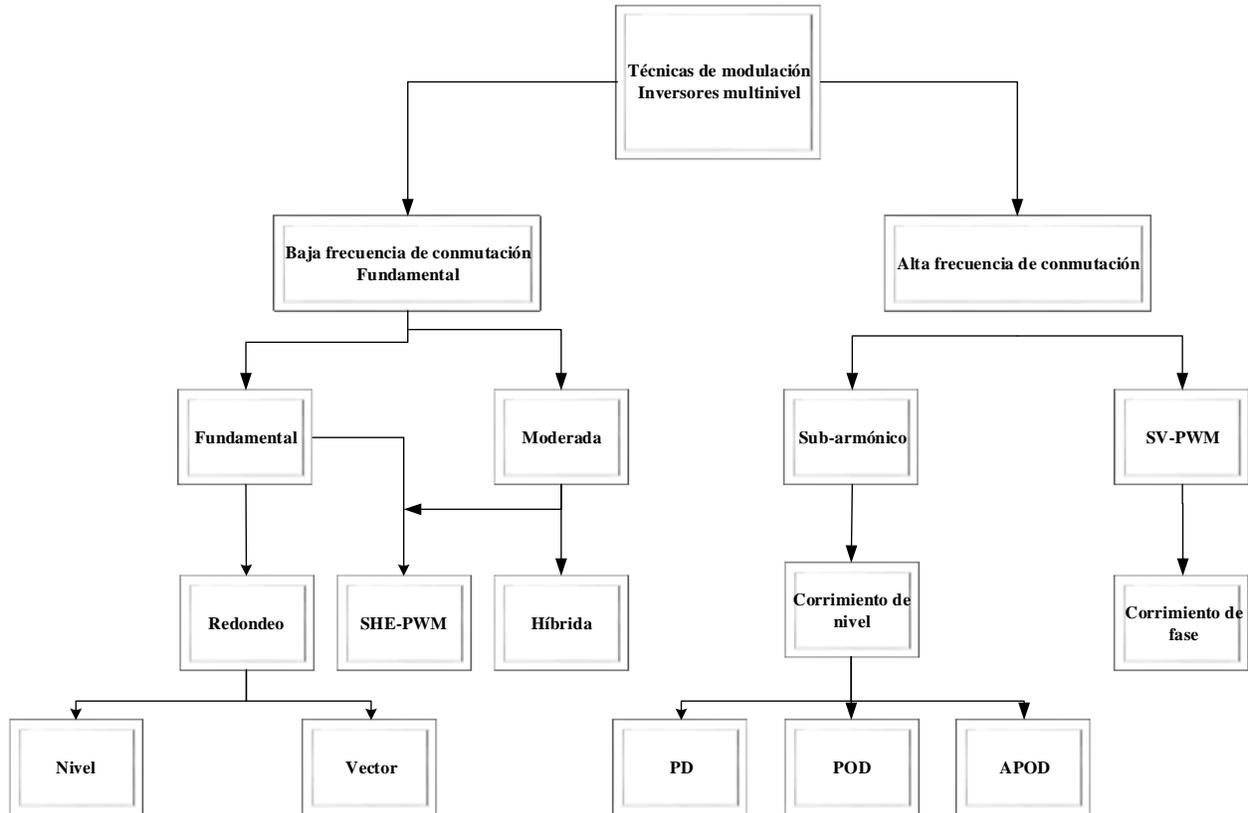


Figura 3. Clasificación de las técnicas de modulación.

1.5. Distorsión armónica

El alto contenido armónico en los sistemas de energía eléctrica provoca severos problemas en la calidad de la energía. Mayormente en casos donde se requiera la eliminación o minimización de armónicos de muy bajo orden, cercanos a la componente fundamental los cuales requieren de un filtro de gran tamaño, difícil de diseñar [18, 19]. Por lo tanto, un parámetro significativo en el diseño de un inversor multinivel eficiente es asegurar que la distorsión armónica total (THD) en el voltaje de salida sea lo suficientemente reducida [20].

1.5.1. Distorsión armónica total (THD)

Es uno de los índices más utilizados en la literatura mencionado es la Distorsión armónica total (THD), aplicable tanto para voltaje como para corriente, véase expresado para caso de corriente y voltaje en la ecuación (1). Este se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Dicho valor

generalmente se expresa como porcentaje de la componente fundamental. El valor porcentual del THD puede variar de pocas unidades hasta superar el 100%, como es el caso en las fuentes conmutadas de potencia [21, 22].

$$THD_{V,I} = \frac{\sqrt{\sum_{K=3,5,\dots}^{\infty} V_K^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

K : número de componente armónico

I_1, V_1 : valor eficaz de la componente fundamental I/V (corriente/voltaje)

I_K, V_K : valor eficaz del armónico K

1.5.2. Factor de distorsión (Weighted Total Harmonic Distortion o WTHD)

Como se mencionó anteriormente, la distorsión armónica total (THD) es una medida muy ampliamente utilizada esto con el fin para comparar técnicas de conmutación, en las cuales se evalúa la cantidad de contenido armónico en la forma de onda de voltaje de salida de un inversor multinivel, además de ser considerada como un índice de rendimiento en los inversores de potencia. Para aplicaciones que involucran el manejo de cargas de tipo inductivas, como accionamiento de motores, la Distorsión armónica total ponderada (WTHD, por sus siglas en inglés) puede ser una medida más apropiada que la THD, la WTHD se expresa con la ecuación 2.

$$WTHD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (2)$$

Donde:

V_1 : valor eficaz de la componente fundamental I/V (corriente/voltaje)

V_n : valor eficaz del armónico K

n : número de componentes armónicos

1.5.3. Normativa

Actualmente los armónicos son un tema que resulta de mucho interés debido a que pueden originar calentamiento excesivo, pulsaciones y par reducido en motores y generadores, además de causar un incremento de calentamiento y estrés de voltaje en capacitores. En conclusión, los armónicos pueden reducir la vida útil de un equipo electrónico si este se diseña sin tener en cuenta a los armónicos. Debido a lo anterior, es preciso medir y limitar los armónicos en los sistemas de energía eléctrica.

En el documento IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems[23], se brinda un fundamento para limitar los armónicos. El documento hace una mención general cuando se habla de armónicos. Además, hace alusión al valor de incertidumbre que se encuentra involucrado en las mediciones de la THD, con el fin de reducir el error en lo más posible y tener una lectura más cercana a lo real, se recomienda para su medición un equipo que sea capaz de tomar lectura hasta el armónico número cincuenta o quincuagésimo 50°.

1.6. Estado del arte

En este apartado se muestra una revisión del estado del arte relacionado con algoritmos de optimización aplicados a inversores multinivel, en algunos casos empleando el método SHE o OMTD. Muchos algoritmos de optimización se aplican con el objetivo de minimizar la THD, ya sea utilizando métodos clásicos de optimización como el método de Newton Raphson (NR), o aquellos métodos inspirados en la naturaleza como lo son: algoritmo genético (GA) y optimización por enjambre de partículas (PSO). Generalmente estos algoritmos suelen aplicarse para calcular los ángulos de conmutación para los interruptores de potencia y para cierto índice de modulación determinado. En el capítulo 2 se describe con más detalle, la revisión del estado del arte para cada método de optimización (NR, GA, PSO).

1.7. Planteamiento del problema

El problema a abordar en este trabajo de investigación, consiste en poner a prueba los avances recientes en los métodos de optimización aplicados al área de los inversores multinivel donde puede optimizarse algunos parámetros en términos de alguna función objetivo, tales como: disminución de la THD, eficiencia, peso, volumen, densidad de potencia entre otros, e implementar un banco de pruebas experimentales para medir los resultados obtenidos y posteriormente documentarlos y discutirlos.

La motivación para desarrollar el presente trabajo, se debe al impacto que la electrónica de potencia tiene actualmente en numerosas aplicaciones, tanto en el sector industrial como en el sector doméstico.

En primera instancia la señal generada por el inversor es alterna no sinusoidal con alto contenido armónico total (THD). Si bien la implementación de filtros pasivos pareciera un tema trivial, este presenta limitaciones debido a que, para obtener un bajo contenido armónico, se requiere de filtros sumamente grandes y pesados, por lo que involucraría una desventaja en cuanto a su peso (kg).

Con el propósito de mejorar el contenido armónico de la señal de salida del inversor, es posible implementar un método de optimización basados en algoritmos evolutivos, es decir, algoritmos basados en alguna heurística, los cuales son exitosos en la localización de la solución óptima bajo cualquier valor inicial totalmente arbitrario.

1.8. Propuesta de solución

Para este trabajo, se ha seleccionado como caso de estudio una topología monofásica de inversor multinivel H-Bridge (CHB-MLI) con fuentes de CC independientes. Se analizan tres escenarios: 5, 7 y 9 niveles aplicando el concepto de la forma de onda escalonada armónica optimizada (OHSW) y comparando los resultados entre la minimización óptima de la distorsión armónica total (OMTHD) y la modulación por ancho de pulso con eliminación selectiva de armónicos (SHE-PWM).

Con el fin de comparar los resultados que se obtienen con los métodos de optimización clásicos y los métodos metaheurísticos, se utilizan tres técnicas para resolver ecuaciones no lineales trascendentales para el problema de la minimización del THD: Newton Raphson (NR), Algoritmo Genético (GA) y Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), las que han utilizado ampliamente para los problemas de minimización de THD en inversores multinivel.

1.9. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos a alcanzar en esta tesis.

1.9.1. Objetivo general

Realizar un estudio comparativo con diferentes técnicas de optimización metaheurísticas aplicadas a un inversor multinivel en cascada simétrico.

1.9.2. Objetivos específicos

- Estudiar y analizar las técnicas basadas en algoritmos de búsqueda para la modulación del inversor multinivel en cascada simétrico.
- Obtener un conjunto de soluciones óptimas en inversores multinivel en cascada con fuentes simétricas empleando algoritmos de búsqueda metaheurísticos.
- Simular y comparar dichas técnicas para determinar la más adecuada de acuerdo a la optimización en el inversor multinivel en cascada monofásico.
- Implementar un inversor multinivel.
- Caracterizar y probar experimentalmente el inversor multinivel implementado.

1.10. Alcances y limitaciones del trabajo de investigación

El estudio que se pretende desarrollar consiste en la comparación de las diferentes técnicas de optimización basados en algoritmos de búsqueda metaheurísticos ya que es posible evaluar con alguna función objetivo variables como: eficiencia, peso, volumen, tamaño, densidad de potencia, entre otros. Esta investigación abordará el desarrollo, simulación y la implementación de un inversor monofásico.

1.11. Estructura general de la tesis

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte relacionado a las técnicas de optimización aplicadas a inversores multinivel.

En el capítulo 3 se describe de manera más detallada el funcionamiento de las diferentes técnicas de optimización, así como el desarrollo de su implementación.

En el capítulo 4 se muestra el diseño e implementación de las técnicas de modulación, realizados en un FPGA (matriz de puertas programables, por sus siglas en inglés), las implementaciones de las técnicas de optimización se llevaron a cabo utilizando el software de Matlab.

En el capítulo 5 se explican las pruebas y resultados obtenidos para la validación de los datos de simulación. Estas pruebas se desarrollaron con un inversor multinivel, la simulación fue llevada a cabo en la plataforma Psim, desarrollado por POWERSIM para la recolección de datos en cuanto a distorsión armónica.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

Capítulo 2

Métodos metaheurísticos de optimización aplicados a inversores multinivel

La minimización (THD) es un problema complejo de resolver debido a que la forma de onda de salida del convertidor multinivel se genera paso a paso por medio de los interruptores de potencia, el objetivo es encontrar los ángulos de conmutación óptimos para reducir la THD, además de eliminar los armónicos de menor orden. Por lo tanto, esta necesidad se considera un problema de optimización. Como resultado, existe un gran número de algoritmos basados en la naturaleza, que tienen como idea principal obtener la mejor solución a un problema complejo, donde se localizan múltiples máximos locales y globales. Estos algoritmos pueden encontrar soluciones con un consumo de recursos computacionales aceptables. Entre los métodos metaheurísticos basados en la naturaleza se encuentran los de optimización por enjambres de partículas (PSO) y algoritmo genético (GA).

2. Métodos metaheurísticos de optimización aplicados a inversores multinivel

2.1. Introducción

A lo largo del tiempo se han desarrollado múltiples estrategias de control, así como diferentes tipos de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) entre otros, esto con el fin de provocar una disminución de los armónicos en la salida de los inversores multinivel, en esta última

presenta en ciertos casos un problema el cual es su incapacidad para eliminar plenamente los armónicos de más bajo orden.

2.2. El problema de optimización

La teoría de optimización matemática está integrada por un conjunto de métodos numéricos enfocados a encontrar e identificar al mejor candidato entre múltiples alternativas.

El proceso de optimización involucra tres principales elementos:

➤ Variables de decisión:

Este representa los elementos del sistema a modelar. Caso contrario en los modelos lineales, dichas variables son asignadas como números reales representado por letras y subíndices x_1, x_2, \dots en similitud con las variables matemáticas, estos tienen una alusión perteneciente a cada variable: peso, longitud, etc. Además se utiliza la representación a modo de vector de un conjunto registrado de variable: (x_1, x_2, \dots)

➤ Restricciones:

Estas son funciones no lineales de las variables de decisión en donde se representan las limitaciones prácticas a las que se ve envuelta el problema a optimizar (cercanas a la realidad). Normalmente son expresadas mediante ecuaciones no lineales. Matemáticamente pueden adoptar las siguientes formas:

$$g_i(x) \geq b_i; \quad g_i(x) \leq b_i; \quad g_i(x) = b_i;$$

En donde:

$i = 1, 2, 3, \dots, m$ puede ser asignado m valor.

g_i = representado por una función lineal/no lineal.

➤ Función objetivo:

Es el criterio que se desea optimizar ya que se trata de la función el cual mide la calidad de la solución y que se debe optimizar (maximización o minimización de una función costo).

$$\text{Maximizar función } z = f(x); \quad \text{o} \quad \text{minimizar } z = f(x);$$

2.3. Métodos de optimización

El problema sustancial de esto, es la dificultad de obtener un conjunto de soluciones a partir de ecuaciones polinómicas no lineales. Las técnicas iterativas como lo son el método de Newton

Raphson puede en algunas ocasiones resolver el problema de optimización sin embargo necesitan una estimación inicial adecuada.

Actualmente existe una tendencia en aumento para aplicaciones en inversores multinivel y estas tendencias son los métodos de inteligencia artificial como lo son el algoritmo genético (GA) y la optimización del enjambre de partículas [2, 13]. Los métodos clásicos de optimización cuando aumenta el número de ángulos de conmutación pueden quedar retenidos en varios puntos óptimos locales. Debido a esto presentan un rendimiento mucho menor a los métodos de inteligencia artificial. No obstante, estos algoritmos deben estar sujetos a un buen ajuste adecuado de los operadores del algoritmo para lograr la mejor respuesta optimizada.

2.3.1. Newton Raphson

El método Newton-Raphson (NR) es un método de optimización iterativo que se basa en aproximar una función mediante la serie Taylor hasta el orden 2. NR es una poderosa herramienta para la solución de ecuaciones no lineales trascendentales [24]. La principal desventaja que este presenta frente a los métodos inspirados por la naturaleza (PSO, GA, etc.) es que la solución a un problema puede converger en un máximo local y no encontrar el máximo global.

Los siguientes pasos describen el algoritmo del método Newton Raphson.

- 1) Adquirir un conjunto de valores iniciales para θ

$$\theta^m = [\theta_1^m, \theta_2^m, \theta_3^m, \dots, \theta_N^m]^T \quad (3)$$

- 2) Resolver el valor de

$$F = (\theta^m) = F^m \quad (4)$$

- 3) Linealizar ecuación $F(\theta) = C$ sobre θ^m (5)

$$Q^m + \left[\frac{\delta f}{\delta m} \right]^m + d\theta^m = C \quad (6)$$

$$d\theta^m = [d\theta_1^m, d\theta_2^m, d\theta_3^m, \dots, d\theta_N^m]^T \quad (7)$$

Por lo tanto,

$$d\theta^m = \left(\text{inv} \left[\frac{\delta f}{\delta m} \right]^m (C - f^m) \right) \quad (8)$$

4) resolver (8) por $d\theta^m$

5) Actualizar el inicial:

$$\theta^{m+} = \theta^m + d\theta^m \quad (9)$$

6) Repita el proceso de las ecuaciones (5) a (9) hasta que $d\theta^m$ se vuelva más bajo que un umbral para alcanzar el grado de precisión deseado.

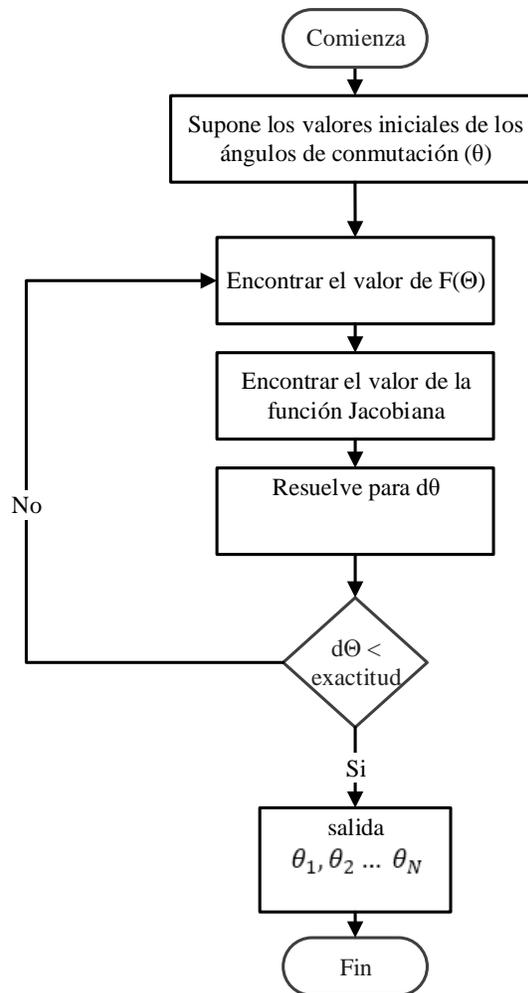


Figura 4. Diagrama de flujo general del algoritmo NR.

7) La condición: $0 < \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4 \dots \theta_N \leq \pi / 2$ debe cumplirse.

2.3.2. Algoritmo Genético

En las últimas décadas, ha habido un creciente interés por los algoritmos basados en el principio de la evolución. En los algoritmos evolutivos conocidos se incluyen algoritmos genéticos, basados en programación evolutiva y programación genética. Tal conjunto se llama "computación evolutiva"[13, 25].

Los algoritmos evolutivos utilizados para resolver problemas de optimización se basan en métodos de búsqueda para encontrar un conjunto de parámetros para minimizar o maximizar una función adaptativa llamada *fitness*. Estos algoritmos operan con una población de individuos, en estos cada uno de los individuos está representado por un punto de búsqueda en el espacio de soluciones a un problema dado. El desempeño de cada individuo es evaluado siguiendo una función de adaptación. tal función hace que se establezca una clasificación de los peores de los individuos con respecto a los mejores de la población en un grado continuo de adaptación.

El algoritmo genético es una técnica de búsqueda basada en la evolución que funciona de forma aleatoria y basada en la teoría de Darwin. Utiliza datos históricos y actuales para ser analizarlos en el futuro. Esto sigue las reglas de "Supervivencia del más apto". Esto hace uso de la mejor programación mediante la cual se asignan las tareas a los recursos de acuerdo a la función aptitud para cada parámetro del proceso de programación.

El concepto de algoritmo genético aplicado a la optimización consta de cuatro pasos principales: 1) Iniciación de la población, 2) evaluación de la función objetivo, 3) selección y 4) aplicación de operadores genéticos. En la Figura (5) se muestra un diagrama de flujo del algoritmo genético. El principio básico del algoritmo genético se describe a continuación [7]:

1. *Inicialización de la población*: se genera de forma aleatoria por la población inicial, formada por un conjunto de cromosomas que representan posibles soluciones al problema.

2. *Función de fitness*: la población inicial se evalúa sobre la función de fitness para comparar una con la otra. Para cada individuo (cromosoma) de la población, se realiza un cálculo de supervivencia que se representa mediante la ecuación (11).

$$p(x) = \frac{f(x)}{\sum f} \quad (10)$$

Donde $\sum f = f_1 + f_2 + \dots + f_n$ N tamaño de la población

Si la función objetivo de minimizado está dada por la ecuación (12),

$$f(x) = \text{Max}_f - f(x) \quad (11)$$



Figura 5. Diagrama de flujo general del algoritmo GA.

3. Selección: el proceso de selección es una tarea crucial que se realiza para seleccionar los cromosomas de la población inicial que se someterán a cruzamiento y permutación para encontrar la siguiente generación.

4. Cruzamiento: el funcionamiento del *crossover* es similar al de la reproducción en animales. Seleccionar dos padres de una población basada en la función de aptitud física y luego cambiar y mejorar las partes de los padres para crear un nuevo individuo que tenga las propiedades de ambos padres.

5. Mutación: para introducir diversidad en los genes de la población, se utiliza el proceso de mutación.

Reemplazo. A veces la nueva población se cruza con los individuos de la población anterior y sus descendientes.

Sin embargo, el método GA requiere una intuición inicial, sin la cual la solución no puede converger a un valor óptimo[26].

2.3.3. Optimización por enjambre de partículas

La optimización de enjambres de partículas (PSO) propuesta en 1995 por James Kennedy y Russell C. Eberhart, se describe como una técnica de optimización. Generalmente, el algoritmo PSO se utiliza en espacios de búsqueda con múltiples dimensiones[27]. El algoritmo de cálculo de PSO utiliza el comportamiento de los enjambres de insectos en la naturaleza[28-30].

La optimización del algoritmo de enjambre de partículas tiene similitud con el algoritmo genético[31]. La inicialización del algoritmo de PSO comienza con una población de soluciones generadas aleatoriamente. A cada solución potencial se le asigna aleatoriamente un vector de velocidad; las partículas vuelan a través del espacio de búsqueda.

Cada una de las partículas hace uso del seguimiento en cada una de sus coordenadas en el espacio de búsqueda asociándolo a la mejor solución lograda hasta ese momento. Este valor también se conoce como "*pbest*". De la misma manera, se rastrea un valor llamado "*best*" es rastreado. El algoritmo en su conjunto sigue el valor general y la localización obtenida hasta ese punto por cualquier partícula de la población, llamada "*gbest*".

En resumen, el concepto de optimización de enjambres de partículas es el de optimización por cada paso temporal, haciendo uso del cambio de velocidad (aceleración) de cada partícula hacia la variable *pbest* y *gbest*. La aceleración se asigna mediante un término aleatorio, que se generan para la aceleración hacia *pbest* y *gbest* mediante estos números aleatorios[32].

Las variables de la función objetivo son aleatorias. A través de las iteraciones se numeran la posición de las partículas *pbest* (mejor presente) y *gbest* (mejor global). El vector de velocidad *V* de la variable se calcula mediante las siguientes expresiones.

$$V_{(n+1)} = W.V_n + C_1.ran(P_{best} - X_n) + C_2.ran(G_{best} - X_n) \quad (12)$$

$$X_{(n+1)} = X_n + V_{(n+1)} \quad (13)$$

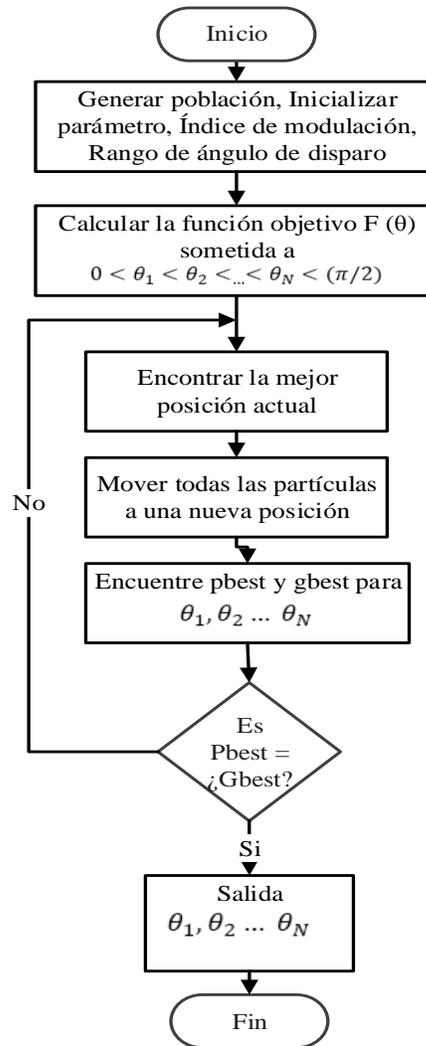


Figura 6. Diagrama de flujo general del algoritmo PSO.

Con la ecuación (13) es posible calcular la velocidad de la nueva partícula. Este nuevo valor depende de la velocidad anterior y de la distancia de la posición actual de su mejor posición (experiencia individual) y de la mejor experiencia del enjambre (grupo). En la ecuación (14), se menciona la nueva posición de la partícula. Cuando las constantes C_1 y C_2 se encuentran entre un rango de 1 a 2, el W valor (peso de la inercia depende del tipo de problema y de cada criterio). Sin embargo, la elección de un valor más alto W facilita el análisis global. Por otro lado, seleccionar un

valor inferior es ajustar el área de búsqueda actual. La elección de un valor de peso inercial apropiado puede lograr una mayor habilidad con el proceso de exploración y explotación en el espacio de búsqueda, así como encontrar el valor óptimo global de una manera fácil.

2.4. Resultado de la revisión del estado del arte

Para la optimización de los inversores multinivel ha ido aumentando la tendencia del uso de algoritmos inspirados en la naturaleza.

En [7], se usa la técnica PSO para la optimización de THD en el inversor multinivel, aplicado tanto a casos con fuentes simétricas como a fuentes asimétricas. Es aplicado a inversor multinivel de 13 niveles, los resultados de simulación se obtuvieron en MATLAB/SIMULINK.

En [18], se eligen de dos técnicas de optimización Búsqueda de optimización biogeográfica híbrida (BBO, por sus siglas en inglés) y Búsqueda directa adaptativa con malla (MADS, por sus siglas en inglés) esto con el fin de encontrar los valores óptimos de los ángulos de conmutación mediante la solución de las ecuaciones trascendentales no lineales en las que el BBO emplea la búsqueda global y la MADS la búsqueda local. BBO muestra una mejor capacidad de optimización global que PSO, además de conseguir una tasa de convergencia más rápida.

En [33], se resuelven las ecuaciones no lineales mediante el método de optimización de enjambre de partículas para la obtención de los valores óptimos de los ángulos de conmutación y reducir los armónicos de más bajo orden. Fue aplicado a un inversor multinivel de 7 niveles en cascada trifásico.

En [34], se minimizan los armónicos aplicando la técnica de optimización de algoritmos genéticos considerando la normas IEEE-519. Los resultados presentados son aplicados a un inversor haciendo un barrido en el índice de modulación. Se usa la técnica SHE.

En [28], trata de mitigar los armónicos de salida del inversor multinivel en cascada puente H mediante la selección de los ángulos de conmutación obtenidos bajo el método de optimización del enjambre de partículas de peso de inercia creciente linealmente.

En [35], aplica el método de optimización por algoritmos genéticos, ubicado en la minimización de THD a la tensión de línea a línea. Se aplica a un inversor multinivel en cascada de siete niveles. Las señales de control fueron obtenidas mediante un microcontrolador ATMEGA32 AVR. La

aplicación del algoritmo directamente sobre la tensión de línea conduce a una tensión de salida mejorada con menos THD.

En [36], el algoritmo genético es aplicado como técnica de optimización con el fin de obtener los ángulos de conmutación para un convertidor multinivel en cascada trifásica. El fin es reducir al mínimo la THD en la tensión de salida del inversor. La generación de las señales de control es obtenida mediante el OSP STM32F04.

En [37], la función objetivo a optimizar es la minimización de la THD. Este es implementado en un inversor multinivel en cascada de 27 niveles. Se lleva a cabo una comparación entre dos técnicas de optimización, el primer algoritmo genético en comparación con la optimización por recocido simulado, este es llevado a aplicaciones fotovoltaicas.

En [38], se presenta la obtención de los ángulos de conmutación mediante sucesiones numéricas el objetivo es aplicar la minimización de la THD enfocado en armónicos de corriente. Esto es llevado gracias a la implementación de un inversor trifásico en cascada de siete niveles.

En [39], establece una construcción de una tabla de estado mediante los vectores de salida del inversor multinivel, igualmente se hace una construcción de tabla de estados de falla, esto con el fin de tener una reducción de armónicos de voltaje. Se logra una reducción de THD hasta en un 12% durante las condiciones de falla con el método de optimización propuesto.

En [40], propone una combinación simultánea de dos técnicas de optimización, una la OMTHD y la segunda SHE, con el fin de eliminar armónicos de cierto orden y la parte restante para la minimización de la THD. Se emplea la función MATLAB/fmincon, este con el fin de obtener la solución de los ángulos de conmutación en el inversor multinivel. La restricción varía dependiendo del índice de modulación.

En [41], mediante el algoritmo de PSO se hace una búsqueda de los mejores ángulos de conmutación, igualmente los niveles de CC en la entrada de las celdas H pueden ser iguales o desiguales. La función objetivo es la reducción de la THD variando la tensión de entrada de las celdas H, se ha optimizado el número de interruptores, esto con el fin de reducir el tamaño del inversor multinivel.

En [42], se propuso desarrollar dos funciones objetivas distintas para un inversor multinivel en cascada. El primer objetivo es obtener una señal de salida de alta calidad eliminando los armónicos 5° y 7°. El segundo objetivo es la calidad del voltaje. Se hace uso de optimización por enjambre de partículas.

En[42], se propone desarrollar dos funciones objetivas distintas para un inversor multinivel en cascada. El primer objetivo es obtener una onda de salida de alta calidad eliminando los armónicos 5° y 7°. El segundo objetivo es la calidad del voltaje. Se usa la optimización por enjambre de partículas.

Los ángulos de conmutación óptimos se encuentran mediante la solución de las ecuaciones SHE trigonométricas trascendentales no lineales mediante el uso de algoritmo genético. En este artículo se estudia un inversor multinivel en cascada simétrico, donde por un intervalo las fuentes de CC se desbalancean y se requiere tener el valor porcentual menor en THD.

En [43], presenta un algoritmo PSO, el cual elimina armónicos de manera programada y rápidamente. Emplea un conjunto de ecuaciones matemáticas para describir la forma de onda de salida del inversor multinivel con desbalances en las fuentes de alimentación. Una vez que se tiene dicho conjunto de ecuaciones, se usa el algoritmo PSO para calcular el conjunto de soluciones óptimas de los ángulos de conmutación, si es que existe, para cada perfil armónico necesario.

2.5. Conclusiones

La mayoría de las publicaciones revisadas en el estado del arte presentan un interés en común (Diminución de THD). Los parámetros de interés son: dimensiones, volumen, eficiencia, etc. En la Tabla I se muestra la agrupación en cuanto a optimización en los inversores de potencia encontrados en la literatura[44].

Tabla I. Variables de optimización

Convertidor de potencia	<ul style="list-style-type: none">➤ Amplitud para cada nivel de voltaje, en inversores multinivel➤ Ángulos de conmutación➤ Resistencia térmica del disipador➤ Balanceo en bus de CC (aplicaciones fotovoltaicas)➤ Disminución de THD
-------------------------	--

Actualmente existen optimizaciones multiobjetivo. A fin de simplificar su solución muchos de estos problemas tienden a modelarse como mono-objetivo usando solo una de las funciones originales y manejando las adicionales como restricciones (en su mayoría las publicaciones revisadas en la literatura se enfocan a optimizaciones mono-objetivo). En suma, la mejor optimización es aquella llevada a una optimización multiobjetivo (más cercana a la realidad) debido a que se busca el frente de Pareto, o conjunto de puntos del espacio de búsqueda

En la revisión del estado del arte los algoritmos inspirados en la naturaleza muestran una mayor ventaja en cuanto a la solución del problema, los ejemplos abordados en esta sección se ubican en aplicaciones de optimización fuera de línea, es decir, sin estar operando el inversor multinivel (la minimización de la THD no se hace en vivo). La literatura reporta un alto índice de reducción en cuanto a THD, siendo estas sus variantes más comunes las técnicas OMTD y SHE, dando como resultado una maximización de la eficiencia del inversor. Para el caso de optimizaciones en línea (corrección del THD cuando el inversor está en funcionamiento) es muy escasa, en este método el gasto computacional es mayor, ya que las soluciones posibles brindadas por el algoritmo de optimización deben estar haciendo múltiples cálculos en tiempo real. En la mayoría de las publicaciones encontradas, el algoritmo de PSO mantiene una ventaja frente a otros algoritmos de optimización.

Los algoritmos iterativos como el NR entre otros y los algoritmos basados en inteligencia artificial son los que más comúnmente se emplean para determinar el valor de las raíces de un conjunto de ecuaciones a lo largo de la literatura. En suma, la técnica de NR se ha aplicado ampliamente para este tipo de necesidades.

Capítulo 3

Optimización

A medida que crece el número de niveles en inversor multinivel, un problema importante es el incremento en cuanto a la dificultad de encontrar la mejor solución de las ecuaciones no lineales trascendentales para obtener los ángulos de conmutación óptimos y reducir el valor de THD. Por otra parte, se requieren muy buenos valores iniciales (acotación del espacio de búsqueda) para llegar a converger en una mejor solución. Los Algoritmos inspirados en la naturaleza pueden conseguir converger a la óptima solución a la problemática mediante un enfoque diferente.

3. Análisis de minimización

En esta categoría se encuentra la llamada forma de onda armónica escalonada optimizada (OHSW) en la que se puede dividir en: Eliminación selectiva de armónicos (SHE) y minimización óptima de la distorsión armónica total (OMTHD)[33]. La siguiente es una breve descripción de:

- OMTHD
- SHE
- Analítico

3.1. Método OMTHD

La idea principal de este método, es ajustar la conmutación para minimizar la THD en la tensión de salida. En este caso se parte de la premisa de las fuentes de CC son todas iguales.

El método OMTD se utiliza para minimizar el valor de THD en la forma de onda de tensión de salida, lo que permite el cumplimiento de la norma IEEE-519[45]. Sin embargo, este método no elimina los armónicos de bajo orden.

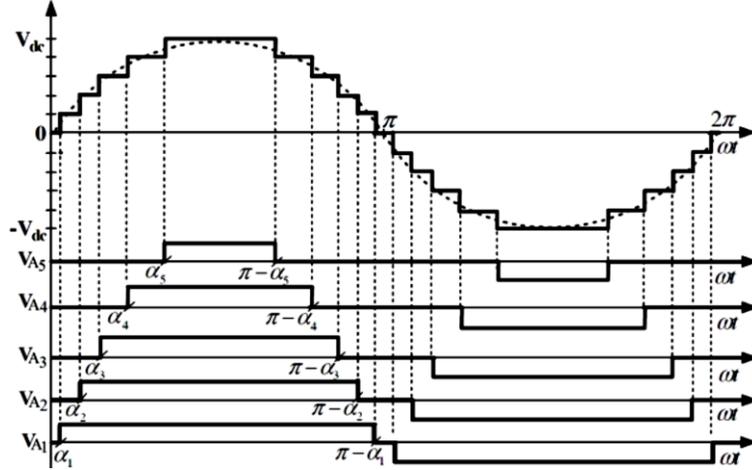


Figura 7. Forma de onda de salida en un convertidor multinivel simétrico[46].

El voltaje de salida de la forma de onda escalonada, como la de la Figura 7 se puede expresar como:

$$v_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{cd}}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k) \right] \text{sen}(n\omega t) \quad (14)$$

Donde:

n es el orden del armónico impar (1,3,5,7, 9, ... n)

s es el número de etapas del convertidor.

k entero positivo (1, 2, 3, 4, 5, ..., s)

θ_k es el k -ésimo ángulo de disparo, que debe satisfacer:

$$\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_s < \pi/2 \quad (15)$$

partiendo de esto, la amplitud de las componentes armónicas impares viéndose en vuelta en ella la componente fundamental puede quedar expresada como:

$$a_n = \frac{4V_{cd}}{n\pi} \sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k) \quad (16)$$

Haciendo una expansión de la ecuación anterior se obtiene:

$$a_n = \frac{4V_{cd}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s)] \quad (17)$$

Los valores de los ángulos de conmutación $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_s\}$ deben seleccionarse de manera adecuada dando como resultado una THD sea un valor bajo.

La minimización del valor de THD puede establecerse como una función objetiva. La ecuación (18) expresa el porcentaje del valor de THD de cualquier forma de onda escalonada, con simetría de cuarto de onda:

$$THD(\%) = \left[\left(\frac{1}{a_1^2} \right) \sum_{n=3}^{\infty} (a_n^2) \right]^{1/2} \cdot 100\% \quad (18)$$

Donde:

a_1 Es la amplitud del componte fundamental.

a_n Es la amplitud de n -ésimo armónico, con n impar.

Debido a que el valor de la componente fundamental deseada no puede ser garantizada, se hace una restricción de igualdad, como se muestra en la ecuación (19) porque tiene una simetría de cuarto de onda.

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_s < \pi/2 \quad (19)$$

3.2. Método SHE

En el método de SHE debido a la simetría de un cuarto de onda se inicia el análisis de la serie de Fourier de la forma de onda de salida del inversor multinivel, se describe de la siguiente manera[33]:

$$v_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{cd}}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k) \right] \text{sen}(n\omega t) \quad (20)$$

Los objetivos principales del método SHE es reducir la magnitud del contenido de los armónicos de orden inferior, que pueden ser: tercero, quinto, séptimo, noveno, etc. Mantener el valor del componente fundamental en el valor deseado, y lograr la reducción de armónicos impares de bajo orden. Para lograr esto, unos conjuntos de ecuaciones no lineales trascendentales deben resolverse simultáneamente. El conjunto de ecuaciones es el siguiente:

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_k) = km \quad (21)$$

$$\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \dots + \cos(5\theta_k) = 0 \quad (22)$$

.

.

.

$$\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_k) = 0 \quad (23)$$

Donde k es referido como el índice de modulación. SHE le permite seleccionar un armónico específico para eliminar, lo que disminuirá el valor de THD. Las ecuaciones (22-24) deben igualarse a cero para eliminar el componente de ese armónico, obteniendo los ángulos de conmutación adecuados para los dispositivos semiconductores. Sin embargo, el enfoque de SHE es la eliminación de ciertos armónicos de bajo orden previamente seleccionados, en lugar de minimizar todo el espectro armónico[47].

En comparación con el método SHE, el OMTD manipula el valor de los armónicos sin necesidad de mantener o eliminar ningún armónico específico (incluyendo la componente fundamental) [48].

Como resultado de la aplicación del método SHE para controlar el contenido armónico en el inversor multinivel, se obtiene una baja frecuencia de conmutación en los interruptores de potencia, lo que da como resultado menos pérdidas por efecto de conmutación, así como una baja interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés), de igual manera resulta en menor tamaño el diseño

del filtro, ya que desplaza las componentes armónicas de baja frecuencia. En la literatura se reporta el método SHE para uso en transmisión de corriente directa de alta tensión (HVCC, por sus siglas en inglés). Normalmente el método SHE es utilizado para implementaciones fuera de línea.

3.3. Método Analítico

El objetivo de este método analítico es con el fin de hacer una comparativa entre las diferentes técnicas de optimización que actualmente están reportadas en la literatura. Este análisis se puede llevar a cabo debido a que el problema a resolver es calcular el ángulo para un inversor de 3 niveles (véase en la Figura 8), debido a que solamente se busca la solución a un sistema no lineal no multivariable en específico se puede llevar a cabo de una manera analítica.

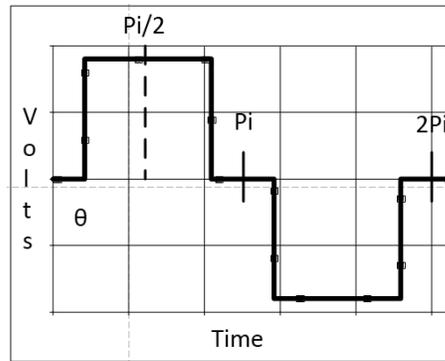


Figura 8. 3 niveles 1 ángulo por 1/4 ciclo (Fourier)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nwt) + b_n \text{sen}(nwt)] \quad (24)$$

Donde:

$$\left. \begin{array}{l} a_0 = 0 \\ a_n = 0 \end{array} \right\} \text{función - par} \quad (25)$$

$$\begin{array}{l} b_n \neq 0 \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(nwt) dt \end{array} \quad (26)$$

Por tener simetría de 1/4 de ciclo.

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega t) dt \quad (27)$$

$$T = 2\pi$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{2\pi} = 1$$

$$b_n = \frac{(4)2}{2\pi} \left[\int_0^{\theta} (0) \text{sen}(nt) dt + \int_{\theta}^{\pi/2} v \text{sen}(nt) dt \right] \quad (28)$$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \left[-\frac{v}{n} \cos(nt) \right]_{\theta}^{\pi/2}$$

$$b_n = \frac{4v}{n\pi} \left[\cos(n\theta) - \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \quad (29)$$

$b_n = 0$ para pares

$$b_n = \frac{4v}{n\pi} \left[\cos(n\theta) - \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right]$$

$$\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \Rightarrow n = 1 \Rightarrow \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (30)$$

$$n = 3 \Rightarrow \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) = 0$$

Por lo tanto

$$b_n = \frac{4v}{n\pi} [\cos(n\theta)] \quad (31)$$

Para calcular la THD se usa la ecuación (32)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum \text{armónicos}^2}}{\sqrt{\text{fundamental}^2}} \quad (32)$$

Para el fundamental

$$n = 1$$

$$b_1 = \frac{4v}{\pi} [\cos(\theta)] \quad (33)$$

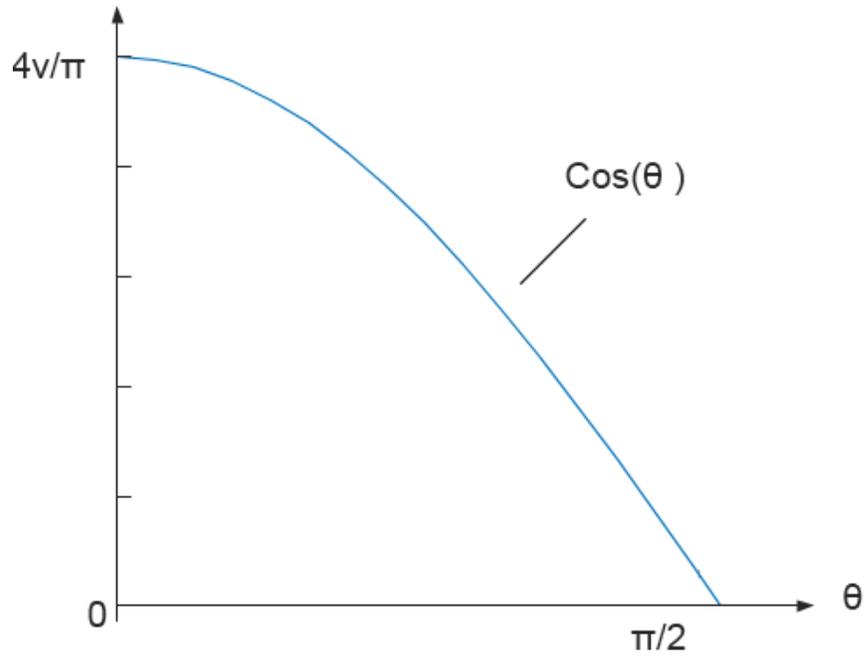


Figura 9. Curva de la función de la componente fundamental.

Y su comportamiento se muestra en la Figura 9

Para los armónicos

$$\left. \begin{aligned} b_3 &= \frac{4v}{3\pi} [\cos(3\theta)] \\ b_5 &= \frac{4v}{5\pi} [\cos(5\theta)] \\ b_7 &= \frac{4v}{7\pi} [\cos(7\theta)] \\ b_9 &= \frac{4v}{9\pi} [\cos(9\theta)] \\ b_{11} &= \frac{4v}{11\pi} [\cos(11\theta)] \end{aligned} \right\} \left(\frac{4v}{\pi} \right) \cdot \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{3} \right)^2 \\ \left(\frac{1}{5} \right)^2 \\ \left(\frac{1}{7} \right)^2 \\ \left(\frac{1}{9} \right)^2 \\ \left(\frac{1}{11} \right)^2 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$THD = \frac{\sqrt{b_3^2 + b_5^2 + b_7^2 + b_9^2 + b_{11}^2 + \dots}}{b_1} \quad (35)$$

$$THD = \frac{\frac{4v}{\pi} \sqrt{\left[\frac{1}{3} \cos(3\theta)\right]^2 + \left[\frac{1}{5} \cos(5\theta)\right]^2 + \left[\frac{1}{7} \cos(7\theta)\right]^2 + \dots}}{\frac{4v}{\pi} \cos(\theta)} \quad (36)$$

Para obtener el valor mínimo de una función aplicamos el criterio de la primera derivada.

$$y = x^2 \quad \frac{dy}{dx} = 2x \quad \text{evaluamos } x = -1$$

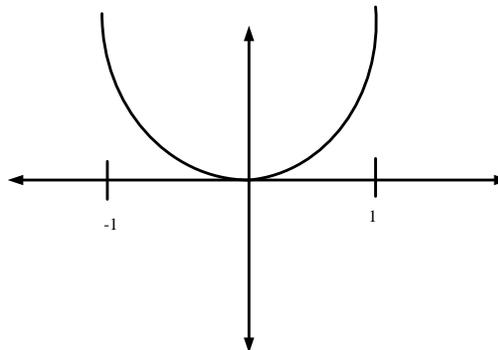
$$y' = 2(-1) = -1 \quad \text{pendiente negativa}$$

$$3\theta = 1$$

$$\theta = \frac{1}{3}$$

$$\theta = 30^\circ$$

para reducir la THD es necesario eliminar el 3º armónico



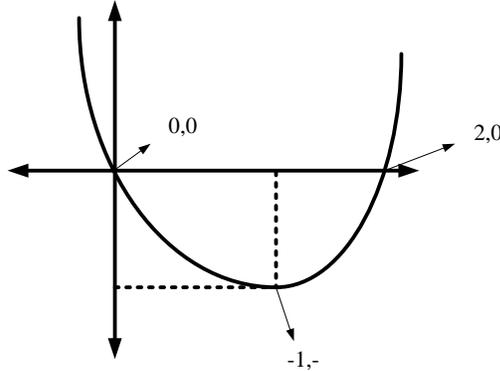
$$\text{Evaluamos en } x = 1 \quad y' = 2(1) = 2 \quad \text{pendiente positiva.}$$

Para obtener el valor mínimo.

$$0 = x^2 \quad x = 0$$

Ahora $y = x^2 - 1$ $y' = 2x$

Como es evidente para el observador casual



$$\begin{array}{rcl}
 y = Ax^2 + Bx + C & & 4A + 2B = 0 \\
 0 = 0 + 0 + C & & A + B = -1 \\
 0 = A(4) + B(2) + 0 & & A = -B - 1 \\
 & & 4(-B - 1) + 2B = 0
 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl}
 x|y & A = -\frac{3}{2} & \\
 0|0 & -4B - 4 + 2B = 0 & B = -\frac{1}{2} \\
 1|-1 & -2B = 4 & \\
 2|0 & &
 \end{array}$$

$$THD = \frac{\sqrt{\frac{1}{9} \cos^2(3\theta) + \frac{1}{25} \cos^2(5\theta) + \frac{1}{49} \cos^2(7\theta) + \frac{1}{81} \cos^2(9\theta) + \frac{1}{121} \cos^2(9\theta)}}{\cos(\theta)} \quad (37)$$

Para todo propósito práctico, las ecuaciones 35, 36 y 37 son iguales.

Para minimizar la THD aplicamos criterio de la 1ra derivada. Derivando e igualando a cero.

$$\frac{d(THD)}{d\theta} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{d}{dx} \frac{u}{v} = \frac{v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx}}{v^2}$$

$$\frac{num}{den} = 0 \Rightarrow num = 0$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{d}{dx} \cos(\theta) = -\text{sen}(\theta)$$

$$\frac{d}{dx} \sqrt{u} \Rightarrow \frac{1}{2} u^{-1/2} \frac{du}{dx} \Rightarrow \frac{\frac{du}{dx}}{2\sqrt{u}}$$

$$\frac{d}{dx} \frac{u}{v} = \frac{v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx}}{v^2} = 0 \therefore v^2 = 0$$

$$v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx} \quad u = \sqrt{a}$$

$$\frac{da}{dx} = a' \quad \& \quad \frac{dv}{dx} = v'$$

$$\frac{da}{dx} \sqrt{a} = \frac{1}{2\sqrt{a}} \frac{da}{dx} \therefore v \frac{da}{2\sqrt{a}} - \sqrt{a} \frac{dv}{dx}$$

$$v \frac{b}{2\sqrt{a}} - \sqrt{a} v' = 0 \quad \frac{va' - 2av'}{2\sqrt{a}}$$

Por lo tanto $va' - 2av' = 0$

$$v = \cos(\theta) \quad v' = -\text{sen}(\theta)$$

$$\cos^2(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2x)$$

$$a = \frac{1}{9} \cos^2(3\theta) + \frac{1}{25} \cos^2(5\theta) + \frac{1}{49} \cos^2(7\theta) + \frac{1}{81} \cos^2(9\theta) + \frac{1}{121} \cos^2(11\theta) \quad (39)$$

$$a' = -\frac{1}{9}\text{sen}(6\theta) - \frac{1}{25}\text{sen}(10\theta) - \frac{1}{49}\text{sen}(14\theta) - \frac{1}{81}\text{sen}(18\theta) - \frac{1}{121}\text{sen}(30\theta) \quad (40)$$

$$\left. \begin{aligned} va' &= \cos(\theta) \left[-\frac{1}{9}\text{sen}(6\theta) - \frac{1}{25}\text{sen}(10\theta) - \frac{1}{49}\text{sen}(14\theta) - \frac{1}{81}\text{sen}(18\theta) - \frac{1}{121}\text{sen}^2(21\theta) \right] \\ -2va' &= 2\text{sen}(\theta) \left[\frac{1}{9}\cos(3\theta) + \frac{1}{25}\cos(5\theta) + \frac{1}{49}\cos(7\theta) + \frac{1}{81}\cos(9\theta) + \frac{1}{121}\cos(11\theta) \right] \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior en Matlab se obtienen los siguientes resultados

$$x = 0.447244 \quad \frac{2\pi}{360}$$

$$\frac{\pi}{180} = \frac{0.447}{x} \quad x = 25.625$$

$$\cos(3\theta) = 0 \quad 3\theta = \text{arc.cos}(\theta) \quad \theta = \frac{\text{arc.cos}(\theta)}{3} = \frac{90}{3} = 30^\circ$$

$x = 25.625^\circ$ THD = 28.35% simulación OMTHD método.

Capítulo 4

Diseño e implementación

En este capítulo se describe a detalle la implementación del código en lenguaje VHDL el cual será de suma importancia para la generación de las señales de control que regirán al inversor multinivel, así como exponer la manipulación del software para el desarrollo de dicho código de programación llevada a cabo en la plataforma Quartus II.

4. Introducción

El criterio para el diseño del inversor multinivel es minimizar el contenido armónico de la salida del inversor, ya que esto reducirá el tamaño del filtro y resultará en un inversor de bajo costo y alto rendimiento.

En la presente sección se estudió el esquema del inversor multinivel en cascada bajo las técnicas de optimización OMTD y SHE. El código de optimización fue elaborado en la plataforma de MATLAB esto con el fin de realizar los cálculos de los ángulos de conmutación optimizados. Para validar los datos obtenidos en la simulación se construyó un prototipo experimental de un inversor multinivel de 3, 5, 7 y 9 niveles en topología cascada.

4.1. Desarrollo del algoritmo NR

El grupo de las optimizaciones clásicas en el cual se ve envuelto el método NR normalmente hace uso de una búsqueda secuencial de modo que, una vez emprendido el proceso, se recorre una trayectoria de una solución a otra que se encuentre próxima hasta que este concluya. Caso contrario en las optimizaciones metaheurísticas donde los procedimientos de optimización actúan de manera directa sobre las poblaciones de soluciones, evolucionando hacia generaciones de mayor calidad.

La rutina `fsolve` de MATLAB se utiliza para resolver conjuntos de ecuaciones algebraicas no lineales utilizando un método cuasi-Newton. El usuario debe proporcionar una rutina para evaluar el vector de función.

Considera el siguiente sistema de ecuaciones no lineales, y resuelve para x_1 y x_2 :

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = \cos(3x(1)\pi/180) + \cos(3x(2)\pi/180) + \cos(3x(3)\pi/180); \quad (42)$$

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = \cos(5x(1)\pi/180) + \cos(5x(2)\pi/180) + \cos(5x(3)\pi/180); \quad (43)$$

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = \cos(7x(1)\pi/180) + \cos(7x(2)\pi/180) + \cos(7x(3)\pi/180); \quad (44)$$

El archivo `.m` usado para resolver el problema anterior usando `fsolve` es:

```
function [c, ceq]= SHE_7(x)
c=[cos(3*x(1)*pi/180)+cos(3*x(2)*pi/180)+cos(3*x(3)*pi/180);
  cos(5*x(1)*pi/180)+cos(5*x(2)*pi/180)+cos(5*x(3)*pi/180);
  cos(7*x(1)*pi/180)+cos(7*x(2)*pi/180)+cos(7*x(3)*pi/180);
  ];
ceq = [];
end
```

Figura 10. Vista de ecuaciones no lineales agrupadas como bloque de función.

que se coloca en un archivo `m` llamado `SHE_7.m` (para el caso del ejemplo de 7 niveles)

Ingrese la conjetura inicial (este es muy importante, porque a partir de ese supuesto, tomará el tiempo en llegar a una solución o si el algoritmo podrá converger en una buena solución).

$$x_0 = [10 | 20 | 50] \quad (45)$$

Nota: x_0 es el TRANSPOSE (transpuesta) de un vector de fila

Ahora, resuelve con

$x = fsolve('SHE_7'; x0)$

que nos da los resultados $x = [\theta_1 \ \theta_2]$.

4.2. Desarrollo del algoritmo GA

El algoritmo genético es comúnmente utilizado para la solución de problemas que conllevan a una optimización, tanto condicionados como no condicionados, inspirados en la selección natural.

Este algoritmo modifica en repetidas ocasiones una población de posibles soluciones individuales. En cada progreso, el algoritmo hará una selección de quienes serán los próximos individuos de la población presente, para que en su momento sean padres, con esto es suficiente para producir los hijos para la siguiente generación. A consecuencia de esto la población “evoluciona” hacia una solución óptima.

Existen dos caminos para la obtención de los resultados del algoritmo genético, una de ellas es usando el toolbox de Matlab, por otra parte, es hacer un script en MATLAB, la función objetivo como se mencionó en el capítulo anterior de manera más puntual en la ecuación número (19), de esta manera la expansión de Fourier para ejemplo de un inversor multinivel 9 niveles, quedará expresado de la siguiente manera:

```
function THD= THD_9(x)
Acomulador=0;
for n=3:2:49
serie= ((cos(x(1)*n*pi/180)+cos(x(2)*n*pi/180)+cos(x(3)*n*pi/180)+cos(x(4)*n*pi/180))/n)^2;
Acomulador= Acomulador+serie;
end
THD = 100*sqrt((Acomulador)/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)+cos(x(3)*pi/180)+cos(x(4)*pi/180))^2);
end
```

Figura 11. Función objetivo para MLI 9 niveles (minimización THD).

El código que hace la optimización del algoritmo de GA se muestra en la Figura 12, para lograr tal objetivo, dentro del algoritmo (script) se debe hacer un llamado a la función a la cual se desea optimizar, asignando ciertos parámetros de manera manual tales son: *número de variables, generaciones, tipo de población tamaño de población, función de creación, función de selección, etc.*

```
 SelMethod = 1;
 CrossMethod = 1;
 PopSize = 100;
 MaxIteration = 1000;
 CrossPercent = 70;
 MutatPercent = 20;
 ElitPercent = 100 - CrossPercent - MutatPercent;
 CrossNum = round(CrossPercent/100*PopSize);
 if mod(CrossNum,2)~=0;
     CrossNum = CrossNum - 1;
 end
 MutatNum = round(MutatPercent/100*PopSize);
 ElitNum = PopSize - CrossNum - MutatNum;
 %%estado del problema
 VarMin = 0;
 VarMax =90;
 DimNum = 4;
 CostFuncName =@THD 9;
```

Figura 12. Algoritmo GA expresado en script en MATLAB

Para hacer el llamado del algoritmo GA en la línea de comando, es necesario llamar a la función ga con la siguiente sintaxis:

$$[xfval = ga(@ fitnessfun, n \text{ var } s, options)]$$

Donde:

@ *fitnessfun* en este apartado se coloca la función a optimizar.

nvars es el número de variables (incógnitas) que contiene el sistema.

options este contiene opciones de estructura del algoritmo GA, si no va este argumento, GA utilizará sus opciones por defecto.

Los resultados se encuentran dados por

x – punto en el cual se alcanza al valor final o deseado

fval – valor final de la función objetivo

El uso de la función GA es cómodo si se desea el acometido de los puntos siguientes:

- Retornar resultados sin más al espacio de *workspace* de MATLAB
- Poner en marcha el algoritmo GA numerosas veces con distintas opciones, llamando a GA desde un archivo m.

MATLAB en su toolbox de optimización contiene de manera gráfica la habilitación para el uso de múltiples algoritmos de optimización entre ellos el algoritmo GA. Para entrar en ellos se debe seleccionar

la pestaña *APPS* y a continuación se muestran varios íconos, posteriormente seleccionar la opción con el nombre *Optimization*. La herramienta abierta es mostrada en la Figura 13.

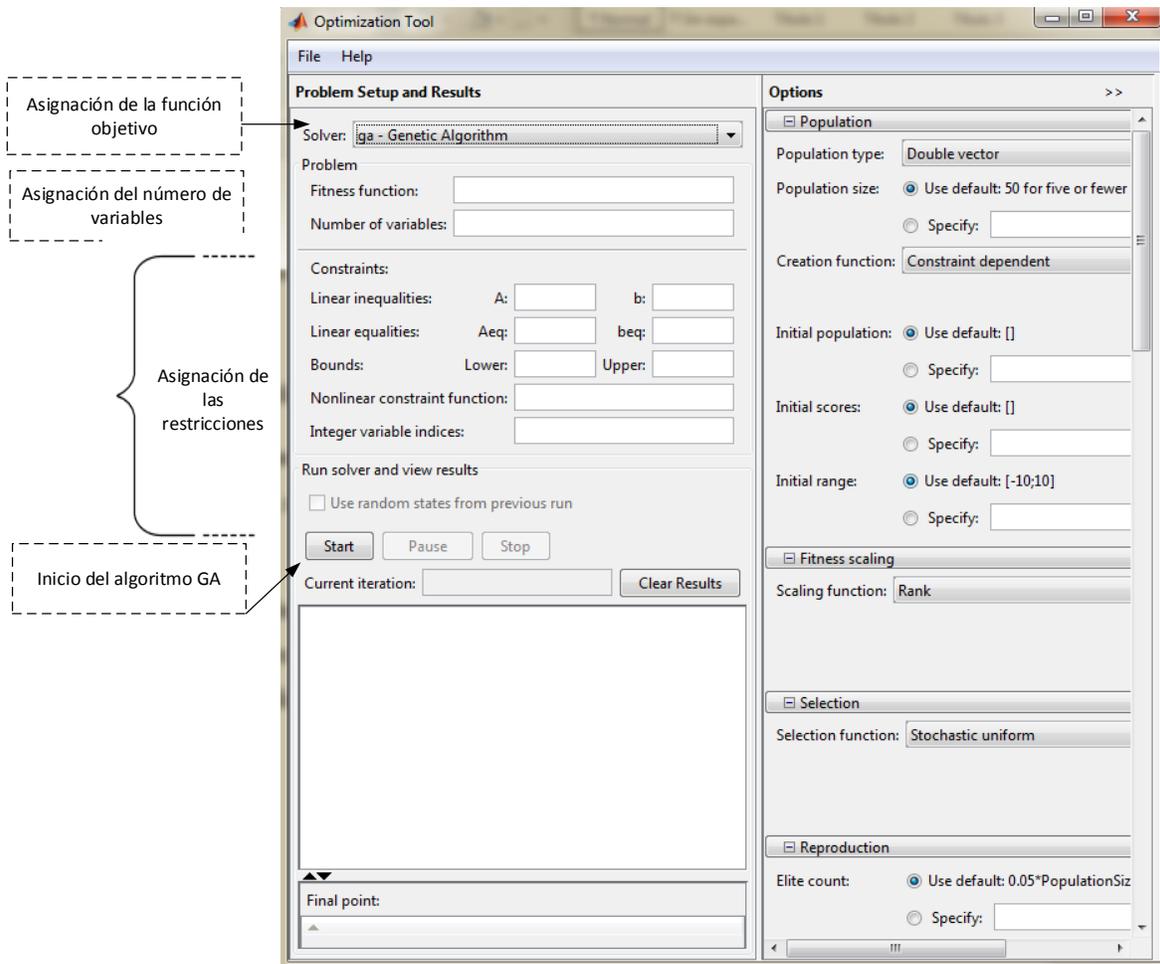


Figura 13. Toolbox GA.

Uno de los elementos básicos que deben ser agregados en la interfaz gráfica son los que a continuación se mencionan:

- **Fitness function:** Este es la función objetivo a la cual se desea minimizar. Se deberá asignar de la siguiente forma @fitnessfun, de donde fitnessfun.m deberá ser un archivo M que calcula la función aptitud.
- **Number of variables:** en este apartado se ingresa el tamaño del vector perteneciente a la función objetivo.

- Constraints: en esta sección se ingresa alguna función de tipo restricción, si es que se tiene alguna.

En la sección Options se puede modificar las opciones para el algoritmo genético.

4.3. Desarrollo del algoritmo PSO

Para implementar el algoritmo de PSO en la plataforma de MATLAB se procedió haciendo uso de dos formas distintas, una de ellas escribiendo el código y guardándolo en un archivo extensión m por otra parte haciendo un llamado del algoritmo mediante la ventana de comandos.

Así mismo para este caso de ejemplo, hacemos uso de la ecuación número (19), de esta manera la expansión de Fourier para ejemplo de un inversor multinivel 9 niveles, quedará expresado de la siguiente manera:

```
function THD= THD_9(x)
Acomulador=0;
for n=3:2:49
serie= ((cos(x(1)*n*pi/180)+cos(x(2)*n*pi/180)+cos(x(3)*n*pi/180)+cos(x(4)*n*pi/180))/n)^2;
Acomulador= Acomulador+serie;
end
THD = 100*sqrt((Acomulador)/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)+cos(x(3)*pi/180)+cos(x(4)*pi/180))^2);
end
```

Figura 14. Función objetivo para MLI 9 niveles (minimización THD).

El código que hace la optimización del algoritmo de PSO se muestra en la Figura 15, para lograr tal objetivo, de igual manera dentro del algoritmo (script) se debe hacer un llamado a la función a la cual se desea optimizar, asignando ciertos parámetros de manera manual tales son: *número de variables, número de iteraciones, tamaño de población, constante cognitiva, etc.*

```

clc;
clear;
close all;

%% Definición del problema

CostFunction=@(x) THD_5(x);      % función objetivo

nVar=2;          % numero de variables de decision

VarSize=[1 nVar];

VarMin=0;
VarMax=90;
plotObjFcn = 1;

%% PSO Parametros

MaxIt=200;      % maximo numero de iteraciones

nPop=200;      % tamaño de la población

% PSO Parametros
w=1;           % peso de inercia
wdamp=0.99;    % tasa de salto
c1=1.5;        % coeficiente de aprendizaje personal
c2=2.0;        % coeficiente de aprendizaje global

VelMax=0.1*(VarMax-VarMin);
VelMin=-VelMax;

%% Initialization

```

Figura 15. Algoritmo GA expresado en script en MATLAB

Para hacer el llamado del algoritmo PSO en la línea de comando, es necesario llamar a la función PSO con la siguiente sintaxis:

$$[x = \text{particleswarm}(@ \text{fitnessfun}, n \text{ var } s, \text{options})]$$

Donde:

@ fitnessfun en este apartado se coloca la función a optimizar.

nvars es el número de variables (incógnitas) que contiene el sistema.

options este contiene opciones de estructura del algoritmo PSO, si no va este argumento, PSO utilizará sus opciones por defecto.

Los resultados se encuentran dados por

x valor final de la función objetivo

4.4. Lenguaje VHDL y FPGA

Una FPGA, o matriz de puerta programable en campo, es una matriz de celdas lógicas colocadas en una superestructura de interconexiones[49, 50], que pueden programarse en tres niveles diferentes: (1) la ocupación de las celdas lógicas, (2) la interconexión entre celdas y (3) las entradas y salidas. Los tres niveles se configuran mediante una cadena de bits que se carga desde una fuente externa. Las FPGAs son dispositivos muy versátiles que ofrecen al usuario una amplia gama de opciones de diseño.

4.5. Elaboración de la implementación en programación VHDL

Como primer paso fundamental es la generación de un PWM de frecuencia y ciclo de trabajo variante mediante la programación VHDL, para ello utilizaremos el entorno de programación QUARTUS II 13.0 como se puede apreciar en la Figura 16.

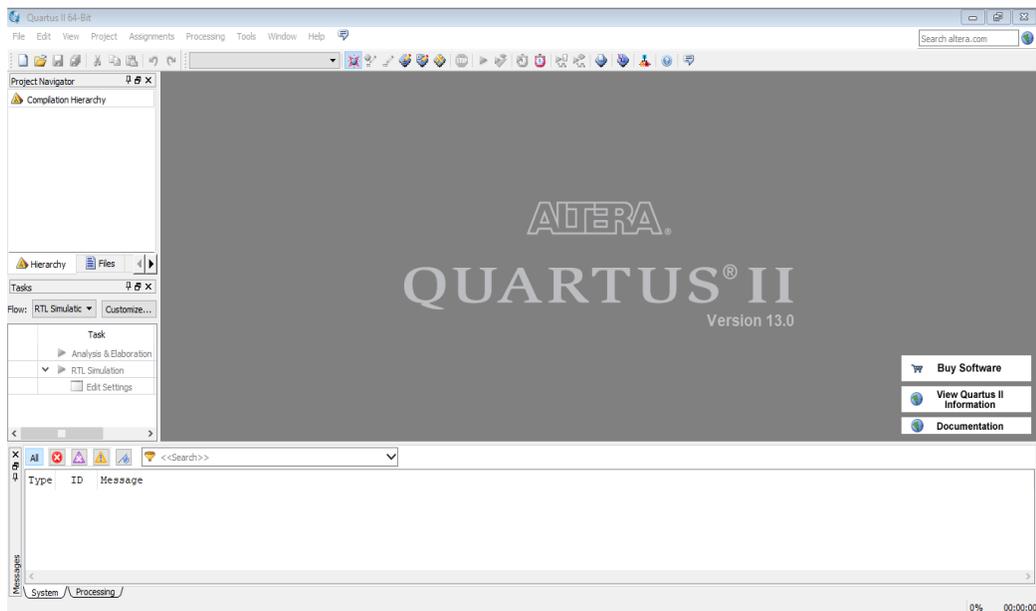


Figura 16. Ventana principal de inicio del programa QUARTUS II versión 13.

4.5.1. Generación del proyecto en Quartus II

Para generar un nuevo proyecto en la plataforma de programación QUARTUS II dar click en la barra de herramientas, en el menú FILE y luego en New Project Wizard como se muestra en la Figura 17.

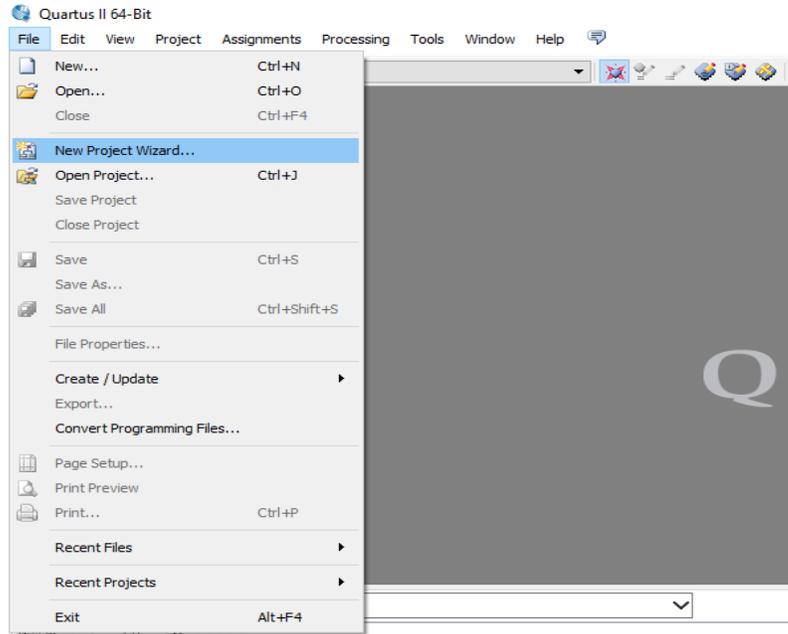


Figura 17. Menú de archivos del QUARTUS II.

Como segundo paso se generará una ventana como se muestra en la figura 19-a por lo que nosotros tendremos que dar click en NEXT para designar la ruta, el nombre del proyecto y de la entidad de nuestro VHDL como en la figura 19-b, en la ventana que se genera como en la figura 19-c se utiliza si es necesario utilizar otro VHDL como parte de un módulo VHDL, después se vuelve a dar click en NEXT para visualizar la ventana de la figura 19-d donde se selecciona el tipo de tarjeta que se está utilizando, en nuestro caso se utiliza CYCLONE IV EP4CE22F17C6N para ver especificaciones puede revisar el ANEXO 2 como se muestra en la figura 18 por último se abrirá la ventana de herramientas por si es necesario designar algún parámetro o configuración específico como se muestra en la Figura 19-e.

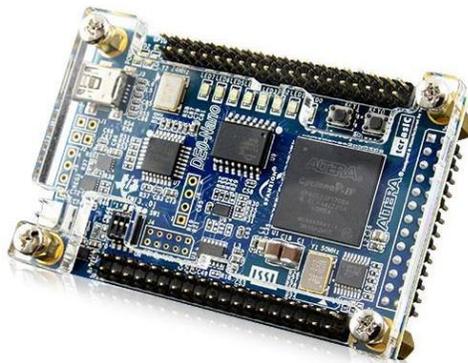
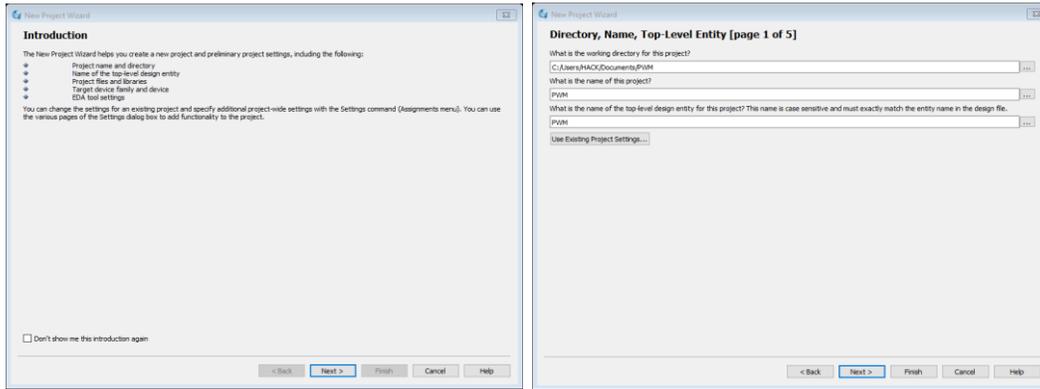
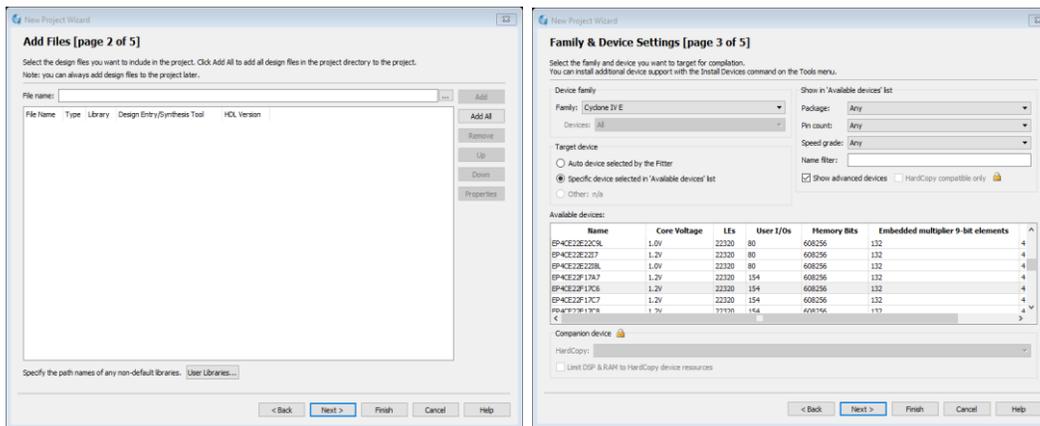


Figura 18. Tarjeta Altera CYCLONE IV EP4CE22F17C6N.



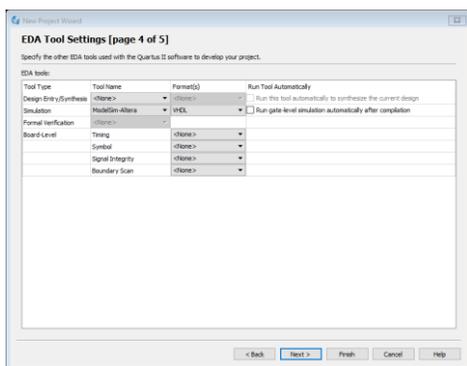
a)

b)



c)

d)



e)

Figura 19. Ventanas de configuración de proyecto. a) Ventana de introducción. b) Ventana de ubicación de archivos y nombramientos. c) Ventana de adjunción de archivos. d) Ventana de designación de hardware. e) Ventana de configuraciones avanzadas.

Por último, se generará el archivo del proyecto en nuestro entorno de desarrollo como se muestra en la Figura 20.

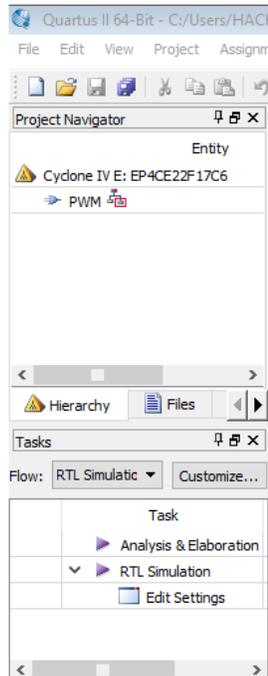


Figura 20. Project Navegador

Después de la creación de nuestro proyecto, proseguimos con la creación de un nuevo archivo VHDL como se muestra dando click en FILE después en NEW y por último en VHDL FILE en la Figura 21.

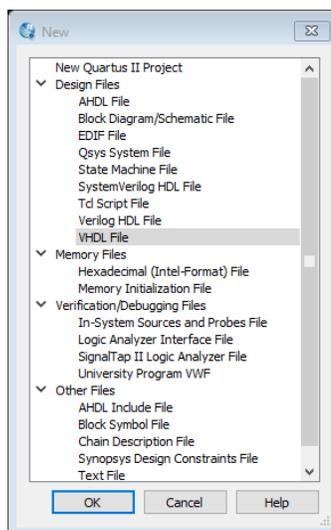


Figura 21. Menú de creación de archivos

Tras finalizar la elaboración de nuestro proyecto se genera un editor de código VHDL como se muestra en la Figura 22.

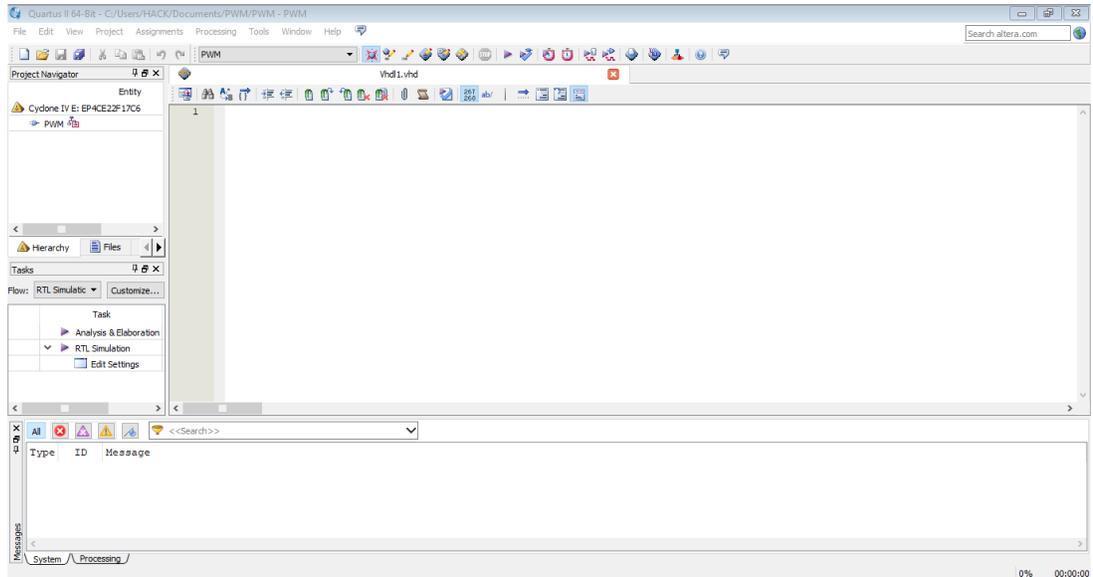


Figura 22. Editor de código VHDL.

4.5.2. Designación de librerías

Tras generar un proyecto en VHDL y para poder crear nuestro archivo es primordial la declaración de nuestra librería principal, así como sus funciones generales mediante el siguiente código mostrado en la Figura 23.

```
1 library IEEE; --Libreria estandar IEEE
2 use IEEE.std_logic_1164.all; -- Uso de libreria estandar logica
3 use ieee.std_logic_arith.all; -- Uso de libreria estandar logica aritmetica
4 use ieee.std_logic_unsigned.all; -- Uso de libreria estandar logica para la asignacion de numero sin signo
```

Figura 23. Asignación de librerías en proyecto VHDL

Con esta declaración de librerías tendremos la libertad de ocupar cualquier tipo de operación lógica-aritmética básica que se encuentre disponible y así como combinas los sistemas numéricos sin ningún inconveniente.

4.5.3. Declaración de entidades

Una vez declarado las librerías proseguimos a declarar nuestra estructura de entidad como se muestra en el siguiente código mostrado en la Figura 24.

```

6 entity PWM is      -- La entidad llamada PWM
7   generic(        -- Declaracion de constantes de tipo genericas que se utilizaran para la comparacion de nuestro contador
8     max_val: integer := 0;
9     val_bits: integer := 0;
10    val_cur: integer := 0
11  );              --Fin de la declaracion de las constantes
12  port(           --Declaracion o asignacion de puertos
13    clk: in std_logic; --Declaracion de una entradas de tipo Estandar Logico
14
15    pulse: out std_logic --Declaracion de una salida de tipo Estandar Logico
16  );
17  end entity; -- Fin de la entidad

```

Figura 24. Declaración de entidades

4.5.4. Descripción de arquitectura

Una vez declarado la entidad y asignado las entradas y salidas, se prosigue a declarar el comportamiento de la arquitectura de la entidad, un ejemplo es mostrado en la Figura 25.

```

1  library IEEE;
2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4  entity prueba is
5  Port ( CLKin : in  STD_LOGIC;
6         CLKout: out STD_LOGIC;
7         PWM2S : out  STD_LOGIC_VECTOR (3 downto 0)
8       );
9  end prueba;
10
11  architecture Behavioral of prueba is
12  signal Cint : integer range 0 to 999999;
13  constant max : integer := 999999; -- 5,000,000 Hz
14  constant half: integer := max/2;
15  signal count : integer range 0 to max := 0;
16  signal CLKint: STD_LOGIC;
17
18  begin
19  -----
20  process
21  begin
22    wait until CLKin'event and CLKin = '1';
23    if
24      count < max then
25      count <= count + 1;
26      else count <= 0;
27    end if;
28
29    if |
30      count < half then
31      CLKint <= '0';
32      else CLKint <= '1';
33    end if;
34  end process;
35
36  CLKout <= CLKint;
37  -----
38
39  process (CLKin)
40  begin
41    if (CLKin'event and CLKin = '1') then
42      if (Cint = 999999) then
43        Cint <= 0;
44      else

```

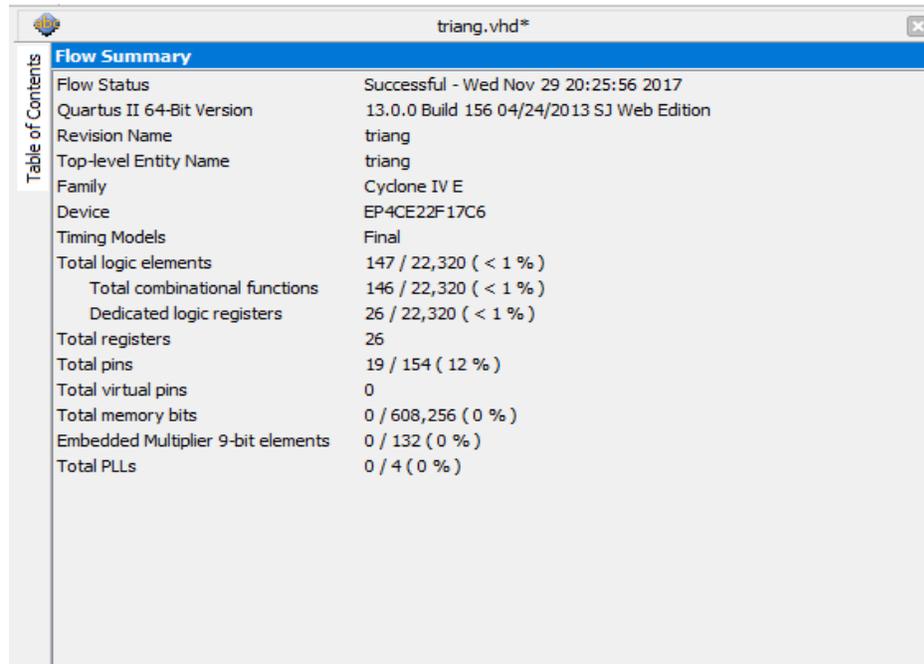
Figura 25. Comportamiento de la arquitectura

4.6. Descripción de la implementación digital en VHDL

A continuación, en esta sección se presenta la abstracción del diseño modelado a un circuito digital síncrono en términos de flujo de las señales digitales, entre los registros de hardware y las operaciones lógicas realizadas internamente de las señales de control para el inversor multinivel. Comúnmente llamado nivel de transferencia de registro (RTL, por sus siglas en inglés).

Para este caso de ejemplo haremos uso del código usado para la implementación de las señales de control para un inversor multinivel 9 niveles.

Tras la compilación y depuración que realiza el programa de QUARTUS II tentaremos un reporte de compilación, que es importante a la hora de diseñar e implementar cualquier algoritmo en VHDL ya que muestra elementos importantes tales como elementos lógicos utilizados, registros, total de pines declarados, etc. Como se muestra en la Figura 26.



Flow Summary	
Flow Status	Successful - Wed Nov 29 20:25:56 2017
Quartus II 64-Bit Version	13.0.0 Build 156 04/24/2013 SJ Web Edition
Revision Name	triang
Top-level Entity Name	triang
Family	Cyclone IV E
Device	EP4CE22F17C6
Timing Models	Final
Total logic elements	147 / 22,320 (< 1 %)
Total combinational functions	146 / 22,320 (< 1 %)
Dedicated logic registers	26 / 22,320 (< 1 %)
Total registers	26
Total pins	19 / 154 (12 %)
Total virtual pins	0
Total memory bits	0 / 608,256 (0 %)
Embedded Multiplier 9-bit elements	0 / 132 (0 %)
Total PLLs	0 / 4 (0 %)

Figura 26. Reporte de compilación

NOTA: Es importante leer y analizar no solo los errores de programación, sino también los WARNING ya que ellos proporcionan una valiosa información durante el proceso de compilación.

Analizaremos nuestro diagrama esquemático que nuestro compilador sintetizó conocido comúnmente como RTL que se visualiza en el menú TOOLS en la pestaña de Netlist Viewers como se ven en la figura 27.

Tras el análisis del RTL se prosigue a simular en la plataforma MODELSIM el VHDL con un CLK que se calcula conforme a la ecuación 48.

$$clk_{master} = \frac{clk_{FPGA}}{frecuencia_{50/60} (Hz)}$$

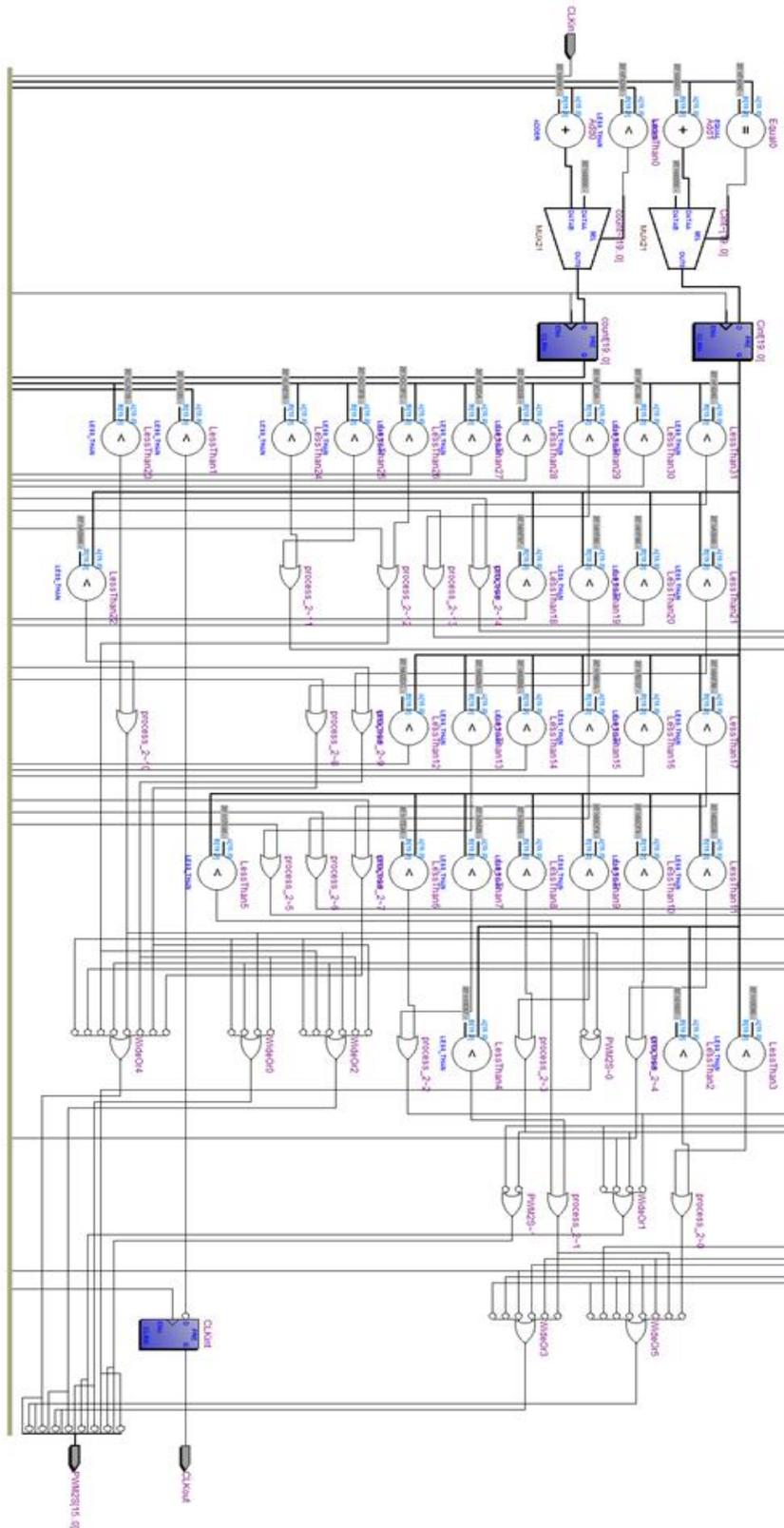


Figura 27. RTL vista final

Capítulo 5

Presentación de resultados

En este capítulo para validar los resultados obtenidos mediante los algoritmos NR, GA y PSO, la simulación fue llevada a cabo a través de la plataforma PSIM y posteriormente implementado en un prototipo experimental de inversor multinivel (3, 5, y 9 niveles).

5. Introducción

Para este trabajo, se seleccionaron los CHB-MLI simétricos de 5, 7 y 9 niveles. Cada uno de los puentes H que componen el inversor son dispositivos semiconductores de potencia (DSEPs) ideales compuestos por IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), los resultados obtenidos en la tensión de salida del inversor son a $\omega = 50$ Hz. Como primer paso, se obtienen ángulos de conmutación óptimos para cada caso (SHE y OMTHD) mediante NR, GA y PSO. Estos métodos son capaces de resolver sistemas de ecuaciones no lineales trascendentales utilizando el software de MATLAB como medio para obtener datos.

A continuación, se mencionan los siguientes parámetros utilizados para la realización de esta tesis. La Tabla II muestra los parámetros que implican la implementación del algoritmo PSO para la reducción de armónicos y la eliminación selectiva de armónicos (SHE) para los inversores multinivel monofásicos (5 niveles, 7 niveles y 9 niveles).

Tabla II. Parámetros del algoritmo PSO

Parámetros	Valores
Constante Cognitiva, C1	1.5
Tamaño de la población	200
Número de variables de decisión	2, 3, ... s
Constante Social, C2	2.0
Peso de inercia, W	1
Número de iteraciones	100

Para el caso de GA, el problema de optimización se llevó a cabo utilizando la caja de herramientas de algoritmos genéticos (GA) de MATLAB. Este algoritmo se detiene cuando se cumplen los criterios de parada y las restricciones. Los ajustes de los parámetros del Algoritmo Genético utilizado aquí se enumeran en la Tabla III.

Tabla III. Parámetro del algoritmo GA

Parámetro	Valor
Número de variables	2, 3, ... s
Generaciones	100
Tipo de población	Doble vector
Tamaño de la población	De 50 a 200
Función de creación	Depende de la restricción
Función de selección	Ruleta
Función de cruce	Depende de la restricción
Función de cruce	0.8 por defecto

Para la simulación de los inversores se utilizó el software Psim para su posterior validación. Después de la implementación del algoritmo PSO y GA, se encontraron los ángulos de conmutación optimizados para la eliminación de armónicos de muy bajo orden, así como para la reducción a un valor mínimo de distorsión armónica total (THD).

5.1. Inversor multinivel en cascada (OMTHD)

Como primer caso de estudio, la técnica OMTHD consigue obtener los ángulos de conmutación óptimos. El objetivo es encontrar el valor mínimo de la magnitud del THD, independientemente de cuánto varía la magnitud del componente fundamental, utilizando algoritmos de NR, GA y PSO. La Tabla IV muestra los resultados obtenidos tanto simulación como en implementación. En las Figuras 28 y 29 se muestra en qué medida el valor de la función a optimizar muestra una convergencia, para el caso de GA en cuántas generaciones obtiene la solución óptima y para el algoritmo PSO en cuántas iteraciones. Aunque el algoritmo de GA muestra una convergencia muy temprana, el algoritmo de PSO es capaz de obtener la menor disminución en la función, siendo éste más adecuado para este objetivo.

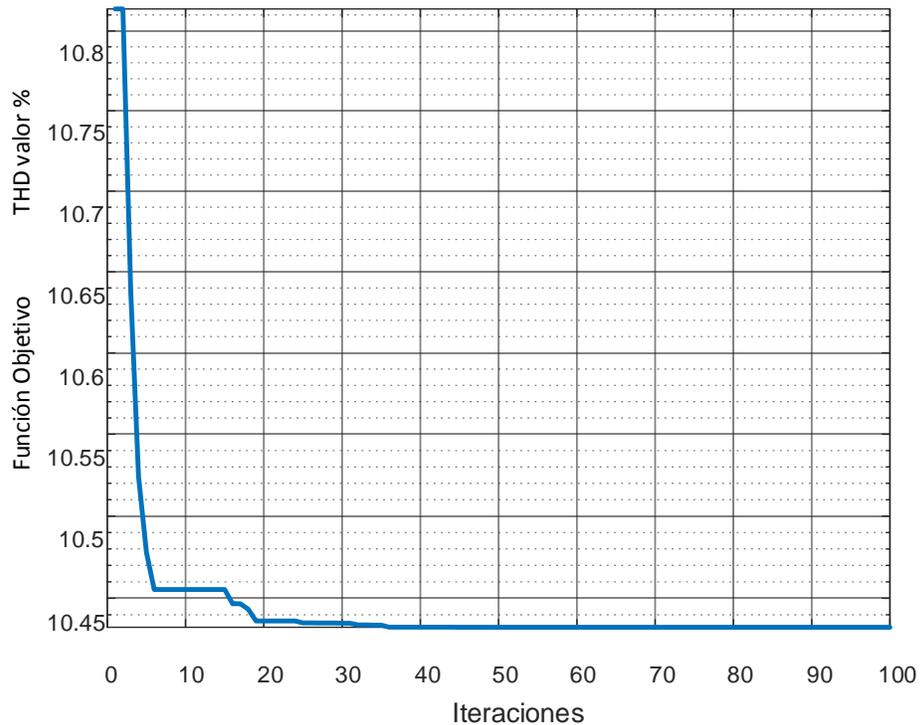


Figura 28. Función objetivo de la curva de ejecución frente al número de iteraciones en el algoritmo PSO. Caso MLI 7 niveles.

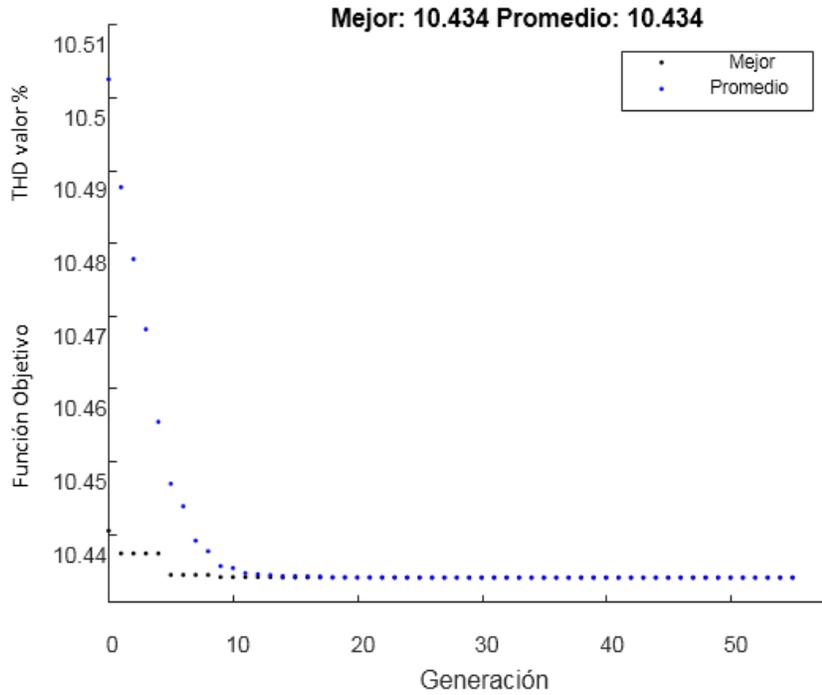


Figura 29. Curva de ejecución del valor de aptitud vs. número de generaciones en el algoritmo GA. Caso MLI 7 niveles.

En la Figura 30, se muestra como es la distribución de las partículas en el espacio de búsqueda para el caso de 2 variables para un inversor multinivel 5 niveles.

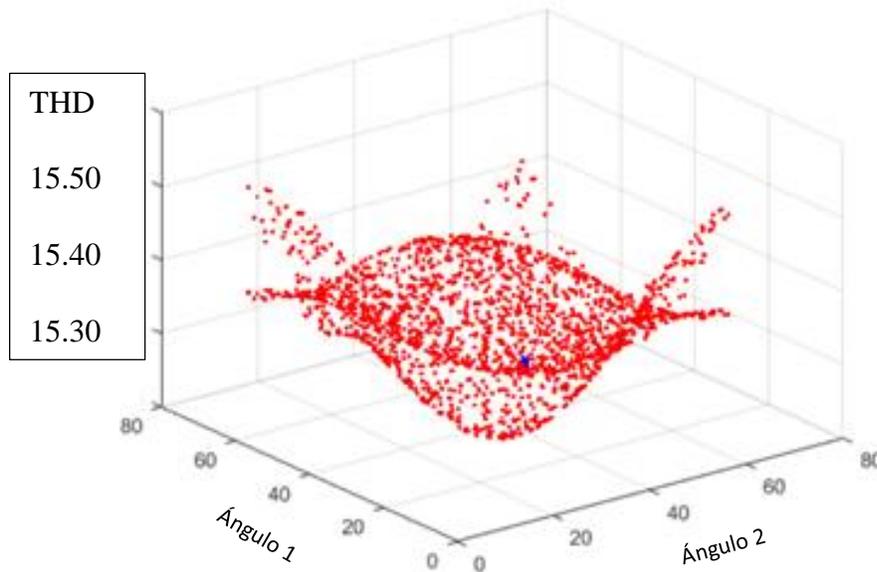


Figura 30. Comportamiento típico del modelo PSO. Caso MLI 5 niveles

Tabla IV. Comparación de los algoritmos NR, GA y PSO para los niveles 5, 7 y 9 de CHB-MLI. OMTHD

Algoritmos	5-niveles			7-niveles			9-niveles		
	NR	GA	PSO	NR	GA	PSO	NR	GA	PSO
θ_1	11.80	14.33	13.40	8	8.08	8.69	10	9	6.86
θ_2	41.77	42.10	41.91	30	28.35	27.89	21.73	21.21	20.78
θ_3	---	---	---	56	50.18	49.81	40	35.84	35.51
θ_4	---	---	---	---	---	---	60	56.06	55.80
%THD simulación	15.51	15.35	15.29	11.09	10.47	10.42	8.65	7.92	7.63
%THD experimental	15.50	15.45	15.34	11.29	10.55	10.40	9.23	8.24	7.75

La Tabla V muestra el valor de la tensión de salida (componente fundamental) expresada en voltios.

Tabla V. Valor fundamental de la amplitud de la tensión (m). Usando OMTHD.

CHB-MLI	NR	GA	PSO
5-niveles simulación	197.9V	196.4V	197.1V
5-niveles experimental	172.33V	172.40V	172.88V
7-niveles simulación	184.9V	192.1V	192.7V
7-niveles experimental	180.96V	187.52V	188.40V
9-niveles simulación	182.6V	188.8V	189.6V
9-niveles experimental	170.44V	175.95V	176.64V

En el apartado de anexos, se encuentran las formas de onda obtenidas mediante el osciloscopio de los inversores multinivel de 3, 5, 7 y 9 niveles.

5.1.1. CMLI 3 niveles

En la Figura 31 se observa mediante el análisis FFT correspondiente a 3 CHB-MLI que el algoritmo PSO alcanza su objetivo que es la reducción del THD, obteniendo asimismo el mayor valor en su componente fundamental.

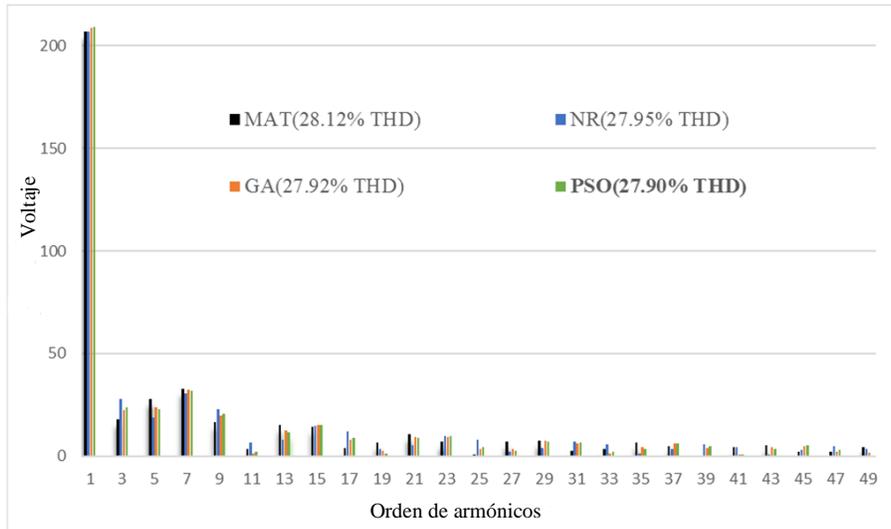


Figura 31. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 3, comparativa

5.1.2. CMLI 5 niveles

En la Figura 32 se observa mediante el análisis FFT correspondiente a 5 CHB-MLI que el algoritmo PSO alcanza en todos los casos su objetivo que es la reducción del THD, obteniendo asimismo el mayor valor en su componente fundamental.

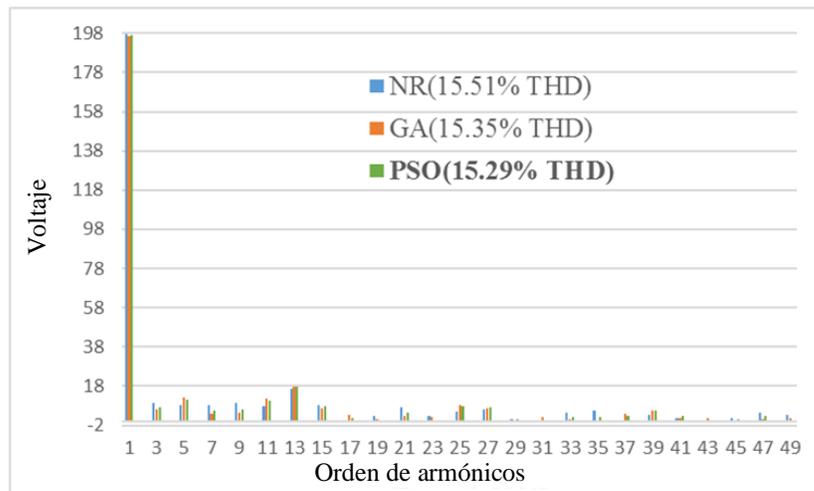


Figura 32. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 5, comparativa

5.1.3. CMLI 7 niveles

En la Figura 33 se observa mediante el análisis FFT correspondiente a 7 CHB-MLI que el algoritmo PSO alcanza su objetivo que es la reducción del THD, obteniendo asimismo el mayor valor en su componente fundamental.

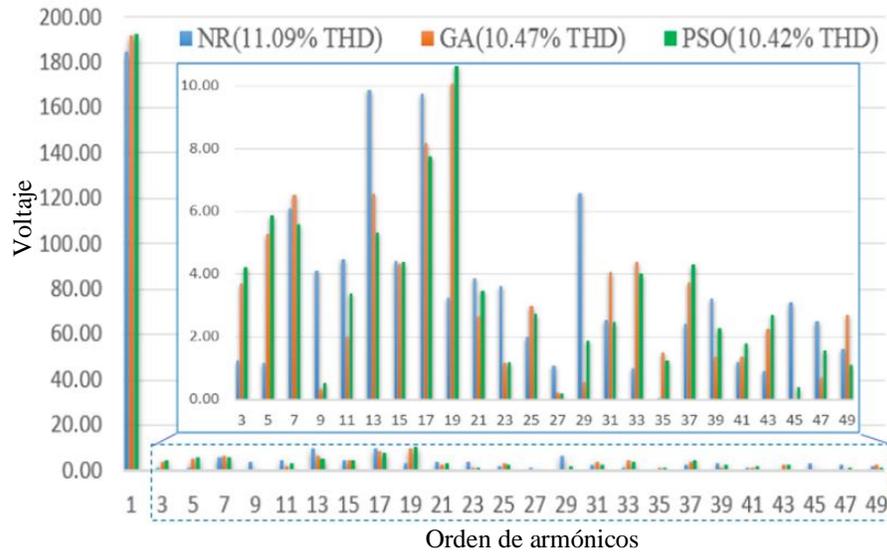


Figura 33. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 7, comparativa

5.1.4. CMLI 9 niveles

En la Figura 34 se observa mediante el análisis FFT correspondiente a 9 CHB-MLI que el algoritmo PSO alcanza su objetivo que es la reducción del THD, obteniendo asimismo el mayor valor en su componente fundamental.

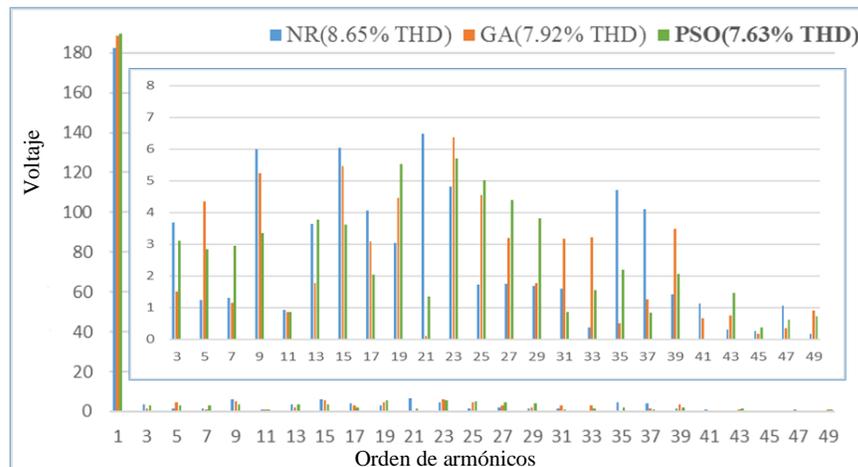


Figura 34. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 9, comparativa

5.2. Inversor multinivel en cascada (SHE)

El segundo caso de estudio es la obtención de los ángulos de conmutación óptimos para la técnica SHE mediante NR, GA y PSO, la Tabla VI muestra los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos muestran que en dos soluciones la optimización por GA consigue obtener un valor mínimo de minimización de THD, sin embargo, el algoritmo de PSO consigue el compromiso con la eliminación de los armónicos de menor orden.

Un parámetro importante es de la misma manera muy importante en los inversores multinivel, ya que es la magnitud de la tensión de salida (componente fundamental). Este valor se refiere a la cantidad de energía suministrada por el inversor a la carga. La Tabla VI muestra la magnitud de la tensión de salida obtenida de la simulación.

Tabla VI. Comparación de los algoritmos NR, GA y PSO para los niveles 5, 7 y 9 de CHB-MLI. OMTHD

	5-levels			7-levels			9-levels		
Algoritmos	NR	GA	PSO	NR	GA	PSO	NR	GA	PSO
θ_1	12.30	11.95	12.30	13.06	12	11.70	3	2	2.03
θ_2	49.20	48.03	48.02	26	26.93	26.87	30	24	24.92
θ_3	----	----	---	57	55.49	56.06	33	36.51	35.23
θ_4	----	----	---	----	----	---	162	60	60.84
%THD simulación	16.93	16.43	16.25	12.49	11.57	11.43	12.91	9.78	10.28
%THD experimental	16.90	16.57	16.40	12.40	11.64	11.53	13.12	9.76	10.34

Tabla VII. Valor fundamental de la amplitud de la tensión (m). Usando SHE.

CHB-MLI	NR	GA	PSO
5-niveles simulación	197.9V	196.4V	197.1V
5-niveles experimental	178.07V	179.68V	179.70V
7-niveles simulación	184.9V	192.1V	192.7V
7-niveles experimental	180.67V	182.10V	178.62V
9-niveles simulación	182.6V	188.8V	189.6V
9-niveles experimental	169.50V	172.20V	171.92V

5.2.1. CMLI 3 niveles

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 35, donde se muestra la FFT correspondiente a 3 CHB-MLI, eliminando el tercer orden de armónico. Debido a que la solución no es multivariable, limitándose a una sola variable, se puede hacer el cálculo sin necesidad de usar una técnica de optimización dando como resultado los algoritmos empleados convergiendo en una solución en común.

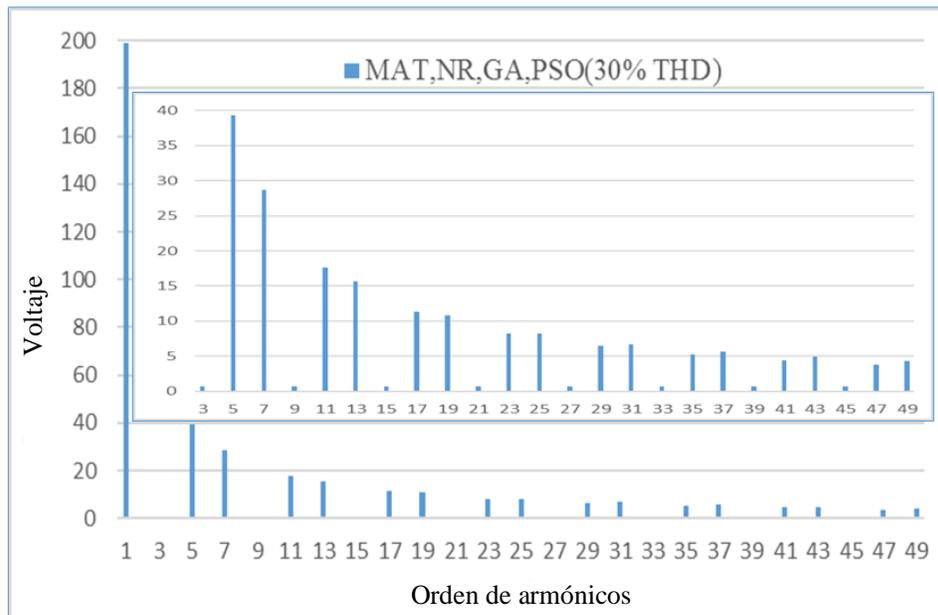


Figura 35. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 3, comparativa

5.2.2. CMLI 5 niveles

Se muestra en la Figura 36, donde se muestra la FFT correspondiente a 5 CHB-MLI, eliminando el tercer y quinto orden de armónico.

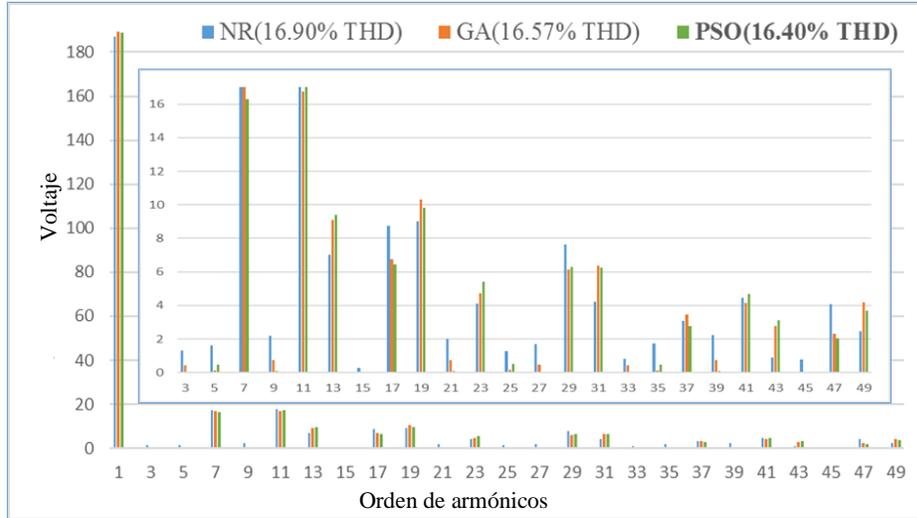


Figura 36. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 5, comparativa

5.2.3. CMLI 7 niveles

Se muestra en la Figura 37, donde se muestra el FFT correspondiente a 7 CHB-MLI, eliminando el tercer, quinto y séptimo orden de armónico.

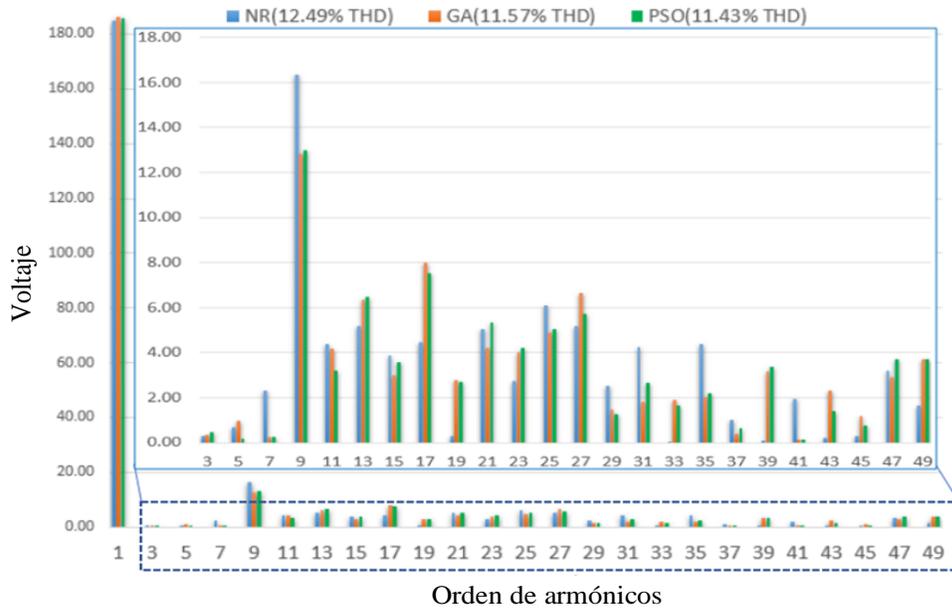


Figura 37. Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 7, comparativa

5.2.4. CMLI 9 niveles

Se muestra en la Figura 38, donde se muestra el FFT correspondiente a 7 CHB-MLI, eliminando el tercer, quinto, séptimo y noveno orden de armónico.

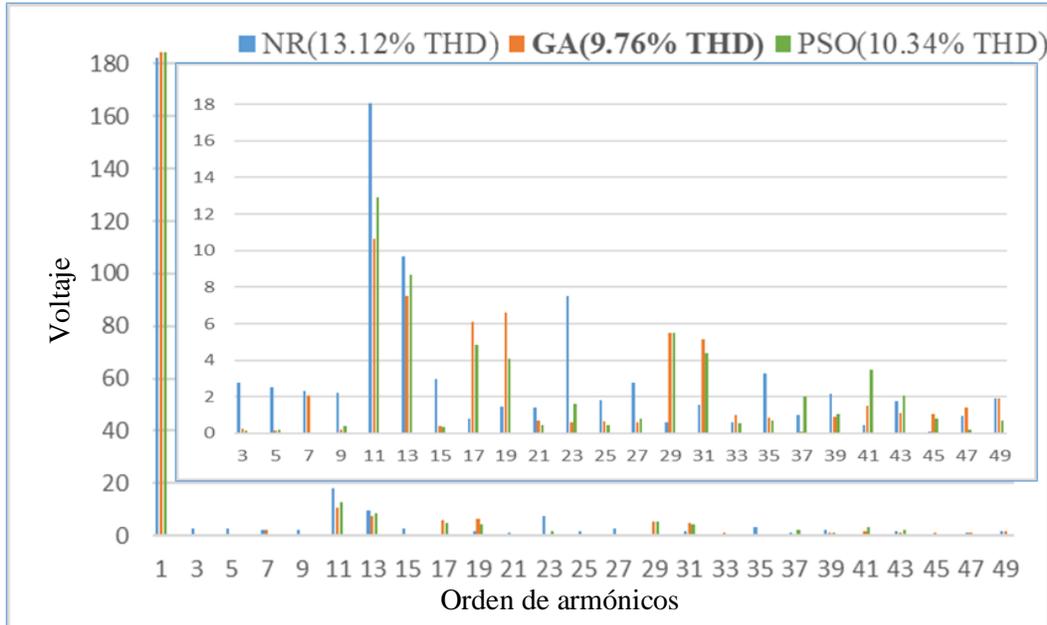


Figura 38 Análisis FFT correspondiente a CHB-MLI 9, comparativa

5.3. Observaciones y conclusiones

Para todos los casos, el algoritmo NR no ha sido capaz de converger hacia una solución óptima y esto se debe a que no es capaz de distinguir entre un valor global y local óptimo, quedando atrapado en estos últimos valores.

Usualmente haciendo uso de la topología multinivel incrementando el número de niveles, se obtiene un valor de THD mucho más bajo, ya que los valores de los ángulos de conmutación pueden ser mejorados, este problema se toma como un caso de optimización.

Capítulo 6 Conclusiones

En este capítulo para validar los resultados obtenidos mediante los algoritmos NR, GA y PSO, la simulación fue llevada a través de la plataforma PSIM y posteriormente implementado en un prototipo experimental de inversor multinivel (3, 5, y 9 niveles).

6.1. Resumen de conclusiones

Usualmente haciendo uso de la topología multinivel incrementando el número de niveles, se obtiene un valor de THD mucho más bajo, ya que los valores de los ángulos de conmutación pueden ser mejorados, este problema se toma como un caso de optimización.

Para este trabajo, se seleccionó como estudio de caso una topología monofásica de inversores multinivel Cascade H-Bridge (CHB-MLI o CMLI) con fuentes de CC independientes. Se llevó a cabo un análisis que consideró tres escenarios: 5 niveles, 7 niveles y 9 niveles aplicando el concepto de la forma de onda escalonada armónica optimizada (OHSW) y comparando los resultados entre la minimización óptima de la distorsión armónica total (OMTHD) y la PWM eliminada armónica selectiva (SHE-PWM). El software de MATLAB se utilizó para resolver los sistemas de ecuaciones no lineales trascendentales para obtener los ángulos óptimos aplicando los métodos NR, GA y PSO. Posteriormente, se realizó la simulación de cada caso bajo análisis en el software Psim para comparar los valores de THD obtenidos.

Utilizando la técnica OMTHD, se obtuvieron los mejores resultados de reducción del valor de THD con el algoritmo PSO. Por el contrario, utilizando el método clásico de optimización NR, presentó valores más altos de THD para todos los casos.

Finalmente, analizando los resultados obtenidos con el método SHE eliminando los armónicos de bajo orden según el caso, se logró una mayor reducción del valor de THD en la mayoría de los casos analizados, utilizando el algoritmo PSO.

6.2. Trabajos futuros

En este trabajo, mediante la simulación e implementación, se abordó el análisis de la reducción y eliminación de armónicos en un inversor multinivel monofásico en cascada, para trabajos futuros se pretende hacer el estudio de los efectos térmicos que produce un contenido mayor de THD, de igual manera hacer un estudio para el caso de inversores trifásicos en cascada. Partiendo de ello, se pueden hacer la optimización de los ángulos de conmutación manteniendo el inverso en funcionamiento (optimización en línea) aunque sería un gasto de computo mayor.

6.3. Publicaciones

Este trabajo de tesis, obtuvo 2 productos, uno de ellos aceptado y presentado en el congreso CIEP 2018, llevado a cabo en la ciudad de Puebla y organizado por la UDLAP. El segundo artículo está sometido a revisión en la revista ELSEVIER. Ambos documentos se encuentran adjuntos en el apartado de anexos.

Referencias

- [1] E. T. Ramírez, "Distorsion armonica," *Autom. Product. Y Calid. SaCV*, pp. 1-31, 2008.
- [2] H. Taghizadeh and M. T. Hagh, "Harmonic elimination of multilevel inverters using particle swarm optimization," in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 393-396.
- [3] F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/AC inverters: applications in Renewable Energy*: Crc Press, 2016.
- [4] A. F. L. Villamizar, J. L. D. Rodríguez, and A. P. García, "Minimización de la distorsión armónica de una modulación PWM con algoritmos genéticos," *ITECKNE*, vol. 8, 2011.
- [5] J. A. Araque, J. L. Díaz, and O. E. Gualdrón, "Optimización del THD en un convertidor multinivel monofásico usando algoritmos genéticos," *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 1, 2013.
- [6] A. Jain, N. Khatri, P. Shrivastav, and A. Mahor, "THD analysis of cascaded H-bridge multilevel inverters in fuel cell applications," in *Computer, Communication and Control (IC4), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1-6.
- [7] D. Yadav and J. Kumar, "Harmonic minimization using PSO technique for CMLI with unequal and equal DC sources," in *Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE International Conference on*, 2016, pp. 1-5.
- [8] Z. Wang, X. Yin, H. Cheng, Z. Zhang, and J. Yang, "A novel PWM scheme to eliminate common-mode voltages in cascaded multi-level inverters," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES*, 2003, pp. 780-785.
- [9] J.-S. Lai and F. Z. Peng, "Multilevel converters-a new breed of power converters," in *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95., Conference Record of the 1995 IEEE*, 1995, pp. 2348-2356.
- [10] E. Babaei and S. H. Hosseini, "New cascaded multilevel inverter topology with minimum number of switches," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2761-2767, 2009.
- [11] M. M. Hasan and A. Abu-Siada, "A novel three phase cascaded multilevel inverter topology," in *Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon), 2016 IEEE*, 2016, pp. 31-35.
- [12] S. Jain and V. Sonti, "A highly efficient and reliable inverter configuration based cascaded multilevel inverter for PV systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, pp. 2865-2875, 2017.
- [13] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, and J. N. Chiasson, "Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 3911-3916.
- [14] B. Alamri, A. Sallama, and M. Darwish, "Optimum SHE for cascaded H-bridge multilevel inverters using: NR-GA-PSO, comparative study," 2015.
- [15] J. Rodriguez, L. G. Franquelo, S. Kouro, J. I. Leon, R. C. Portillo, M. A. M. Prats, *et al.*, "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, pp. 1786-1817, 2009.
- [16] J. Kumar, B. Das, and P. Agarwal, "Selective Harmonic Elimination for Multilevel Inverters" by Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)," *IIT Bombay, December*, 2008.

- [17] P. N. Enjeti, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics-A critical evaluation," in *Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1988, pp. 418-430.
- [18] R. Brindha and R. Kavitha, "Harmonic optimization in seven level inverter employing hybrid BBO/MADS algorithm," in *Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1-6.
- [19] P. W. Hammond, "A new approach to enhance power quality for medium voltage drives," in *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1995. Record of Conference Papers., Industry Applications Society 42nd Annual*, 1995, pp. 231-235.
- [20] M. H. Aghdam, S. H. Fathi, and A. Ghasemi, "Modeling and simulation of three-phase OHSW multilevel voltage-source inverter by means of switching functions," in *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*, 2006, pp. 633-641.
- [21] J. A. Suarez, G. Di Mauro, D. Anaut, and C. Agüero, "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales," *Revista del IEEE América Latina*, vol. 3, pp. 71-77, 2005.
- [22] K. Thakre and K. B. Mohanty, "Comparative analysis of THD for symmetrical and asymmetrical 17 level cascaded H-bridge inverter using carrier based PWM techniques," in *Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 306-310.
- [23] I. F II, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," *New York, NY, USA*, 1993.
- [24] A. J. Sarnari and R. Živanović, "Reliable steady state voltage stability limit estimation using Newton-Raphson-based method," in *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2017 Australasian*, 2017, pp. 1-6.
- [25] J. R. Koza, *Genetic programming II, automatic discovery of reusable subprograms*: MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [26] A. Beig and A. Dekka, "Experimental verification of multilevel inverter-based standalone power supply for low-voltage and low-power applications," *IET Power Electronics*, vol. 5, pp. 635-643, 2012.
- [27] R. Kennedy, "J. and Eberhart, Particle swarm optimization," in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV, pages*, 1995.
- [28] A. Jain and N. Maithil, "Diminution of harmonics in multilevel inverter using particle swarm optimization," in *Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), 2017 International Conference on*, 2017, pp. 1-8.
- [29] T. Jeevabharathi and V. Padmathilagam, "Harmonic elimination of cascaded multilevel inverters using particle swarm optimization," in *Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 301-306.
- [30] O. Amanifar, "Optimal distributed generation placement and sizing for loss and THD reduction and voltage profile improvement in distribution systems using particle swarm optimization and sensitivity analysis," in *Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2011 16th Conference on*, 2011, pp. 1-7.
- [31] T. Starkweather, S. McDaniel, K. E. Mathias, L. D. Whitley, and C. Whitley, "A Comparison of Genetic Sequencing Operators," in *ICGA*, 1991, pp. 69-76.
- [32] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*, 1995, pp. 39-43.

- [33] S. D. Patil and S. G. Kadwane, "Application of optimization technique in SHE controlled multilevel inverter," in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, 2017, pp. 26-30.
- [34] M. Awais, M. A. Raza, H. Ilyas, H. B. Younus, and T. Abbas, "A novel problem formulation for selection of switching angles for minimization of total harmonic distortion in cascaded multilevel inverters," in *Emerging Technologies (ICET), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 1-6.
- [35] N. Yousefpoor, S. H. Fathi, N. Farokhnia, and H. A. Abyaneh, "THD minimization applied directly on the line-to-line voltage of multilevel inverters," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 59, pp. 373-380, 2012.
- [36] K. P. Kumar and S. Venkateswarlu, "Optimized approach for minimisation of THD in LL voltage of three-phase cascaded multi-level inverters," in *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 363-367.
- [37] A. K. Arani, H. Zaferani, M. Sanjari, and G. Gharehpetian, "Using genetic algorithm and simulated annealing for 27-level PV inverter THD minimization," in *Smart Grid Conference (SGC), 2014*, 2014, pp. 1-6.
- [38] K. Omirzakhov and A. Ruderman, "Time domain optimization of voltage and current THD for a three-phase cascaded inverter with three H-bridges per phase," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 2017 International Conference on*, 2017, pp. 765-770.
- [39] R. Emamalipour, B. Asaei, and B. Farhangi, "THD minimization in variable input cascaded H-bridge multi-level inverters via state table," in *Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), 2016 7th*, 2016, pp. 396-402.
- [40] M. Srndovic, A. Zhetessov, T. Alizadeh, Y. L. Familiant, G. Grandi, and A. Ruderman, "Simultaneous Selective Harmonic Elimination and THD Minimization for a Single-Phase Multilevel Inverter With Staircase Modulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, pp. 1532-1541, 2018.
- [41] M. T. Hagh, F. N. Mazgar, S. Roozbehani, and A. Jalilian, "THD minimisation of multilevel inverter with optimised dc sources magnitude and switching angles," *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, pp. 875-878, 2017.
- [42] M. Etesami, N. Ghasemi, D. M. Vilathgamuwa, and W. L. Malan, "Particle swarm optimisation-based modified SHE method for cascaded H-bridge multilevel inverters," *IET Power Electronics*, vol. 10, pp. 18-28, 2017.
- [43] A. Al-Othman and T. H. Abdelhamid, "Elimination of harmonics in multilevel inverters with non-equal dc sources using PSO," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 606-613.
- [44] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 2, 2008.
- [45] C. K. Duffey and R. P. Stratford, "Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, pp. 1025-1034, 1989.
- [46] J. A. A. Gallardo, J. L. D. Rodriguez, and A. P. Garcia, "THD optimization of a single phase cascaded multilevel converter using PSO technique," in *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2013 Workshop on*, 2013, pp. 1-6.
- [47] M. Awais, H. Ilyas, H. B. Younus, M. A. Raza, and T. Abbas, "Optimal switching angles for minimization of total harmonic distortion in single phase cascaded multilevel inverters," in *Multi-Topic Conference (INMIC), 2016 19th International*, 2016, pp. 1-6.

- [48] N. Yousefpoor, N. Farokhnia, S. Fathi, and J. Moghani, "Developed single-phase OMTD technique for cascaded multi-level inverter by considering adjustable DC sources," in *Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. EPECS'09. International Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [49] S. Trimberger, "SRAM Programmable FPGAs," in *Field-Programmable Gate Array Technology*, ed: Springer, 1994, pp. 15-96.
- [50] B. Shivaleelavathi, "A novel implementation of digital control strategy for multilevel inverters using FPGA Wavect controller," in *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2017 IEEE 18th Workshop on*, 2017, pp. 1-6.

ANEXO A. Diseño de placas del convertidor multinivel

El diseño de los PCB del inversor multinivel monofásico se compone de 2 circuitos. Los cuales se muestran a continuación:

- PCB de optoacopladores

El esquemático del PCB es mostrado en la figura A-1

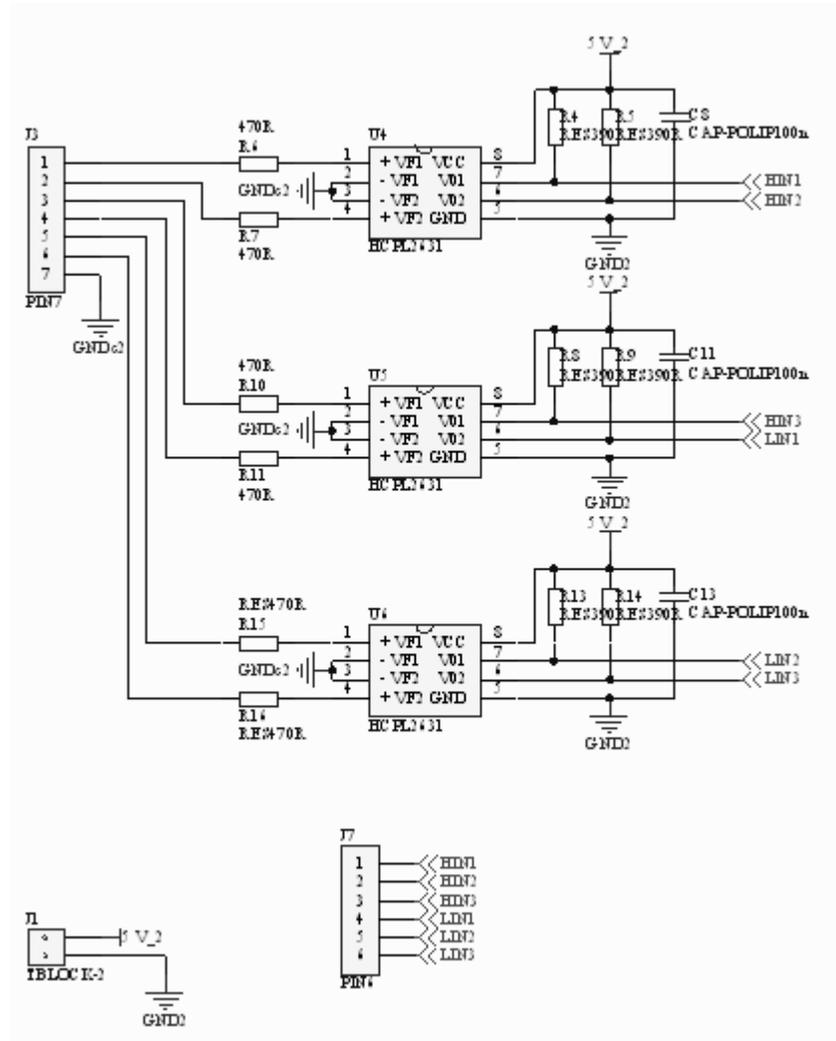


Figura A-1 Diseño de los optoacopladores en Altium

El layer de la placa es mostrado en la figura A-2.

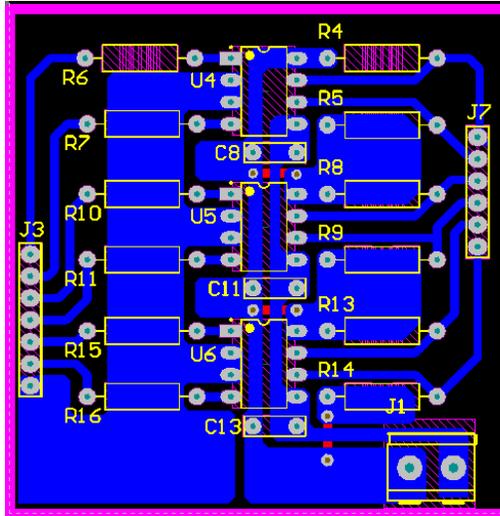


Figura A-2. Top layer de los optoacopladores.

- PCB módulos IRAMS10UP60B

El esquemático de la etapa de los módulos se muestra en la figura A-3.

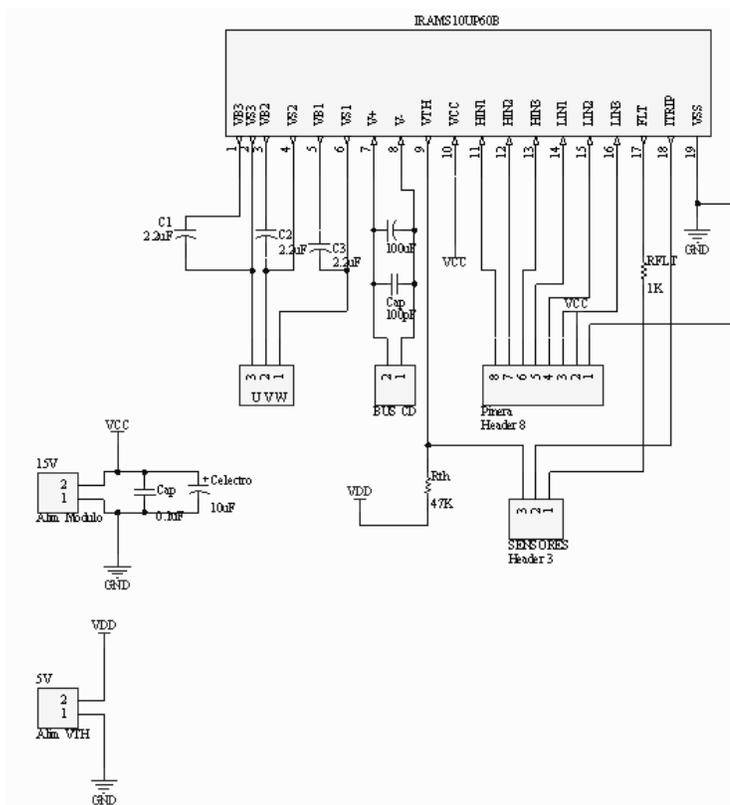


Figura A-3. Esquemático de los módulos IRAMS10UP60B

En la figura A-4 se tomaron en cuenta los espacios para la colocación de los disipadores para cada uno de los módulos de potencia.

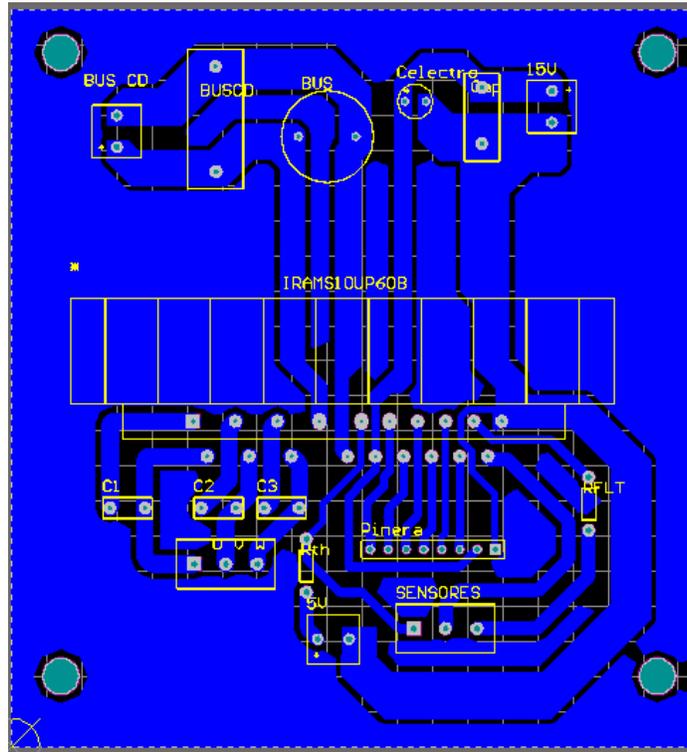


Figura A-4. PCB de los módulos IRAMS10up60B.

A continuación, se observa en la figura A-5 el ensamble final para cada celda tipo puente H.



Figura A-5. Módulo terminado con etapa de control y potencia.

En la figura número A-6 se encuentra la construcción terminada de todo el prototipo experimental que se elaboró correspondiente al trabajo de investigación.

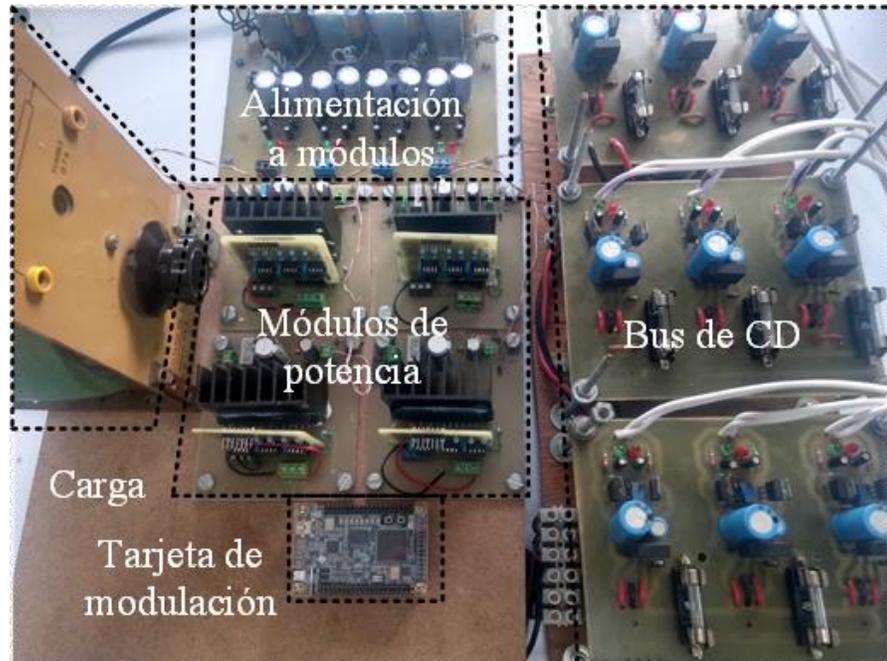


Figura A-6. Banco de prueba construido.

ANEXO B. Código para algoritmo PSO

```
clc;
clear;
close all;
%% Definición del problema
CostFunction=@(x) THD_5(x);    % función objetivo
nVar=2;    % numero de variables de decision
VarSize=[1 nVar];
VarMin=0;
VarMax=90;
plotObjFcn = 1;
%% PSO Parametros
MaxIt=200;    % maximo numero de iteraciones
nPop=200;    % tamaño de la población
% PSO Parametros
w=1;    % peso de inercia
wdamp=0.99;    % tasa de salto
c1=1.5;    % coeficiente de aprendizaje personal
c2=2.0;    % coeficiente de aprendizaje global
VelMax=0.1*(VarMax-VarMin);
VelMin=-VelMax;
%% inicia
empty_particle.Position=[];
empty_particle.Cost=[];
empty_particle.Velocity=[];
empty_particle.Best.Position=[];
empty_particle.Best.Cost=[];
particle= repmat(empty_particle,nPop,1);
GlobalBest.Cost=inf;
```

```
for i=1:nPop

    % posición inicialización
    particle(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);

    % inicialización de velocidad
    particle(i).Velocity=zeros(VarSize);

    % evaluación
    particle(i).Cost=CostFunction(particle(i).Position);

    % actualizar mejor personal
    particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
    particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

    % actualizar mejor global
    if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

        GlobalBest=particle(i).Best;
    end
end
end
BestCost=zeros(MaxIt,1);
%% pso lazo
for it=1:MaxIt

    for i=1:nPop

        % actualiza velocidad
        particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity ...
            +c1*rand(VarSize).*(particle(i).Best.Position-particle(i).Position) ...
```

```
+c2*rand(VarSize).*(GlobalBest.Position-particle(i).Position);

% limites de velocidad
particle(i).Velocity = max(particle(i).Velocity, VelMin);
particle(i).Velocity = min(particle(i).Velocity, VelMax);

% actualizar posición
particle(i).Position = particle(i).Position + particle(i).Velocity;

% efecto de velocidad
IsOutside=(particle(i).Position<VarMin | particle(i).Position>VarMax);
particle(i).Velocity(IsOutside)=-particle(i).Velocity(IsOutside);

% aplicar limites de posición
particle(i).Position = max(particle(i).Position, VarMin);
particle(i).Position = min(particle(i).Position, VarMax);

% evaluación
particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);

% actualizar mejor posición individual
if particle(i).Cost<particle(i).Best.Cost

    particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
    particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

% actualizar mejor posición global
if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

    GlobalBest=particle(i).Best;
```

```
        end

    end

end

BestCost(it)=GlobalBest.Cost;

disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = ' num2str(BestCost(it))]);

w=w*wdamp;

end

BestSol = GlobalBest;

%% Resultados

figure;
plot(BestCost,'LineWidth',2);
semilogy(BestCost,'LineWidth',2);
xlabel('Iteration');
ylabel('Function Objective');
grid on;

figure;
plot(BestSol.Position,'* b');
axis([0 1000 0 90]);
%semilogy(BestSol,'LineWidth',2);
```

```
xlabel('Iteration');
ylabel('Angules Values');
grid on;

plotCostFunction
    ub = 60;
    lb = 0;
    npoints = 1000;
    x = (ub-lb) .* rand(npoints,2) + lb;
    for ii = 1:npoints
        f = CostFunction([x(ii,1) x(ii,2)]);
        plot3(x(ii,1),x(ii,2),f,'r');hold on
    end
    plot3(swarm(1,3,1),swarm(1,3,2),swarm(1,4,1),'xb','linewidth',5,'Markersize',5);grid
```

ANEXO C. CONFIGURACIÓN DE PROGRAMACIÓN DE ALTERA

Pasos para la configuración de tarjeta Altera en QUARTUS II

1. Comprobar el correcto funcionamiento de nuestro código VHDL como se muestra en las figuras C-1 y C-2.

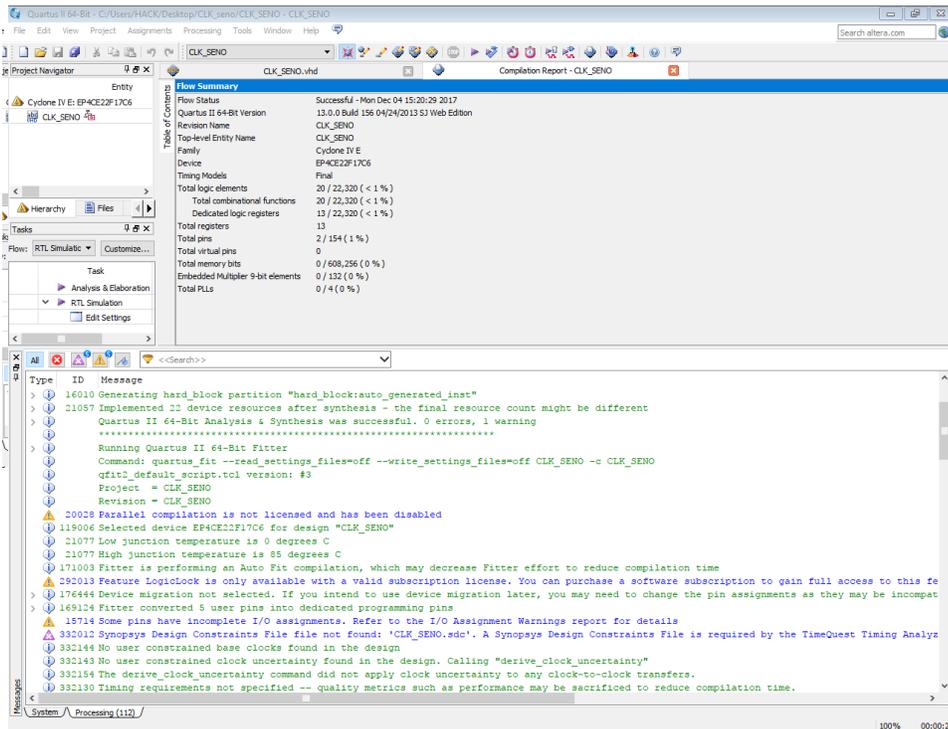


Figura C-1 Reporte de compilación de QUARTUS II

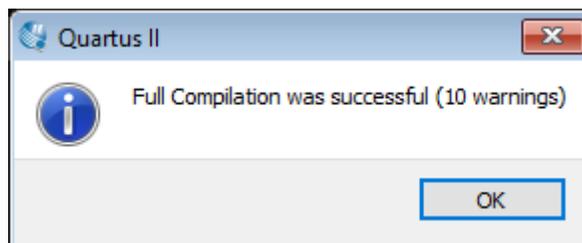


Figura C-2 Compilación correcta

2. Localizar en la barra de herramientas el PIN PLANNER con el logotipo como se muestra en la imagen C-3 para la asignación de PUERTOS en la FPGA



Figura C-3 Icono PIN PLANNER

- Como se muestra en la figura C-4 se presenta la asignación de los puertos de entrada y salida con ayuda del manual de especificaciones

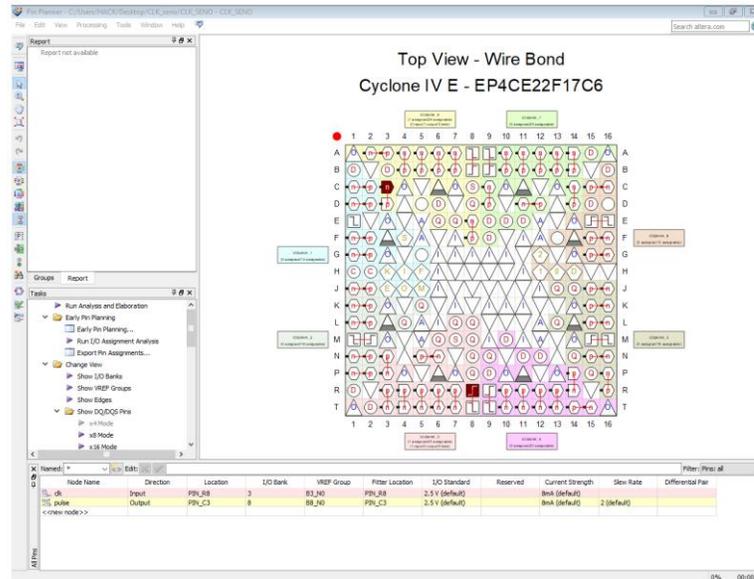


Figura C-4 Ventana de PIN PLANNER

- Localizar el Localizar en la barra de herramientas el PROGRAMMER con el logotipo como se muestra en la imagen C-5 para la asignación del USB-BLASTER



Figura C-5 Icono de PROGRAMMER

- Como se muestra en la figura C-6 se presenta la ventana de PROGRAMMER y para grabar en la FPGA nuestro VHDL dar click en START

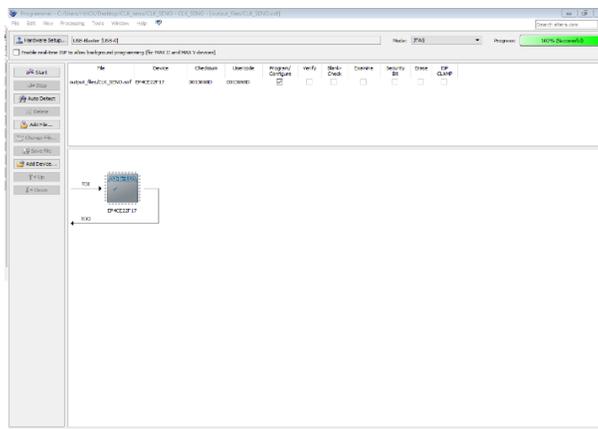


Figura D-6 Ventana de PROGRAMMER

ANEXO D. Descripción del hardware utilizado

La tarjeta empleada en la implementación para el Modulador PWM del inversor multinivel en cascada y en los módulos de IGBT del CMLI es la tarjeta Altera Quartus Cyclone IVE, la cual se muestra en la Figura D-1. Dicha tarjeta cuenta con:

- FPGA Altera Cyclone® IV EP4CE22F17C6N.
- 153 pines I/O.
- Circuito USB-Blaster incorporado para su programación.
- Dos hileras de 40 GPIO. (72 pines I/O, 2 pines de 5V y 2 de 3.3V y 4 pines de tierra.
- Un convertidor analógico digital de 8 canales a 12 bits de 50 Kbps a 200 Kbps.
- Un bloque de memoria de 32MB SDRAM.
- Una memoria de 2Kb 12C EPROM.
- Un reloj oscilador de 50 MHz.
- Un puerto de alimentación mini-AB de 5V.
- Dos pines de alimentación de 3.6V a 5.7V.
- Un acelerómetro de alta resolución de 13 bits ADI ADXL128S022.

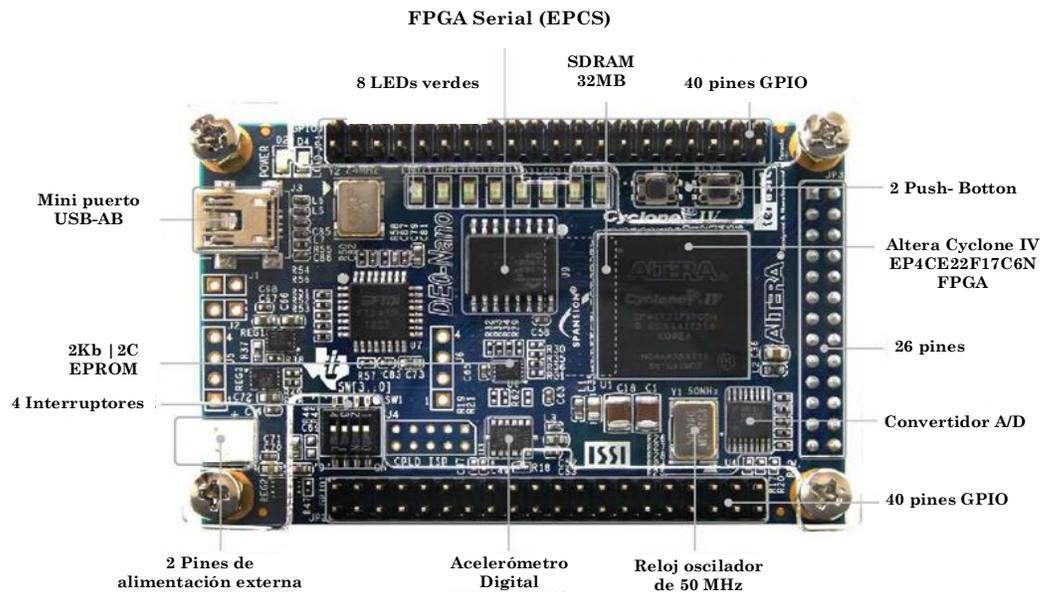


Figura D-1 Tarjeta Altera Quartus Cyclone IVE.

ANEXO E. Código en lenguaje VHDL para MLI 9 niveles

En la siguiente imagen se anexa el código para implementar un MLI 9 niveles, este cuenta con la reconstrucción de toda la forma de onda a partir de cualquier ángulo de conmutación calculado, esto lo hace muy práctico, ya que no es necesario reconstruir la señal ángulo por ángulo.

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
entity prueba is
    Port ( CLKin : in  STD_LOGIC;
          CLKout: out STD_LOGIC;
          PWM2S : out STD_LOGIC_VECTOR (15 downto 0)
          );
end prueba;
architecture Behavioral of prueba is
    signal Cint : integer range 0 to 1000000;
    constant max : integer := 1000000; -- 5,000,000 Hz
    constant half: integer := max/2;
    signal count : integer range 0 to max := 0;
    signal CLKint: STD_LOGIC;
begin
    -----
    process
    begin
        wait until CLKin'event and CLKin = '1';
        if
            count < max then
                count <= count + 1;
            else count <= 0;
        end if;
    end process;
end;
```

```
if
count < half then
    CLKint <= '0';
else CLKint <= '1';
end if;
end process;
CLKout <= CLKint;
-----
process (CLKin)
begin
    if (CLKin'event and CLKin = '1') then
        if (Cint = 1000000) then
            Cint <= 0;
        else
            Cint <= Cint + 1;
        end if;
    end if;
end process;
process (Cint)
variable a: integer;
variable b: integer;
variable c: integer;
variable d: integer;
variable pi: integer;
variable Dpi: integer;

begin
a:=alpha1;
b:=alpha2;
c:=alpha3;
```

```
d:=alpha4;
pi:=500000;
Dpi:=1000000;
case Cint is
when 0 to a      => PWM2S <="1010101010101010";--  0
when a+1 to b    => PWM2S <="1010101010101100";--  vdc
when b+1 to c    => PWM2S <="1010101011001100";--  2vdc
when c+1 to d    => PWM2S <="1010110011001100";--  3vdc
when d+1 to pi-d => PWM2S <="1100110011001100";--  4vdc
when pi-d+1 to pi-c => PWM2S <="1010110011001100";--  3vdc
when pi-c+1 to pi-b => PWM2S <="1010101011001100";--  2vdc
when pi-b+1 to pi-a => PWM2S <="1010101010101100";--  VDC
when pi-a+1 to pi+a => PWM2S <="1010101010101010";--  0
when pi+a+1 to pi+b => PWM2S <="1010101010100011";-- -VDC
when pi+b+1 to pi+c => PWM2S <="1010101000110011";-- -2VDC
when pi+c+1 to pi+d => PWM2S <="1010001100110011";-- -3VDC
when pi+d+1 to Dpi-d => PWM2S <="0011001100110011";-- -4vdc
when Dpi-d+1 to Dpi-c => PWM2S <="1010001100110011";-- -3vdc
when Dpi-c+1 to Dpi-b => PWM2S <="1010101000110011";-- -2vdc
when Dpi-b+1 to Dpi-a => PWM2S <="1010101010100011";-- -vdc
when Dpi-a+1 to Dpi    => PWM2S <="0101010101010101";--  0
when others => PWM2S <="-----";
end case;
end process;
end Behavioral;
```

ANEXO F. Artículo aceptado y presentado en CIEP

UDLAP[®]

Universidad de las Américas Puebla

by the Department of Computing, Electronics & Mechatronics,
certifies the participation of

Manuel Marin Reyes

for presenting the paper entitled
**Calculation of optimal switching angles for a multilevel
inverter using NR and GA-a comparison**
at the 14th International Conference on
Power Electronics, CIEP 2018



Gerardo Ayala San Martín, Ph.D.
Director of the Department of Computing,
Electronics and Mechatronics



Pedro Bañuelos Sánchez, Ph.D.
General Co-Chair CIEP 2018

October 24th, 2018, Puebla, Mexico.

ANEXO G. Artículo en revisión en ELSEVIER

5/12/2018

MS Landing

Due to a system upgrade, EVISE will be unavailable on Thursday December 13, between 9:00 am and 1:00 pm BS



COMPELECENG_2018_2192 | Research Paper | SI

Calculation of Optimal Switching Angles for a Multilevel Inverter using NR, PSO, and GA- a comparison

Susana estefany de león aldaco | UNIVERSIDAD INTERNACIONAL IBEROAMERICANA, Calle 15 No 36, IMI III, Mexico.

Status: **Under Review (77 days)** | Submitted: **15/Sep/2018**

Overview

Files Messages

Other Authors [Show Details](#)

Manuel Marin Reyes (TecNM-CENIDET), Jesus Aguayo (TecNM-CENIDET)

Contact Editor

Abstract

Currently, multilevel inverters have been increased the number of applications in the industrial sector and renewable energy sources. Among its characteristics, the most remarkable are modular design, high performance, and low harmonic distortion in the output voltage waveform. For this paper, a single-phase Cascade H-Bridge Multilevel Inverters (CHB-MLI or CMLI) topology with independent DC sources, has been selected as case study. Analyzing three scenarios: 5-level, 7-level, and 9-level applying the concept of the Optimized Harmonic Stepped-Waveform (OHSW) and comparing the results between the Selective Harmonic Eliminated PWM (SHE-PWM) and the Optimal Minimization of the Total Harmonic Distortion (OMTHD) are also presented. In order to compare the results obtained with classical and nature-inspired optimization methods, three techniques are used to solve transcendental nonlinear equations for the problem of THD minimization: Newton Raphson (NR), GA, and PSO, which have been widely used for the problems of THD minimization in multilevel inverters.

Taxonomy

Swarm Intelligence Algorithm, Genetic Algorithm, Circuit System Application, Algorithms

Keywords

Cascade Multilevel Inverter; THD, Genetic algorithm; Newton-Raphson; Optimization; Particle swarm optimization algorithm, SHE, OMTHD.

Research Data

There are no linked research data sets for this submission. The following reason is given:

The authors do not have permission to share data

Additional Information

View

References

View