

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Estudio de Técnicas de Optimización para la Minimización de THD
en Inversores Multinivel**

presentada por

Ing. Angélica González Coronel

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

Director de tesis
Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Codirector de tesis
Dr. Mario Ponce Silva

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cuernavaca, Mor., 28 de enero de 2016

OFICIO No. DIE/026/2016

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

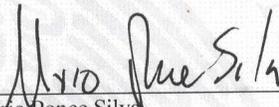
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. Angélica González Coronel** con número de control **M13CE072** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Estudio de Técnicas de Optimización para la Minimización de THD en Inversores Multinivel**" 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



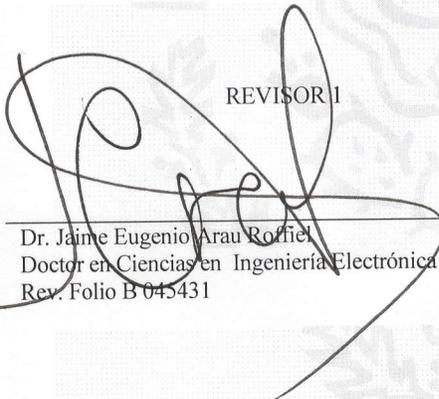
Dr. Jesús Aguayo Alcázar
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

CODIRECTOR DE TESIS



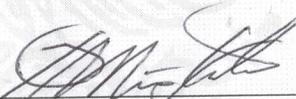
Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

REVISOR 1



Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Rev. Folio B 045431

REVISOR 2



Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 6094069

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

CMAZ/lrr

Cuernavaca, Mor., 2 de febrero de 2016
OFICIO No. SAC/085/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

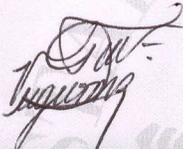
ING. ANGÉLICA GONZÁLEZ CORONEL
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Estudio de Técnicas de Optimización para la Minimización de THD en Inversores Multinivel”**, 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

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”



DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Jesús Aguayo Alquicira y a mi co-asesor el Dr. Mario Ponce Silva, por el tiempo, paciencia y conocimiento invertido durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

A mis revisores de tesis el Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel y el Dr. Jesús Darío Mina Antonio, por sus valiosos consejos, apoyo y orientación.

A la Lic. Lorena Ruiz Ramírez y a la Lic. Ana María Pérez Martínez, 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.

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.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la comparación de técnicas de optimización metaheurísticas para determinar los ángulos de conmutación para la reducción de armónicos de un inversor multinivel en cascada. A su vez extender los métodos de modulación para el caso de múltiples niveles del inversor, asociado a la complejidad adicional al tener más dispositivos electrónicos para su control y la posibilidad de aprovechar los grados de libertad que proporciona las conmutaciones adicionales.

La optimización en el inversor se realiza a través del enfoque correspondiente a la reducción de armónicas de bajo orden mientras que para indicar la utilidad y eficacia de las técnicas empleadas, se elige la THD y WTHD como factor de calidad ya que son parámetros útiles como índice de rendimiento.

Los conjuntos de ángulos obtenidos se probaron en los inversores multinivel simulados en la plataforma *SIMULINK*, lo cual permitió evaluar los pros y contras del uso de estas técnicas en el cálculo y reducción de la amplitud de armónicas.

Se logra superar limitantes de las técnicas tradicionalmente empleadas, tales como el número de variables a calcular, mientras que se elimina un mayor número de armónicas.

Abstract

The objective of this work is the comparison of metaheuristic optimization techniques to determine the switching patterns for harmonic reduction of a cascade multilevel inverter. Also, to extend the modulation methods in case of multiple level, associated with higher complexity due to the need of a higher number of electronic devices for its control and the possibility to use the degrees of freedom that come with the extra commutations.

The optimization on the inverter is performed focusing on low order harmonic reduction. To indicate the utility and efficacy of the employed techniques, THD and WTHD are used as quality factors, due to their usefulness as performance indexes.

The resulting angles solution sets were tested on multilevel inverters simulated on the *SIMULINK* platform, enabling the evaluation of the pros and cons of applying this techniques to calculate and reduce the amplitude of harmonics.

Limitations of traditional techniques are overcome, such as the number of variables to calculate, while reducing a higher number of harmonics.

Índice

Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	viii
Simbología	ix
CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Inversor Multinivel en Cascada	2
1.1.2. Técnica de Modulación	4
1.1.3. Distorsión Armónica	7
1.1.4. Normatividad	8
1.2. Estado del Arte	10
1.3. Planteamiento del Problema	10
1.4. Propuesta de Solución	12
1.5. Objetivos	12
1.5.1. Objetivo General	12
1.5.2. Objetivos Específicos	13
CAPÍTULO 2. Técnicas de Optimización	15
2.1. Bases Biológicas	16
2.2. Algoritmo Genético	16
2.2.1. Operadores Genéticos	16
2.3. Optimización por Enjambre de Partículas	19
2.3.1. Ecuaciones de Movimiento	20
CAPÍTULO 3. Optimización del CMLI	23
3.1. Cálculo de los Ángulos de Conmutación	27
3.1.1. Desarrollo del Algoritmo Genético	27
3.1.2. Desarrollo del Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas	30
CAPÍTULO 4. Presentación de Resultados	35
4.1. Simulación de los Inversores	36
4.2. Inversor Multinivel en Cascada de Cinco Niveles	36
4.3. Inversor Multinivel en Cascada de Siete Niveles	41
4.4. Inversor Multinivel en Cascada de Siete Niveles Multiángulos	47

4.6. Análisis de Resultados	50
CAPÍTULO 5. Conclusiones y Trabajos Futuros	53
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO A.....	61
ANEXO B.....	65

Lista de Figuras

Figura 1.1. Inversor multinivel en cascada, monofásico.....	3
Figura 1.2. Clasificación de las estrategias de modulación.	4
Figura 1.3. Forma de onda de salida generalizada para el inversor multinivel.....	6
Figura 2.1. Operaciones básicas del algoritmo genético.....	17
Figura 2.2. Usos de operadores genéticos.	18
Figura 2.3. Diagrama de flujo para el algoritmo genético.....	19
Figura 2.4. Influencia sobre la partícula.	20
Figura 2.5. Diagrama de flujo para el algoritmo de optimización por enjambre de partículas.....	22
Figura 3.1. Forma de onda de salida escalonada para el inversor multinivel, bajo el esquema tradicional SHE.	23
Figura 3.2. Forma de onda de salida con multiples conmutaciones por nivel.....	25
Figura 3.3. Archivos .m correspondientes con el CMLI de cinco niveles.....	27
Figura 3.4. Localización de la herramienta de optimización MATLAB.	28
Figura 3.5. Herramienta de optimización, interfaz.	28
Figura 3.6. Uso de la herramienta para la obtención del conjunto solución óptimo.	29
Figura 3.7. Adaptación media y mejor adaptación de un GA simple.	30
Figura 3.8. Inicialiación del algoritmo PSO.	31
Figura 3.9. Mejores soluciones de la población.....	31
Figura 3.10. Proceso iterativo.....	32
Figura 3.11. Adaptación media y mejor adaptación de un PSO simple.	33
Figura 3.12. Resultados obtenidos por el algoritmo PSO para el CMLI de cinco niveles	34
Figura 4.1. Modelo en SIMULINK del inversor de cinco niveles.	37
Figura 4.2. Diagrama esquemático del CMLI de cinco niveles.	37
Figura 4.3. Señal de tensión a la salida del CMLI de cinco niveles,.....	38
Figura 4.4. Niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para cinco niveles	38
Figura 4.5. Espectro de frecuencia correspondientes a CMLI de cinco niveles minimizando THD.	39
Figura 4.6. Conjunto de soluciones para THD empleando GA para dos ángulos.....	39
Figura 4.7. Conjunto de soluciones para THD empleando PSO para dos ángulos.	39
Figura 4.8. Comparativa entre niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para cinco niveles.....	40
Figura 4.9. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de cinco niveles minimizando WTHD.....	40

Figura 4.10. Conjunto de soluciones para WTHD empleando GA para dos ángulos.....	41
Figura 4.11. Conjunto de soluciones para WTHD empleando PSO para dos ángulos.	41
Figura 4.12. Modelo en SIMULINK del inversor de siete niveles.	42
Figura 4.13. Diagrama esquemático del CMLI de siete niveles.....	42
Figura 4.14. Señal de tensión a la salida del CMLI de siete niveles.	43
Figura 4.15. Niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles	43
Figura 4.16. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles minimizando THD	44
Figura 4.17. Conjunto de soluciones para THD empleando GA para tres ángulos.	44
Figura 4.18. Conjunto de soluciones para THD empleando PSO para tres ángulos.....	45
Figura 4.19. Comparativa entre niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles.....	45
Figura 4.20. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles minimizando WTHD.....	46
Figura 4.21. Conjunto de soluciones para WTHD empleando GA para tres ángulos	46
Figura 4.22. Conjunto de soluciones para WTHD empleando PSO para tres ángulos.....	46
Figura 4.23. Modelo en SIMULINK del inverso de siete niveles multiángulos.	47
Figura 4.24. Señal de tensión a la salida del CMLI de siete niveles multiángulos.....	47
Figura 4.25. Niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles multiángulos	48
Figura 4.26. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles multiángulos minimizando THD.....	48
Figura 4.27. Comparativa entre niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles multiángulos	49
Figura 4.28. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles multiángulos minimizando WTHD	49
Figura 4.29. Comparación entre número de variables y ejecuciones requeridas..	50
Figura 4.30. Técnicas tradicionales.....	51
Figura 4.31. Técnicas heurísticas para conmutación simple.	51
Figura 4.32. Técnicas heurísticas para conmutación múltiple.....	51
Figura A.1. Sub-bloque de modulación del CMLI de cinco niveles	61
Figura A.2. Sub-bloque de modulación del CMLI de siete niveles.....	62
Figura A.3. Pulsos de conmutación para el CMLI de siete niveles.....	63
Figura A.4. Pulsos de conmutación para el CMLI de siete niveles multiángulos	63
Figura A.5. Sub-bloque de modulación del CMLI de siete niveles multiángulos.....	64

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Límites de distorsión de voltaje según el estándar IEEE-519.....	9
Tabla 1.2. Niveles máximos permisibles según la norma IEC-61000.....	9
Tabla 4.1. Parámetros de configuración.....	45
Tabla 4.2. Parámetros de control propios de algoritmo.....	45
Tabla 4.3. Comparativa entre las técnicas de optimización empleadas para los CMLI de 5 y 7 niveles.....	60
Tabla 4.4. Comparativa entre diferentes técnicas para el CMLI de siete niveles.....	62

Simbología

Lista de Acrónimos

CMLI	Inversor multinivel en cascada
DSEP	Dispositivo semiconductor de potencia
GA	Algoritmo genético
PSO	Optimización por enjambre de partículas
SHE	Eliminación selectiva de armónicos
THD	Distorsión armónica total
WTHD	Distorsión armónica total ponderada

Nomenclatura

c_1	Constante de confianza cognitiva
c_2	Constante de confianza social
P_c	Probabilidad de cruce
P_m	Probabilidad de mutación
w	Inercia

Los inversores multinivel son una tecnología emergente que ha surgido como alternativa a los convertidores tradicionales de dos niveles. Estos sistemas permiten convertir la energía eléctrica proporcionada por fuentes de corriente directa, tales como baterías o bancos de paneles solares, en una tensión alterna idealmente sinusoidal, cuyos parámetros (amplitud, frecuencia) pueden ser fijos o variables. El concepto general involucra un alto número de conmutadores basados en semiconductores de potencia que desarrollan la conversión en pequeños pasos, logrando una forma de onda de salida con bajo contenido armónico [1].

En este capítulo se realiza una introducción general de los inversores multinivel, también se presentan los antecedentes del problema a abordar, junto con una revisión bibliográfica de los trabajos relacionados y los objetivos planteados.

Introducción

Hoy en día numerosas aplicaciones industriales han comenzado a exigir equipos de mayor potencia, en aplicaciones donde se requiera media tensión y niveles altos de potencia. Como resultado a estas exigencias los inversores alimentados en tensión han surgido como una buena opción debido a la capacidad de operación en alta tensión y su alta eficiencia [2], [3].

Un inversor es un sistema electrónico de potencia cuya función principal consiste en generar una tensión alterna de salida controlada a partir de una tensión de entrada de corriente continua.

En el caso de los inversores multinivel, estos presentan grandes ventajas en comparación con las topologías convencionales [2], [4], ventajas que se centran fundamentalmente en la mejora de la calidad de la señal de salida y un aumento de potencia nominal.

De manera general, la forma de onda de salida puede tener más niveles conforme aumenta el número de fuentes de entrada, y así mismo se puede producir una salida escalonada que se aproxime a la onda deseada (*sinusoidal*), de ahí el bajo contenido armónico que presentan a la salida y las mínimas pérdidas por conmutación que se pueden conseguir.

Entre las principales ventajas que esta topología ofrece se tienen menor dV/dt por conmutación, reducción de estrés en los dispositivos semiconductores de potencia (DSEP), mejora de la rapidez en la respuesta dinámica del inversor, mayor calidad de la señal de salida y la disminución de la distorsión armónica total (*THD, por sus siglas en inglés*) [3], aumento considerable en la potencia, menores pérdidas de conmutación, entre otras [5]-[10], haciéndolos atractivos para la industria.

Por lo tanto, diversos son los esfuerzos que se tienen para mejorar aspectos de los inversores multinivel, tales como la simplificación de control [11], [12] y el desempeño de diferentes algoritmos de optimización para mejorar las señales de salida [13], [14], entre otras características. Centrándose en la eliminación de armónicos utilizando funciones de conmutación pre-calculadas [15], mitigación de armónicas para cumplir códigos específicos de la red [16], el desarrollo de nuevas topologías (híbridos) [17], y nuevas estrategias de control [18], [19].

1.1. Antecedentes

En su forma más general, un inversor está constituido por al menos dos interruptores electrónicos que de acuerdo a una secuencia de encendido y apagado, pueden suministrar a la carga conectada una tensión alterna simétrica a partir de una tensión directa. A este tipo de convertidores es común nombrarlos como inversores de tres niveles ya que la señal alterna contiene igual número de niveles de tensión.

Una de las topologías que ha emergido que permite un mayor manejo de potencia es la de los inversores multinivel [3] cuya función es sintetizar varios niveles de tensión continua en una sola señal, obteniendo así una tensión alterna (sinusoidal).

Durante los últimos años se han reportado diversas variantes y configuraciones de las topologías de los inversores multinivel, para satisfacer requerimientos de alguna aplicación en particular o mejorar la operación del mismo.

Los inversores multinivel pueden clasificarse en tres grupos:

- Inversores en cascada CMLI (Cascaded Multilevel Inverter).
- Inversor con diodos de enclavamiento DCMLI (Diode Clamped Multilevel Inverter).
- Inversor con condensadores flotantes FCMLI (Flying Capacitor Multinlevel Inverter).

En [20] se detallan las ventajas y desventajas de las topologías de los inversores multinivel, en donde se establece que la topología con mayores ventajas es la CMLI, siendo la topología de interés para el desarrollo de este trabajo de tesis y la cual se describe a continuación.

1.1.1. Inversor Multinivel en Cascada

Su configuración está basada en la conexión en cascada de inversores puente completo (puentes H), los cuales son alimentados por fuentes de CD independientes entre sí como se presenta en la Figura 1.1. La onda de salida se obtiene mediante patrones de activación en los DSEP, conmutados por una técnica de modulación, de tal manera que la tensión de salida

corresponde a la suma (o también a la diferencia) de las fuentes de CD de cada uno de los puentes H.

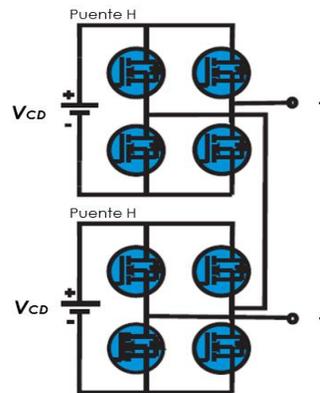


Figura 1.1. Inversor multinivel en cascada, monofásico.

Una característica que vale la pena mencionar es que debido a su estructura, se puede aumentar fácilmente el número de niveles agregando puentes en cascada, sin tener que rediseñar la etapa de potencia [21].

Las ventajas y desventajas de los CMLI son las siguientes:

Ventajas

- Evita el uso de condensadores para la alimentación de CD al igual que el uso de diodos, por lo que se evita problemas de desbalance de las tensiones.
- El voltaje de salida obtenido presenta un contenido armónico menor que los inversores puente completo individuales, por lo que al aumentar los niveles la distorsión disminuye.
- La tensión de salida se incrementa conforme aumenta el número de puentes, sin afectar la tensión que soportan los DSEP.

Desventajas

- La cantidad de fuentes de CD aisladas aumenta proporcionalmente con los puentes que integran el inversor.
- Cuando se implementa un inversor de más de siete niveles, la complejidad de control tiende a aumentar.

Los inversores multinivel en cascada pueden clasificarse en simétrico y asimétricos, esto de acuerdo al nivel de voltaje en la alimentación de cada puente.

En la configuración simétrica los niveles de alimentación son de la misma magnitud, tal y como se muestra en la figura anterior, cada inversor proporciona tres niveles de tensión correspondientes con $+V_{CD}$, 0 y $-V_{CD}$, por lo que el número de niveles n generados a la salida depende del número de puentes z , y están dados por la siguiente ecuación.

$$n = 2z + 1 \quad (1.1)$$

Mientras que en los inversores con configuración asimétrica sus niveles de alimentación son diferentes, de acuerdo a la relación que guarden entre sí las fuentes de CD para cada puente.

En primera instancia la señal que será obtenida por el inversor es alterna no sinusoidal y normalmente con alto contenido armónico, para su reducción, generalmente se utilizan filtros pasivos a la salida del inversor y esquemas de modulación de las señales de encendido y apagado de los interruptores electrónicos.

Si bien la implementación de filtros pasivos pareciera sencillo, éste presenta limitaciones debido a que para obtener un bajo contenido armónico, se requiere de filtros sumamente grandes, pesados y costosos. Como una alternativa al problema anterior se desarrollaron técnicas de modulación, por medio de las cuales se logra tener control sobre la amplitud de la señal de salida del inversor.

1.1.2. Técnica de Modulación

Las técnicas de modulación son muy importantes para definir el desempeño de los inversores, estas técnicas utilizadas en las topologías multinivel se pueden clasificar de acuerdo a [22]. La Figura 1.2., muestra un esquema de la clasificación de las técnicas de modulación para los inversores multinivel.

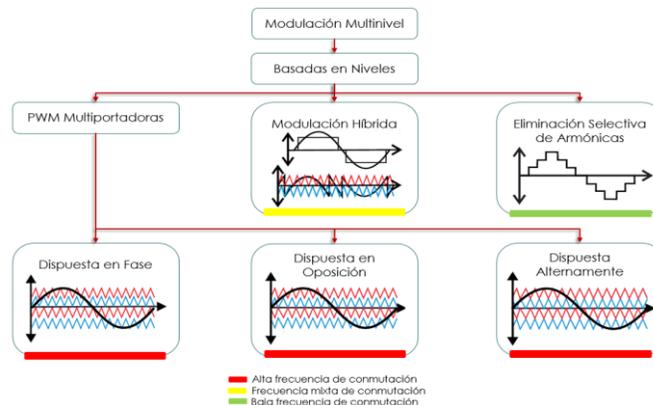


Figura 1.2. Clasificación de las estrategias de modulación.

Estas técnicas son básicamente una extensión o modificación de estrategias PWM empleadas en inversores convencionales [23], [24].

En [25] se describen las ventajas de la técnica de eliminación selectiva de armónicos (SHE, por sus siglas en inglés) contra otras modulaciones comúnmente empleadas, mientras en [26] se expone su fácil aplicación debido al uso de dispositivos digitales programables. Cualidades que la hacen de sumo interés para su uso en el inversor multinivel, por lo cual se describe a continuación.

La eliminación selectiva de armónicos ofrece la posibilidad de mejora de la calidad de forma de onda en comparación con otras técnicas existentes, siendo una estrategia de modulación que pertenece a la clasificación de técnicas de frecuencia fundamental.

En general este método se basa en eliminar las armónicas de baja frecuencia más significativas, y que son las que más afectan a la carga, seleccionando de forma adecuada los ángulos de conmutación de los dispositivos semiconductores.

Con frecuencia se le designa como modulación programada, debido a que es necesario un dispositivo que genere las señales de control, el cual requiere previamente la programación de los ángulos de conmutación. Por otra parte las componentes armónicas de alta frecuencia se suelen eliminar utilizando filtros.

Para generar esta modulación se necesita de un determinado conjunto de ángulos de conmutación que se determinan utilizando métodos numéricos y computacionales. Para emplear esta estrategia se aplica el principio de simetría de cuarto onda, el cual consiste en:

1. Calcular con anticipación ciertos ángulos para generar el primer cuarto (90 grados) de ciclo de la onda de salida.
2. El segundo cuarto de la onda es el espejo del primer cuarto de onda generado y la parte negativa es el espejo de la onda positiva generada.
3. Los ángulos serán determinados a partir del análisis de la señal de salida por medio de la expansión de las series de Fourier [27].
4. El número de ángulos a ser disparados dependerá del número de niveles requeridos y está dado por la siguiente ecuación.

$$m = \frac{l - 1}{2} \quad (1.2)$$

donde:

l = número de niveles requeridos

m = número de ángulos

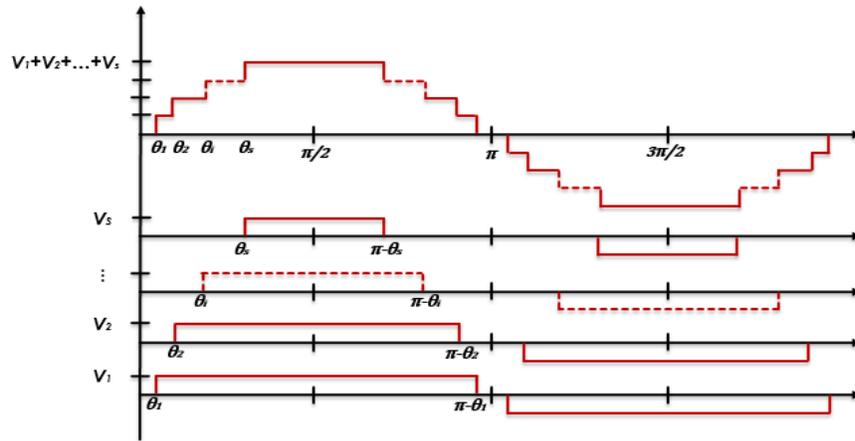


Figura 1.3. Forma de onda de salida generalizada para el inversor multinivel.

La expansión de la serie de Fourier para la tensión de salida permite expresar la n -ésima armónica a_n en función de los ángulos del primer cuarto de onda como:

$$a_n = \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{4V_{CD}}{n\pi} (\cos(n\theta_1) \pm \cos(n\theta_2) \pm \dots \pm \cos(n\theta_s)) = M \quad (1.3)$$

La expresión de la tensión fundamental, es decir, con $n = 1$ dada por:

$$\frac{4V_{CD}}{\pi} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2 + \dots + \cos \theta_s) = V_1 \quad (1.4)$$

Mientras el índice de modulación se define por tanto como:

$$M = \frac{V_1 \pi}{4V_{CD}} \quad (1.5)$$

Para cualquier armónico impar n es posible expandir cualquier término de la ecuación (1.3),

Sujeto a:

$$0 \leq \theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_s \leq \frac{\pi}{2} \quad (1.6)$$

En la eliminación selectiva a_n es asignado para describir el valor de la componente armónica e igualar a cero aquellas que se desean eliminar, donde m es el número de variables correspondientes con los ángulos del primer cuarto de onda.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \sum_{n=1}^m \cos(\theta_n) = M \\
 a_5 &= \sum_{n=1}^m \cos(5\theta_n) = 0 \\
 &\vdots \\
 a_n &= \sum_{n=1}^m \cos(n\theta_n) = 0
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

Se obtiene un sistema de ecuaciones trascendentales como se muestra en la ecuación (1.7) con ángulos desconocidos que eliminan a las armónicas deseadas.

1.1.3. Distorsión Armónica

Un método de comparación en la eficacia de los procesos de modulación, es a partir de las componentes no deseadas, conforme a la distorsión armónica presente en la señal de salida del inversor.

1.1.3.1. Distorsión Armónica Total

La THD es un parámetro que se utiliza para la cantidad de componentes armónicas presentes una onda distorsionada con respecto a la componente fundamental de esta misma señal.

Para el caso de los inversores (y en general para los sistemas eléctricos) la forma de la señal deseada es una señal sinusoidal simétrica. Las armónicas producen ciertos problemas en diferentes aplicaciones, por ejemplo, si la carga conectada al inversor es un motor, los devanados pueden sobrecalentarse debido a la tercera componente armónica. El inversor ideal es aquel que genera señales de salida con una THD de valor cero.

Matemáticamente la THD se define por medio de la siguiente ecuación.

$$THD(\%) = \left[\frac{1}{a_1^2} \sum_{n \neq 1}^{\infty} (a_n)^2 \right]^{1/2} \times 100 \tag{1.8}$$

donde:

a_1 = magnitud de la componente fundamental

a_n = magnitud de la componente armónica individual

Con el fin de reducir el contenido armónico se utilizan las técnicas de modulación previamente mencionadas ya que se espera desplazar las componentes armónicas a un rango de frecuencia alta, con la intención de facilitar la implementación del filtro pasa-bajas de salida.

1.1.3.1. Distorsión Armónica Total Ponderada

La distorsión armónica total ponderada (WTHD, por sus siglas en inglés) se mide de la misma manera que la THD, con la diferencia en que las amplitudes de las armónicas de la onda de salida son ponderadas inversamente con su propia frecuencia, es decir, cada armónica es dividida por su propio orden, por lo que las armónicas de mayor orden reciben menor peso y contribuyen menos en este parámetro de evaluación.

La expresión que define la WTHD se presenta en la siguiente ecuación.

$$WTHD(\%) = \left[\frac{1}{a_1^2} \sum_{n \neq 1}^{\infty} \frac{(a_n)^2}{n} \right]^{1/2} \times 100 \quad (1.9)$$

Este parámetro ofrece una mejor interpretación sobre el contenido armónico de la onda de salida, en comparación con la THD, ya que evalúa con menor peso a las armónicas de alta frecuencia.

Con la intención de satisfacer las necesidades de las diversas aplicaciones del CMLI se toma como referencia aquellos límites permisibles para las armónicas.

1.1.4. Normatividad

La importancia de eliminar armónicas radica en los efectos adversos que estas provocan tanto en la red eléctrica así como en algunos equipos que se alimentan con formas de onda distorsionadas.

El estándar IEEE 519 proporciona límites permitidos máximos de las armónicas de tensión, como se muestra en la Tabla 1.1., [28].

Tabla. 1.1. Límites de distorsión de voltaje según el estándar IEEE-519.

Tensión	Distorsión de voltaje individual (%)	Distorsión armónica total de voltaje THD (%)
< 69 kV	3.0	5.0
69.001 kV hasta 161 kV	1.5	2.5
> 161.001 kV	1.0	1.5

Por su parte la norma internacional IEC 61000-2-2 define niveles de compatibilidad para perturbaciones de baja tensión y señalización en redes de suministro eléctrico de baja tensión como sistemas monofásicos y trifásicos a 50 o 60 Hz.

Los niveles de compatibilidad están definidos empíricamente de modo que reducen el número de demanda de mala operación a un nivel aceptable. Estos niveles no son estrictamente rígidos y puede excederse en algunas condiciones excepcionales.

Los niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales son determinados en porcentaje al voltaje fundamental, como se muestra en la Tabla 1.2., [29].

Tabla. 1.2. Niveles máximos permisibles según la norma IEC-61000.

Armónicas impares no múltiplos de 3				Armónicas impares múltiplos de 3				Armónicas pares			
Orden h	BT (%)	MT (%)	AT (%)	Orden h	BT (%)	MT (%)	AT (%)	Orden h	BT (%)	MT (%)	AT (%)
5	6	6	2	3	5	2.5	1.5	2	2	1.5	1.5
7	5	5	2	9	1.5	1.5	1	4	1	1	1
11	3.5	3.5	1.5	15	0.3	0.3	0.3	6	0.5	0.5	0.5
13	3	3	1.5	21	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.2	0.2
17	2	2	1	> 21	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.2	0.2
19	1.5	1.5	1					12	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1	0.7					> 12	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1	0.7								
> 25	0.2+25/h		0.1+25/h								

Límites de emisión de corrientes armónicas se definen en la norma IEC 61000-3-2, clasificando los equipos conectados a la red en cuatro clases de manera que se logre una compatibilidad con la norma IEC 61000-2-2 conforme a los límites seguros de tensión. De acuerdo a esta clasificación se toma como referencia la norma para la clase “D”, consistente a equipo con un consumo menor a 600 W.

1.2. Planteamiento del Problema

Considerando la importación de los inversores en la industria, la investigación en torno a éstos persigue dos objetivos fundamentales:

1. Alcanzar mejores desempeños en los convertidores electrónicos (lo que se refleja en una mejor respuesta dinámica, reducción de pérdidas y una menor distorsión armónica).
2. Aumentar la cantidad de potencia que los convertidores de potencia pueden manejar.

En relación al primero de estos objetivos, de manera específica mucho interés se ha dado al problema del contenido armónico. En este sentido, se han explorado nuevas técnicas de conmutación que buscan minimizar dicho contenido armónico, sin embargo, estas técnicas traen consigo retos inherentes dada su complejidad y que deben resolverse.

Se han desarrollado algoritmos como la eliminación selectiva de armónicos, presentando ventajas considerables de aplicación contra otras estrategias de modulación, sin embargo, esta modulación presenta ciertas limitaciones puesto que se vuelve complejo su diseño e implementación para los inversores multinivel al elevar el número de niveles (por encima de cinco) [7], debido al aumento de los ángulos de conmutación y por lo tanto el número de ecuaciones que necesitan ser resueltas.

En términos generales el principal reto asociado con esta estrategia es la forma de obtener las soluciones para el sistema de ecuaciones trascendentales que involucra.

1.3. Estado del Arte

La revisión del estado del arte muestra un panorama general de los avances en el área de conocimiento relacionada con esta tesis. Los tópicos de interés se relacionan con las estrategias de modulación empleadas en el inversor multinivel en cascada, las técnicas propuestas para la reducción de armónicos y el uso de algoritmos inspirados en procesos biológicos que den solución a las ecuaciones trascendentales, cuyas incógnitas son los ángulos de disparo.

Los resultados de la revisión de la literatura se muestran a continuación.

En cuanto a la modulación del inversor en [30], el método SHE-PWM es sistemáticamente aplicado y se implementa basado en técnicas de optimización bajo el enfoque de supresión de armónicos. Las dificultades computacionales en su implementación son superadas mediante el desarrollo de un modelo del inversor. Este método es capaz de proporcionar una forma de onda de salida de muy alta calidad, sin embargo, se requiere una cantidad grande de pre-cálculos.

En cuanto a los métodos que den solución a las ecuaciones trascendentales involucradas en la reducción de armónicas, metodologías tradicionales utilizados para este tipo de problemas de optimización incluyen métodos como Newton-Raphson que es rápido y preciso, el cual se

aborda en [31]-[34], pero corre el riesgo de quedar atrapado en valores óptimos locales y problemas de divergencia debido a que requiere una selección del valor inicial de las variables.

Por otra parte, los algoritmos evolutivos, es decir, aquellos basados en alguna heurística, son exitosos en la localización de la solución óptima bajo cualquier valor inicial totalmente arbitrario, tal como se presenta en [35]-[39], sin embargo, generalmente son lentos en su convergencia y requieren un mayor tiempo de cálculo, además trabajan en función de minimizar las tensiones armónicas en lugar de eliminarlas.

Una dificultad con este enfoque es que a medida que el número de niveles aumenta, el orden de los polinomios se vuelve muy alta, con lo que los cálculos de las soluciones de estas ecuaciones polinómicas son muy complejos.

Entre las técnicas a desarrollar para la obtención de los conjuntos solución, a fin de obtener el menor porcentaje de THD, en [38] se eligió al algoritmo genético (GA) como mejor opción de optimización comparando sus resultados contra técnicas tradicionales, debido a su rápida respuesta.

A su vez, la técnica de optimización por GA es aplicada al inversor con la finalidad de determinar el conjunto solución de los ángulos para la reducción de armónicas, a partir de la premisa de superar las limitantes relacionadas con el número de variables a emplear y determinar los conjuntos disponibles para ciertos índices de modulación. Se concluye el uso del GA como una herramienta de optimización con grandes beneficios y se recomienda su empleo en múltiples aplicaciones en la electrónica de potencia.

Otra de las técnicas propuestas corresponde con el uso de algoritmos de optimización por enjambre de partículas (PSO) tal como se presenta en [40], [41]. Se exponen algunas de las complicaciones que presenta GA, como la dependencia a parámetros tales como las probabilidades de cruce y mutación, tamaño de la población y número de generaciones que son generalmente seleccionados como valores comunes en la literatura o por medio de un proceso de ensayo y error, mientras que PSO tienen la capacidad para combatir los inconvenientes anteriores.

Por otra parte, en [42] se presenta un método de modulación donde se introducen muescas adicionales en la tensión de salida del inversor, estas muescas eliminan las armónicas de bajo orden y realiza un desplazamiento del resto de armónicas a un orden superior. La técnica propuesta se basa en la optimización armónica de forma de onda escalonada (OHSW, por sus siglas en inglés), logrando una mejora en el rendimiento del inversor, la reducción de tamaño del filtro y sin incrementar las pérdidas de conmutación, el coste y complejidad del sistema.

En [43] también se propone la conmutación adicional para la reducción de armónicas de orden superior y se auxilia de la optimización por PSO logrando resultados favorables, sin embargo, la optimización del sistema se ve limitada al aumentar el número de variables a calcular.

1.4. Propuesta de Solución

La solución de la problemática consiste en extender el estudio de técnicas metaheurísticas¹ con la finalidad de reducir el contenido armónico en el inversor multinivel en cascada. Por lo que se pretende superar las limitantes de las técnicas tradicionalmente empleadas en el cálculo de los ángulos de conmutación, al mismo tiempo que se elimina un mayor número de armónicas, convirtiéndolo en un problema de optimización complejo.

A demás se plantea el análisis de la modulación SHE a partir de un esquema consistente con el aumento de conmutaciones adicionales en cada uno de los niveles del inversor, esquema reportado bajo la premisa de que una mejora en la calidad de la señal de salida, puede alcanzarse sin modificar la estructura del inversor y explotarla de una mejor manera.

Por otro lado, se pretende reducir la amplitud de las armónicas de bajo orden con el fin de simplificar el diseño del filtro LC empleado a la salida del inversor.

Con base a lo anterior, se propone el uso de dos técnicas de optimización metaheurísticas correspondientes con algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) y optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés), puesto que a diferencia de otras técnicas estas no son dependientes de valores iniciales ya que se basan en la diversificación de sus elementos para realizar una búsqueda exhaustiva en el espacio solución al ser métodos basados en procesos aleatorios, con lo que es posible determinar la mejor solución global.

La optimización se realizará a través del enfoque correspondiente a la reducción de armónicas de bajo orden mientras que para indicar la utilidad y eficacia de las técnicas empleadas, se elige la THD y WTHD como factor de calidad ya que son parámetros útiles como índice de rendimiento.

Las estructuras seleccionadas corresponden con el CMLI simétrico de cinco y siete niveles.

1.5. Objetivos

A continuación se presentan los objetivos a alcanzar con la realización de este trabajo de tesis.

1.5.1. Objetivo General

Realizar un estudio comparativo de las técnicas de algoritmo genético y optimización por enjambre de partículas aplicado en inversores multinivel en cascada simétrico para la reducción de THD.

¹ Las técnicas metaheurísticas son procedimientos de búsqueda que aun cuando no garantizan la obtención de una solución óptima del problema considerado, se basan en la aplicación de reglas relativamente sencillas para la localización de la mejor solución posible

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Estudiar y analizar las técnicas basadas en algoritmos de búsqueda para la modulación del inversor multinivel en cascada simétrico.
2. Obtener el conjunto de soluciones óptimas en inversores multinivel en cascada con fuentes simétricas empleando algoritmos de búsqueda metaheurísticos, consistentes con algoritmos genéticos y optimización por enjambre de partículas.
3. Simular y comparar dichas técnicas para determinar la más adecuada de acuerdo a la reducción de THD y WTHD en la tensión de salida del inversor.

Este capítulo presenta los fundamentos necesarios sobre los algoritmos de optimización utilizados para abordar el problema de minimización de armónicas en el CMLI.

El estudio de la literatura nos permite identificar los algoritmos que han sido desarrollados con la finalidad de explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda para encontrar un conjunto de soluciones que den respuesta al problema de optimización que se desea resolver. En concreto se presenta la optimización por algoritmos genéticos y la optimización por enjambres de partículas, algoritmos seleccionados para dar solución al sistema de ecuaciones trascendentales que resultan para la aplicación de la técnica de modulación SHE.

Técnicas de Optimización

La optimización es la selección del mejor elemento entre un conjunto de elementos posibles representados en el espacio de soluciones² (o de búsqueda), bajo ciertos criterios de evaluación aplicados a la función objetivo que cuantifica su validez como solución al problema [44].

En términos generales la optimización es el proceso de encontrar la mejor manera de utilizar los recursos, mientras que al mismo tiempo no viola ninguna de las restricciones³ que son impuestas.

Debido a la gran importancia de los problemas de optimización, se han desarrollado múltiples métodos para tratar de resolverlos. Tradicionalmente los métodos de optimización involucran herramientas basadas en derivados de técnicas clásicas de acuerdo a procedimientos iterativos, como los que se resumen en [45]-[47]. Estas son robustas y han demostrado su eficacia en el manejo de muchas clases de problemas de optimización.

Sin embargo, estas técnicas pueden encontrarse con dificultades tales como quedar atrapado en soluciones no óptimas o mínimos locales, el aumento de la complejidad computacional y no ser aplicables a ciertas clases de funciones objetivo.

Esto llevó a la necesidad de desarrollar una nueva clase de métodos de solución que pueden superar estas deficiencias [8]. Las técnicas de optimización heurística son de crecimiento rápido, siendo herramientas que pueden superar la mayor parte de las limitaciones encontradas en las técnicas basadas en derivados de técnicas tradicionales [48].

² El espacio solución o espacio de búsqueda hace referencia al conjunto de todas las posibles soluciones candidatas a un problema. En optimización se refiere al dominio de la función a ser optimizada.

³ Las restricciones establecen condiciones o limitantes para las variables.

Por tal motivo se propuso el estudio de dos de estas técnicas de optimización que toman como inspiración distintos sistemas biológicos. La idea fundamental de estos algoritmos es mantener un conjunto de individuos que representan una posible solución del problema.

2.1. Bases Biológicas

Las técnicas metaheurísticas de optimización cuentan con diversas fuentes de inspiración, emulando diversos procesos o comportamientos, generalmente proveen una mejor respuesta a problemas de alta complejidad debido a la combinación de características que permiten la adaptación de los elementos involucrados. A continuación se mencionan solo aquellas que serán abordadas en esta tesis.

2.2. Algoritmo Genético

Los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés), establecen una analogía entre el conjunto de soluciones de un problema y el conjunto de individuos de una población.

Consiste en un algoritmo matemático que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio de reproducción y supervivencia del más apto, básicamente esta técnica imita el funcionamiento de la selección natural mediante la recombinación de características de cada individuo a lo largo de una serie de generaciones [49].

Más formalmente “son algoritmos basados en la mecánica de la selección natural y de la genética, combinando la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información, aunque aleatorizado, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas” [50].

En el GA cada individuo contiene una posible solución asociada a un valor de aptitud correspondiente con la evaluación de su función objetivo, de acuerdo a este valor se le darán más o menos oportunidades de reproducción, durante cada iteración del algoritmo una generación nueva es creada manteniendo las características de los mejores individuos previamente seleccionados, mientras se descartan aquellas que menos aptas. Además, con cierta probabilidad se realizarán mutaciones, así como operaciones de selección y cruce, propias de la genética.

2.2.1. Operadores Genéticos

Para el paso de una generación a la siguiente se aplican una serie de operadores genéticos. Los más empleados son los operadores de selección, elitismo o copia, cruce y mutación.

El GA emplea un operador de reproducción y se propaga de forma adaptativa a través de operadores de cruce y mutación. Otra diferencia importante en su operación es el uso de probabilidades en sus operadores. Ninguno de los operadores genéticos funciona de manera determinista.

Se parte de un conjunto de individuos, al principio aleatorio, del cual serán elegidos los mejores a partir de su valor de función objetivo, posteriormente se determina si se aplican o no los operadores genéticos, los cuales dependen de ciertos porcentajes de probabilidad [61], de manera que en el algoritmo se generará un número aleatorio entre (0,1) y si este es menor que la tasa del operador, se procede a la realización de la operación.

Los algoritmos de selección serán los encargados de determinar que individuos sobreviven y se reproducen y cuales desaparecerán por una incorrecta adaptación al entorno. La selección de un individuo estará relacionada con su valor de aptitud, de acuerdo a la evaluación de la función objetivo, basándose en la calidad de las soluciones.

La copia es la otra estrategia reproductiva para la obtención de una nueva generación a partir de la anterior, consiste simplemente en la copia de un individuo en la nueva generación. Mientras que el elitismo es un caso particular del operador de copia y consistente en copiar siempre al mejor, o en su caso mejores individuos de una generación en la generación siguiente.

El operador de cruce p_c combina aquellas buenas características de los individuos llevando a cabo la explotación de las áreas beneficiosas detectadas por la selección, el operador de mutación p_m incluye la diversidad en la búsqueda facilitando la exploración de áreas aún no tratadas. En ambos casos los sitios de cruce y mutación son determinados al azar y sus valores dependen del tipo de problema y de la representación utilizada así como de muchos factores más [51].

Las operaciones básicas realizadas por el algoritmo genético aplicadas a una cadena de atributos de los individuos se presentan en la Figura 2.1., cada uno de estos representará una variable dentro del problema de optimización.

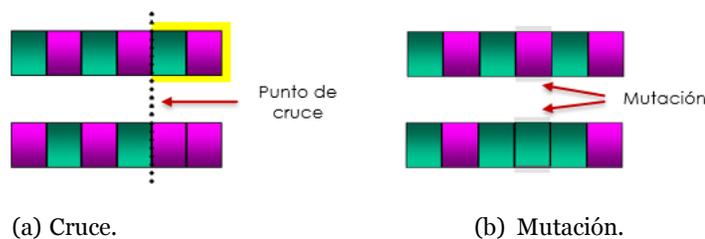


Figura 2.1. Operaciones básicas del algoritmo genético.

La Figura 2.2., ejemplifica los operadores propios de la genética y que serán empleados para modificar un conjunto de individuos que representarán la combinación de los ángulos de conmutación requeridos para la reducción de tensiones armónicas en el CMLI.

Dentro de esta población cada individuo será representado como un arreglo de los ángulos de conmutación, posteriormente evaluados en la función objetivo, permitiendo seleccionar aquellos con mejor valor de aptitud. Los mejores individuos se recombinan creando una nueva generación de descendientes insertados en la población reemplazando a aquellos con menor aptitud.

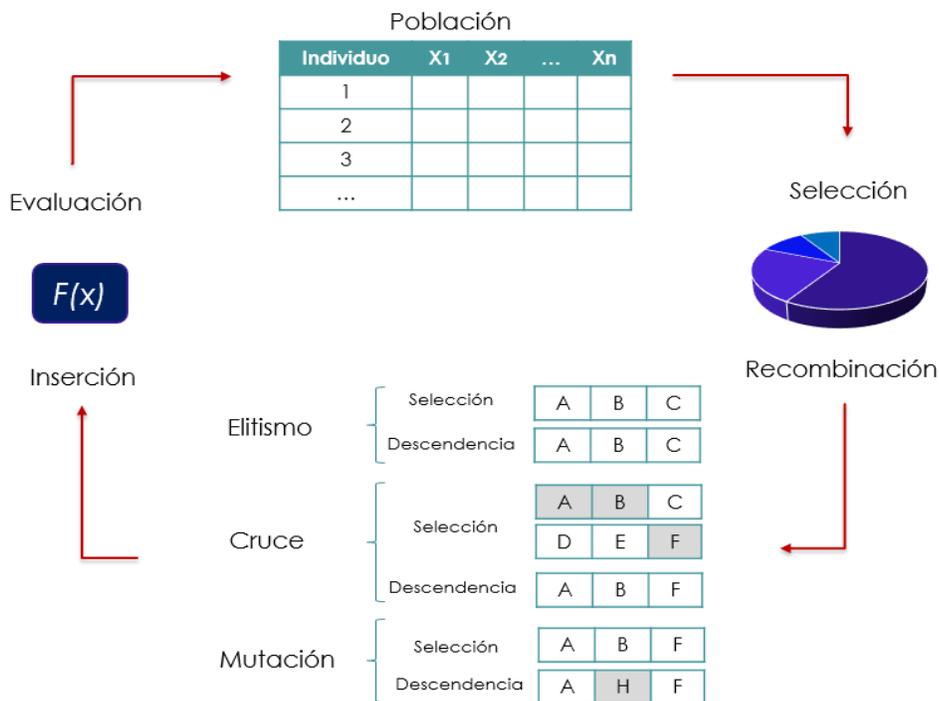


Figura 2.2. Uso de operadores genéticos.

El momento de determinar si la ejecución del algoritmo genético continúa o bien si ha de detenerse, suele comprobarse en base al número de generaciones transcurridas o en base a la aptitud del mejor individuo. También puede hacerse en base a criterios algo más complejos, como el hecho de que la mejor solución proporcionada por el algoritmo genético varíe en un porcentaje menor a uno prefijado durante determinado número de generaciones.

Al finalizar se obtiene el conjunto óptimo para los ángulos de conmutación que serán empleados.

En la Figura 2.3., se muestra el diagrama de flujo para el algoritmo genético con la secuencia de operaciones básicas que se requieren para la modificación de los individuos y crear una nueva generación mejor adaptada.

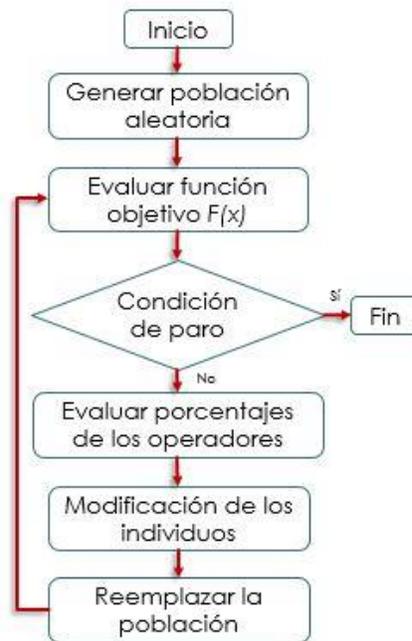


Figura 2.3. Diagrama de flujo para el algoritmo genético.

2.3. Optimización por Enjambre de Partículas

Los algoritmos de optimización basados en cúmulos de partículas (PSO, por sus siglas en inglés), están inspirados en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves, el movimiento de los bancos de peces o enjambres de abejas.

El algoritmo PSO mantiene un conjunto de soluciones, también llamadas partículas, que son inicializadas aleatoriamente en el espacio de búsqueda. Cada partícula posee una posición y velocidad que cambia conforme avanza la búsqueda.

En el movimiento de una partícula influye su velocidad y las posiciones donde la propia partícula y partículas a su alrededor encontraron buenas soluciones.

En principio PSO se basa en los desplazamientos que las partículas dispersas al azar realizan a través del espacio de búsqueda para dar con la mejor posición, cada partícula transmite como información a sus partículas vecinas la posición del mejor sitio conocido y la calidad de este sitio, es decir, un punto en el espacio de búsqueda y el valor de este punto en la función a optimizar las cuales se pueden interpretar como el mejor rendimiento global [51].

Para poder calcular el siguiente desplazamiento de la partícula en primer lugar se debe considerar que generalmente ésta se encuentra en movimiento, por lo tanto, posee cierta velocidad, además conoce su propio mejor rendimiento y el mejor rendimiento de sus informantes.

Es en cada iteración donde se agrega un cambio elegido al azar con la finalidad de añadir un aspecto realista a la simulación del comportamiento de las abejas, el cual se basa en el intercambio de información entre individuos para determinar la mejor posición en el espacio de búsqueda.

En la Figura 2.4., se ilustra cómo cada uno de los componentes de influencia se combina para dar como resultado una velocidad de partícula iterada y posteriormente una nueva posición.

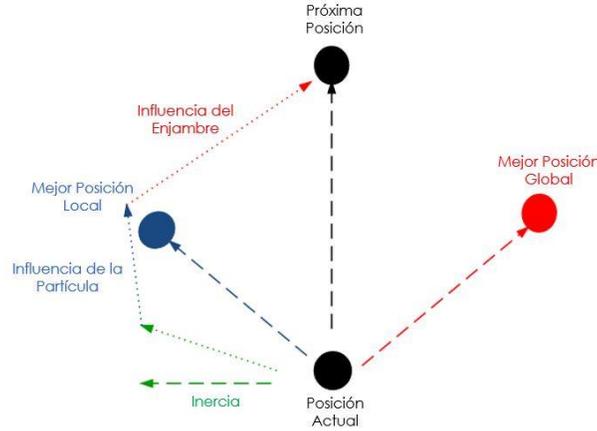


Figura 2.4. Influencia sobre la partícula.

El ajuste de la posición de las partículas es conceptualmente similar a la operación de cruce usado por los algoritmos genéticos.

2.3.1. Ecuaciones de Movimiento

Asumiendo que el espacio de búsqueda es D -dimensional, la i^a partícula del enjambre es representada por un vector $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ y la mejor posición encontrada por los informantes de la partícula es indicada por un vector $g(k)$.

La mejor posición previa correspondiente con el mejor valor de la función de la i^a partícula es grabado y presentado como $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, y el cambio de la posición o velocidad como $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$.

Las partículas son manipuladas de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$v_i(k+1) = w v_i(k) + c_1 r_{i1} v_i(p_i - x_i(k)) + c_2 r_{i2} (g_i - x_i(k)) \quad (2.4)$$

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + v_i(k + 1) \quad (2.5)$$

donde:

$i = 1, 2, \dots, N$, siendo N el tamaño de la población.

k = índice de tiempo discreto.

w = es el peso de inercia de la partícula.

c_1, c_2 = son dos constantes positivas, llamadas parámetro cognitivo y social respectivamente.

r_{i1}, r_{i2} = son números aleatorios uniformemente distribuidos entre un rango de (0,1).

La ecuación (2.4) es usada para determinar la nueva velocidad, mientras la ecuación (2.5) provee la nueva posición de la partícula, añadiendo la nueva velocidad a su posición actual. El rendimiento de cada partícula se mide de acuerdo a una función de aptitud, que es dependiente del problema a optimizar [52].

El peso de inercia w inicialmente se considera como un valor constante el cual es considerado importante para el comportamiento de convergencia en el PSO, la inercia es empleada para controlar el impacto de la velocidad anterior con respecto a la nueva, así éste parámetro regula las habilidades de exploración del enjambre entre la capacidad global y local, por lo tanto, da lugar a una mejor solución [53].

En la práctica, este coeficiente no debe ser ni demasiado pequeño, que induce una convergencia prematura, ni demasiado grande lo que por el contrario, puede ocasionar una convergencia excesiva. Algunos autores sobre PSO recomiendan algunos valores [54], [55], incluyendo los parámetros c_1, c_2 , los cuales en principio se determinan de manera intuitiva, siendo puramente experimentales.

La Figura 2.5., muestra el diagrama de flujo para el algoritmo de optimización por enjambre de partículas, en él se representa la forma en que se emplea la información de las partículas para ser desplazadas de acuerdo a sus ecuaciones de velocidad y posición.

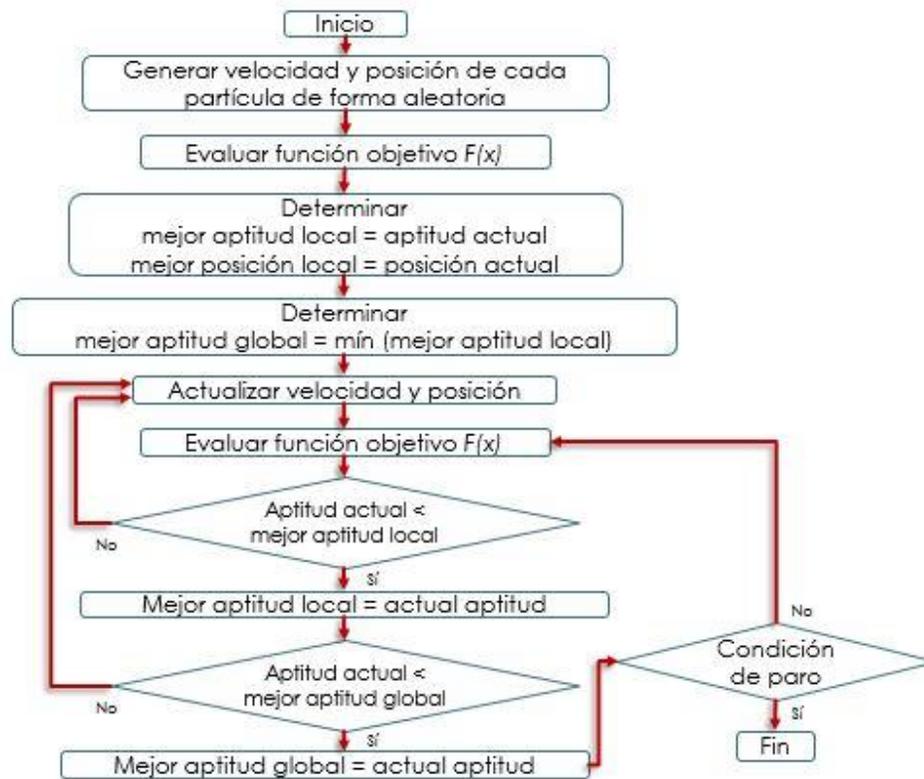


Figura 2.5. Diagrama de flujo para el algoritmo de optimización por enjambre de partículas.

En este capítulo se presenta el análisis del inversor, así como el desarrollo de los algoritmos empleados para determinar las soluciones óptimas al problema de optimización para la reducción de armónicos.

Se recurre a la herramienta de software matemático *MATLAB* con la cual es posible establecer la función objetivo del inversor multinivel, además de declarar las restricciones no lineales a las que estará sujeto el problema donde las restricciones pueden ser desigualdades o igualdades, así también permite la incorporación de los métodos de optimización previamente seleccionados.

Optimización del CMLI

Los estados de salida de la forma de onda del inversor permiten desarrollar un enfoque analítico para eliminar teóricamente cualquier número de armónicas mediante un método generalizado [1].

La forma de onda de salida generalizada del inversor multinivel se muestra en la Figura 3.1., por lo tanto, se puede expresar la expansión de la serie de Fourier en su forma general como:

$$V_{out}(\theta) = A_0 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad (3.1)$$

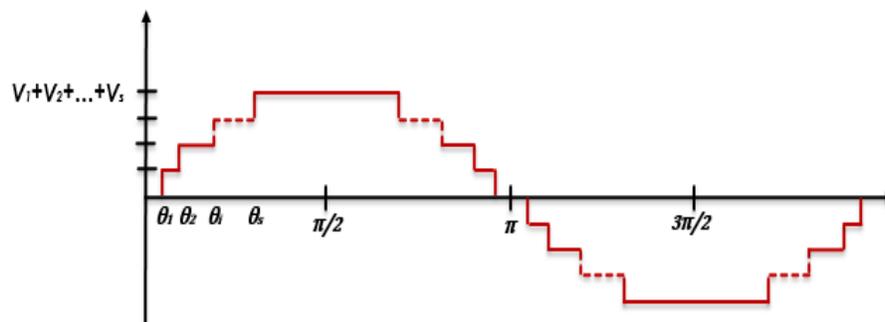


Figura 3.1. Forma de onda de salida escalonada para el inversor multinivel, bajo el esquema tradicional SHE.

La simetría de la forma de onda permite reducir la ecuación (3.1) a:

$$V_{out}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,7\dots}^{\infty} B_n \sin n\theta \quad (3.2)$$

Suponiendo que las tensiones de las fuentes de CD son de igual magnitud, y teniendo en cuenta las características de la forma de onda del inversor antes mencionadas, la expansión de la serie de Fourier de la tensión de salida escalonada se puede expresar como:

$$V_{out}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{4V_{CD}}{n\pi} (\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s)) \quad (3.3)$$

De manera tradicional el esquema de conmutación para SHE establece una relación entre el número de fuentes de CD y el número de ángulos empleados, por lo tanto, para s fuentes se tendrán s variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_s$, sujetas a las condiciones planteadas en la ecuación (1.6), y el conjunto solución es obtenido al asignar un valor específico para la componente fundamental, e igualando las $s - 1$ armónicas a cero como se indica a continuación.

$$\begin{aligned} \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(\theta_s) &= M \\ \cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \dots + \cos(3\theta_s) &= 0 \\ &\vdots \\ \cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s) &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Para el proceso de optimización se requiere una función objetivo que se selecciona como una medida de eficacia de la reducción de armónicas mientras se mantiene la componente fundamental a un valor previamente establecido, por lo tanto, las funciones seleccionadas se definen de acuerdo a las ecuaciones (1.8) y (1.9) correspondientes con las expresiones matemáticas de THD y WTHD, respectivamente, reemplazando las expresiones de las tensiones armónicas obtenidas a partir del análisis de la onda de salida del inversor.

$$THD(\theta_1, \dots, \theta_s) = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} (\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s))^2}}{\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(\theta_s)} \quad (3.5)$$

$$WTHD(\theta_1, \dots, \theta_s) = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} [(\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s))^2] / n}}{\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(\theta_s)} \quad (3.6)$$

Los ángulos de conmutación óptimos se obtienen minimizando las tensiones armónicas sujetas a su vez a la restricción $0 \leq \theta_1 \dots \leq \theta_s \leq \frac{\pi}{2}$ y en consecuencia se consigue el perfil armónico requerido.

El principal desafío es la no linealidad del conjunto de ecuaciones trascendentales (3.4), y debido a que la mayoría de técnicas iterativas sufren de problemas de convergencia, su análisis y desarrollo se ve limitado al número de variables involucradas, además de que la naturaleza de las ecuaciones sugiere la posibilidad de múltiples soluciones.

Bajo este esquema el número de conmutaciones por cuarto de ciclo se ve limitado, sin embargo, a fin de aumentar los grados de libertad y la reducción de más armónicos en comparación con el método tradicional sin tener que recurrir a un aumento de hardware, se propone el uso de conmutaciones múltiples.

Generalmente el número de conmutaciones en varios niveles puede ser diferente entre sí, o bien, por simplicidad, el número de conmutaciones se considera igual, tal como se muestra en la forma de onda de la Figura 3.2., propuesta con la finalidad de aumentar el número de armónicas que serán eliminadas.

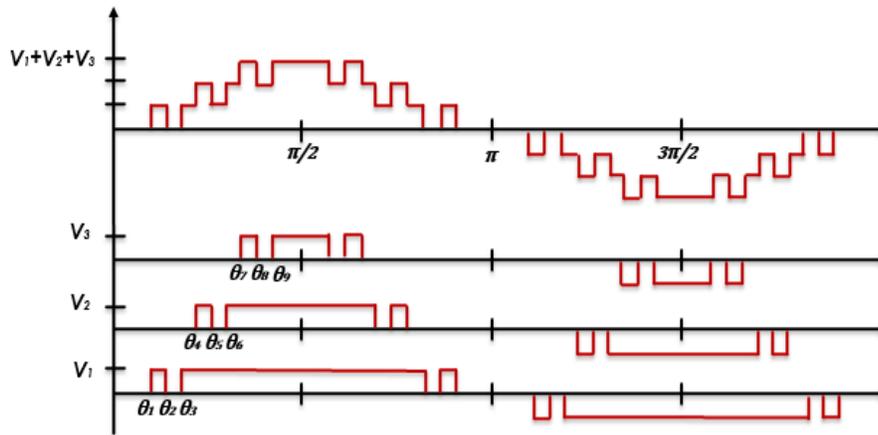


Figura 3.2. Forma de onda de salida con múltiples conmutaciones por nivel.

Se presenta la tensión de salida del inversor para tres tiempos de conmutación para cada nivel, si el número de conmutación en cada nivel se denota por k , el número de armónicos a eliminar es igual a:

$$k \times (s - 1) \quad (3.7)$$

La expansión de Fourier para la forma de onda de tensión generalizada, estará dada por:

$$V_{out}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{4V_{CD}}{n\pi} (\cos(n\theta_1) \pm \cos(n\theta_2) \pm \dots \pm \cos(n\theta_s)) \quad (3.8)$$

El análisis para la forma de onda de la Figura 3.2., permite determinar las ecuaciones que la describen, los signos positivos indican los flancos de subida de la forma de onda de la tensión y viceversa, su expresión se presenta en la siguiente ecuación.

$$V_{out}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{4V_{CD}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) - \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) + \cos(n\theta_4) - \dots \dots \cos(n\theta_5) + \cos(n\theta_6) + \cos(n\theta_7) - \cos(n\theta_8) + \cos(n\theta_9)] \quad (3.9)$$

Al igual que en el análisis tradicional, se asumen las mismas restricciones donde el objetivo es elegir la serie de ángulos $\theta_1, \dots, \theta_s$, tales que los armónicos de orden inferior especificado se supriman y al mismo tiempo la amplitud de la fundamental se iguala a un valor deseado.

El sistema de ecuaciones aumenta y por lo tanto la complejidad de cálculo también, tal como se ejemplifica a continuación:

$$\begin{aligned} & \cos(\theta_1) - \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \cos(\theta_4) - \cos(\theta_5) + \dots \\ & \cos(\theta_6) + \cos(\theta_7) - \cos(\theta_8) + \cos(\theta_9) = M \\ & \cos(3\theta_1) - \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3) + \cos(3\theta_4) - \cos(3\theta_5) + \dots \\ & \cos(3\theta_6) + \cos(3\theta_7) - \cos(3\theta_8) + \cos(3\theta_9) = 0 \\ & \vdots \\ & \cos(17\theta_1) - \cos(17\theta_2) + \cos(17\theta_3) + \cos(17\theta_4) - \cos(17\theta_5) + \dots \\ & \cos(17\theta_6) + \cos(17\theta_7) - \cos(17\theta_8) + \cos(17\theta_9) = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.1. Cálculo de los Ángulos de Conmutación

Se desarrollan los algoritmos para cada una de las técnicas de optimización que serán empleadas, así como el proceso iterativo a ejecutar de acuerdo a las bases planteadas en el capítulo anterior, así mismo, se detalla la programación enfocada a dar solución al sistema de ecuaciones trascendentales.

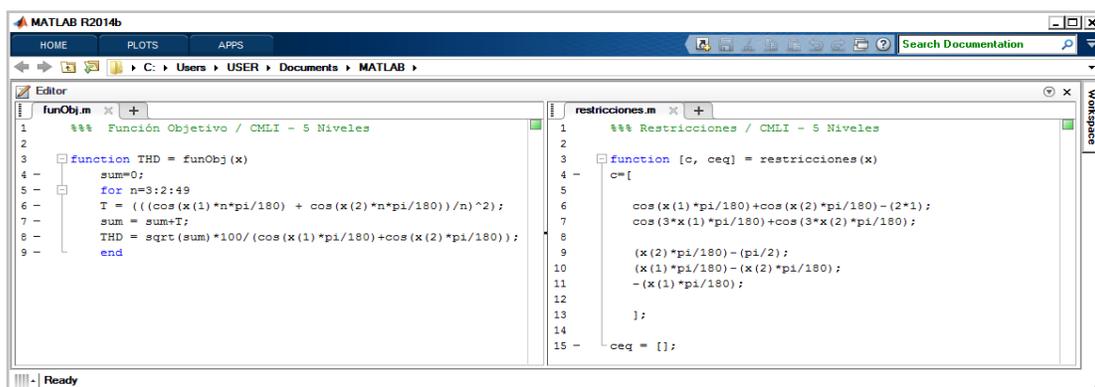
3.1.1. Desarrollo del Algoritmo Genético

El cálculo de los ángulos de conmutación, su formulación y el desarrollo de los algoritmos se realizan mediante el software matemático *MATLAB*, debido a que proporciona una caja de herramientas de optimización (OptimTool) que incluye un programa de solución basada en GA, puesto que parte del desarrollo de este trabajo de tesis se basa en el uso del código genérico del algoritmo genético.

La caja de herramientas de GA se utiliza para optimizar la búsqueda del conjunto solución, y cuya ventaja se centra en la posibilidad de trabajar con un número elevado de variables, la programación incluye un conjunto de comandos escritos principalmente como archivos .m (m-files)⁴.

La función objetivo y restricciones del problema de optimización son programadas en archivos individuales, que posteriormente serán incorporados en la herramienta de optimización. Recuérdese que GA consiste en determinar los parámetros de solución de un problema dado, mediante la optimización de funciones objetivo y restricciones de operaciones definidas para dicho problema.

Los archivos correspondientes con estas dos funciones se muestran en la Figura 3.3., se presenta como ejemplo las expresiones para el CMLI de cinco niveles.



a) Función objetivo b) Restricciones
 Figura 3.3. Archivos .m correspondientes con el CMLI de cinco niveles.

⁴ Archivo de secuencia de comandos MATLAB.

La optimización por GA se utiliza para encontrar un conjunto de parámetros de diseño que dan el mejor resultado posible, a partir de evaluar la función objetivo, sea el caso de THD o WTHD para minimizar la distorsión armónica en el CMLI.

La herramienta de optimización de *MATLAB* permite incorporar los archivos previamente programados, además de facilitar la asignación de los operadores genéticos, se accede a esta herramienta a partir de la ventana de comandos como `>> GATOOL`, o bien seleccionándola en la barra de tareas tal como se observa en la Figura 3.4.

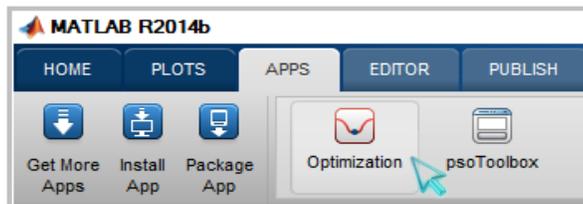


Figura 3.4. Localización de la herramienta de optimización en MATLAB.

GA utiliza una serie de parámetros para controlar la búsqueda a la solución del problema, estos parámetros de control son el tamaño de la población, la tasa de selección, las probabilidades de operador, por no hablar de la representación y los propios operadores. Parámetros que influyen fuertemente en el desempeño del algoritmo, ya que de ellos dependerá si se encontrará una solución lo suficientemente buena (eficiente) o casi óptima y que normalmente se especifican antes de ejecutar el algoritmo.

Una de las principales dificultades de la aplicación de un algoritmo basado en técnicas heurísticas para un problema dado es decidir sobre el conjunto apropiado para los valores de estos parámetros, puesto que un algoritmo se desempeña de manera diferente con diferentes problemas, por lo que un óptimo o conjunto casi óptimo de los parámetros de control para un solo GA no generaliza a todos los casos.

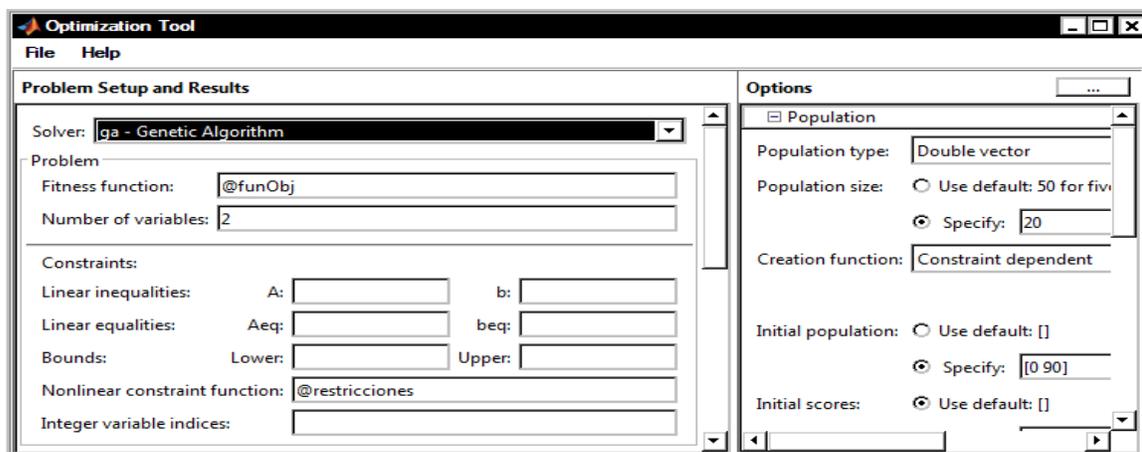


Figura 3.5. Herramienta de optimización, interfaz.

Los parámetros para el GA se configuran de acuerdo a las opciones de gestión del algoritmo en la herramienta de optimización, la cual se presenta en la Figura 3.6., y se parte de los valores propuestos por la literatura [56], [57].

Posteriormente estos parámetros de control se ajustan de acuerdo a la experiencia desarrollada y en base a la experimentación, incluyendo los criterios de parada del algoritmo, así como los valores de tolerancia para el cumplimiento de las restricciones y tolerancia de la función objetivo; correspondiente con el valor máximo permisible de la diferencia entre una aproximación a la solución y el valor anterior.

Se cargan los archivos correspondientes con el problema a tratar, una vez listos, la herramienta ejecuta el algoritmo genético y presenta la mejor solución. En la Figura 3.6, se muestra el uso de esta herramienta y se visualiza el conjunto solución obtenido tras la evaluación de aptitud de cada individuo generado y modificado conforme al esquema algorítmico.

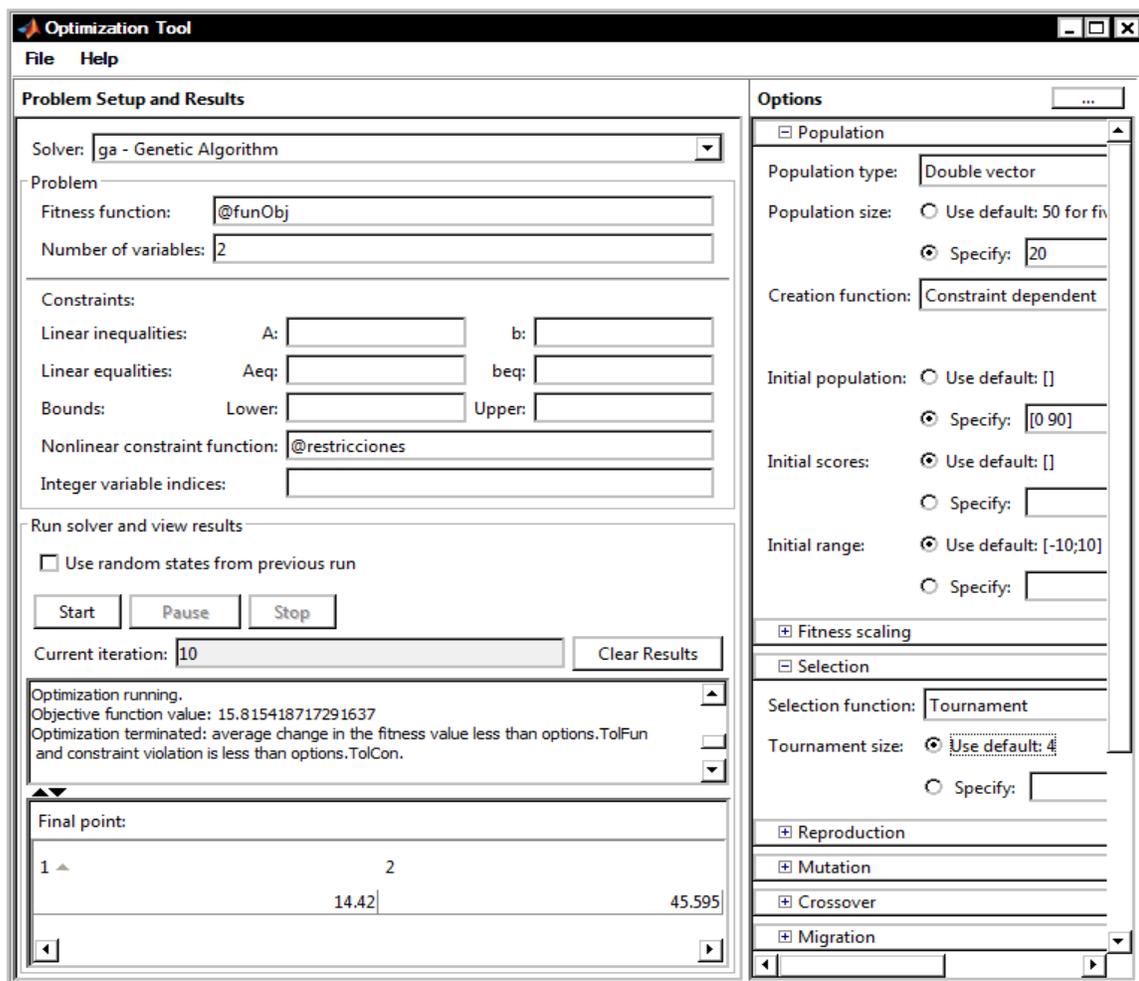


Figura 3.6. Uso de la herramienta para la obtención del conjunto solución óptimo.

La convergencia del algoritmo se relaciona con la progresión de la uniformidad de los individuos, un conjunto solución ha convergido cuando al menos un 95% de los individuos en la población comparten el mismo valor.

En la Figura 3.7., los puntos en la parte inferior denotan los mejores valores de aptitud, mientras que los puntos por encima de ellos denotan la media de cada generación. También se muestra el mejor valor promedio y el valor de la generación actual, ambos en la parte superior.

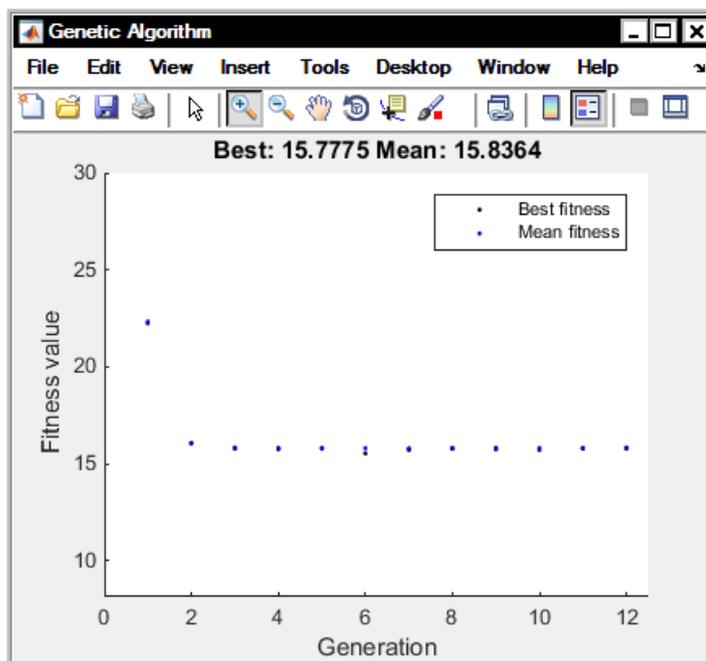


Figura 3.7. Adaptación media y mejor adaptación de un GA simple.

De acuerdo a la gráfica de la figura anterior el algoritmo converge en la generación número 12, en un algoritmo simple típico a medida que el número de generaciones aumenta, es más probable que la adaptación media se aproxime a la del mejor individuo.

3.1.2. Desarrollo del Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas

A diferencia del desarrollo del GA no se cuenta con una herramienta o programa de solución ya establecida, por lo que se desarrolla una serie de algoritmos que realicen las funciones correspondientes con el ajuste de cada partícula de acuerdo a las ecuaciones del PSO.

Se programan los algoritmos en el entorno *MATLAB* incluyendo la función objetivo y restricciones de forma análoga al GA.

```

MATLAB R2014b
C:\Users\USER\Documents\MATLAB
Editor - C:\Users\USER\Dropbox\Tesis_Maestría\Simulaciones_Inversores\Matlab\pso.m
pso.m x funObj.m x +
% --- Posición y velocidad inicial
- pos = zeros(s,n);
- for i = 1:n
-   pos(:,i) = random('unif',0,90,s,1); % posición inicial
- end
- vel = w.*rand(s,n); % velocidad inicial

% --- Evaluar posición actual
- Fitness = zeros(s,1); % inicializa vector de resultados
% para la función objetivo
- for i = 1:s
-   Fitness(i) = fun.Objetivo(pos(i,:)); % valor de la función objetivo
% para cada posición
- end
    
```

Figura 3.8. Inicialización del algoritmo PSO.

En términos generales se evalúa la función objetivo en cada ubicación de las partículas y se determina la mejor de ellas en base al valor más bajo de la función y se registra la mejor ubicación.

Las mejores posiciones son asignadas de acuerdo al valor mínimo de la población (enjambre), es decir, se determina un mejor local a partir del mejor resultado obtenido al evaluar la función objetivo y posteriormente se declara como mejor global al valor mínimo entre los mejores locales obtenidos al momento.

En la Figura 3.9., se muestran las asignaciones de velocidad y posición una vez localizados los mejores valores.

```

MATLAB R2014b
C:\Users\USER\Documents\MATLAB
Editor - C:\Users\USER\Dropbox\Tesis_Maestría\Simulaciones_Inversores\Matlab\pso.m
pso.m x funObj.m x +
% --- Declara mejor local y mejor resultado de la función objetivo
- Pbest = pos;
- P_Fitness = Fitness;

% --- Declara mejor global y mejor resultado de la función objetivo
- [G_Fitness,index] = min(P_Fitness); % declara como mejor resultado
% global al mínimo de la población
- Gbest = repmat(Pbest(index,:),s,1); % mejor solución global
% y reproduce la mejor solución
% al tamaño de la población

% --- Actualiza velocidad y posición
- R1 = rand(s,n); % vector de mejores soluciones locales
- R2 = rand(s,n); % vector de mejores soluciones globales

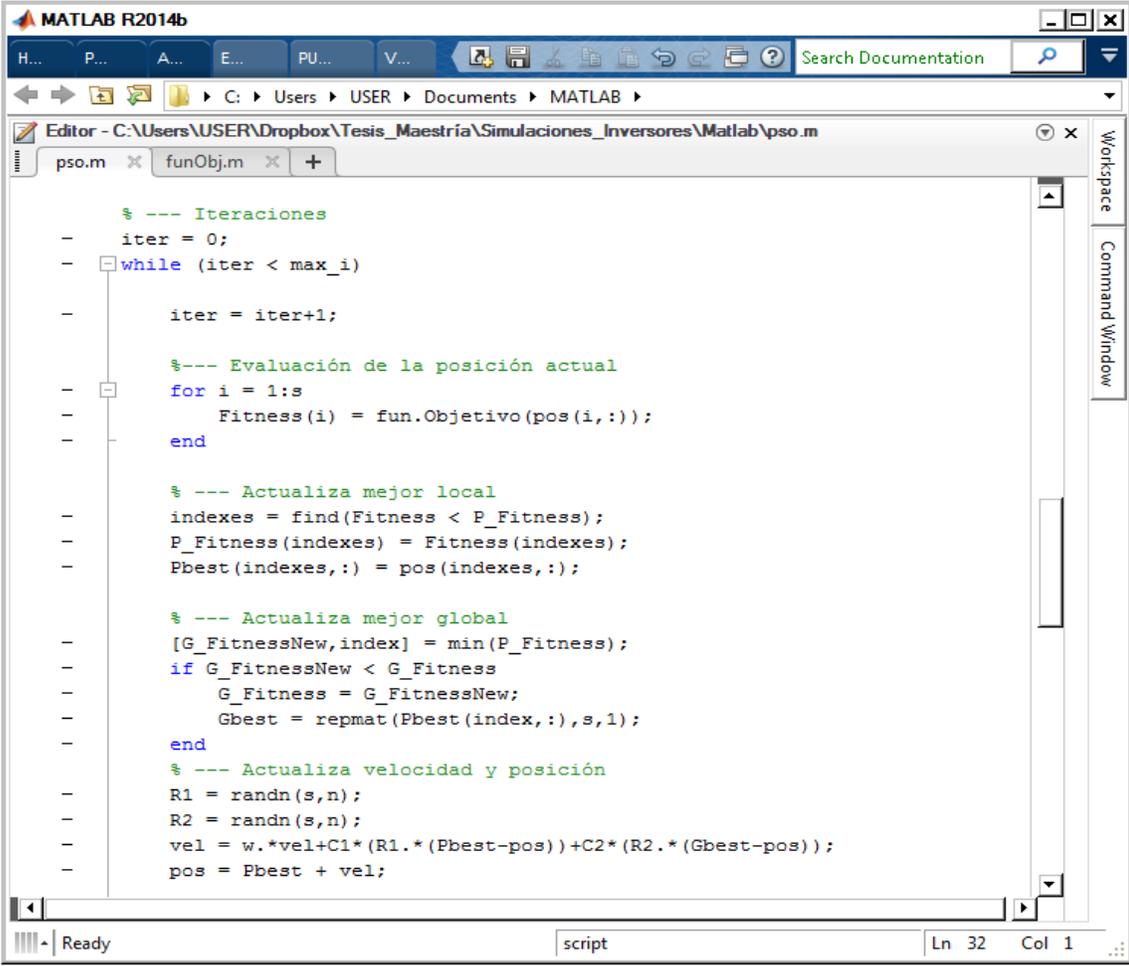
- vel = w.*vel+C1*(R1.*(Pbest-pos))+C2*(R2.*(Gbest-pos));
- pos = pos + vel;
    
```

Figura 3.9. Mejores soluciones de la población.

De forma iterativa cada nueva ubicación es actualizada como resultado de la ubicación anterior más una nueva velocidad generada a partir del uso de valores aleatorios uniformemente distribuidos y constantes de confianza como parámetro cognitivo y social propias del algoritmo.

Es en cada iteración donde se agrega un cambio elegido al azar, en este punto su funcionamiento es similar a las mutaciones en el GA, en las técnicas de optimización esta fase se denomina diversificación y consiste en la exploración del espacio solución con el fin de escapar a valores mínimos locales.

El proceso iterativo se muestra en la siguiente figura, la actualización de las mejores posiciones se realiza en esta parte del programa.



```

MATLAB R2014b
H... P... A... E... PU... V... Search Documentation
C:\Users\USER\Documents\MATLAB
Editor - C:\Users\USER\Dropbox\Tesis_Maestría\Simulaciones_Inversores\Matlab\pso.m
pso.m x funObj.m x +
Workspace
Command Window

% --- Iteraciones
- iter = 0;
- while (iter < max_i)
-
-     iter = iter+1;
-
-     %--- Evaluación de la posición actual
-     for i = 1:s
-         Fitness(i) = fun.Objetivo(pos(i,:));
-     end
-
-     % --- Actualiza mejor local
-     indexes = find(Fitness < P_Fitness);
-     P_Fitness(indexes) = Fitness(indexes);
-     Pbest(indexes,:) = pos(indexes,:);
-
-     % --- Actualiza mejor global
-     [G_FitnessNew,index] = min(P_Fitness);
-     if G_FitnessNew < G_Fitness
-         G_Fitness = G_FitnessNew;
-         Gbest = repmat(Pbest(index,:),s,1);
-     end
-
-     % --- Actualiza velocidad y posición
-     R1 = randn(s,n);
-     R2 = randn(s,n);
-     vel = w.*vel+C1*(R1.*(Pbest-pos))+C2*(R2.*(Gbest-pos));
-     pos = Pbest + vel;

```

Figura 3.10. Proceso iterativo.

La función objetivo y restricciones son incorporadas al algoritmo de PSO, de igual forma se establecen los criterios de parada y los valores de tolerancia, junto con las dimensiones del problema y el número de partículas a evaluar.

Por último se establecen los parámetros de control correspondientes con las constantes de confianza e inercia, las cuales son importantes para establecer el comportamiento de convergencia del PSO.

Al igual que en el GA se muestra en la Figura 3.11., el mejor valor promedio y el valor de la generación actual, así como la convergencia del algoritmo.

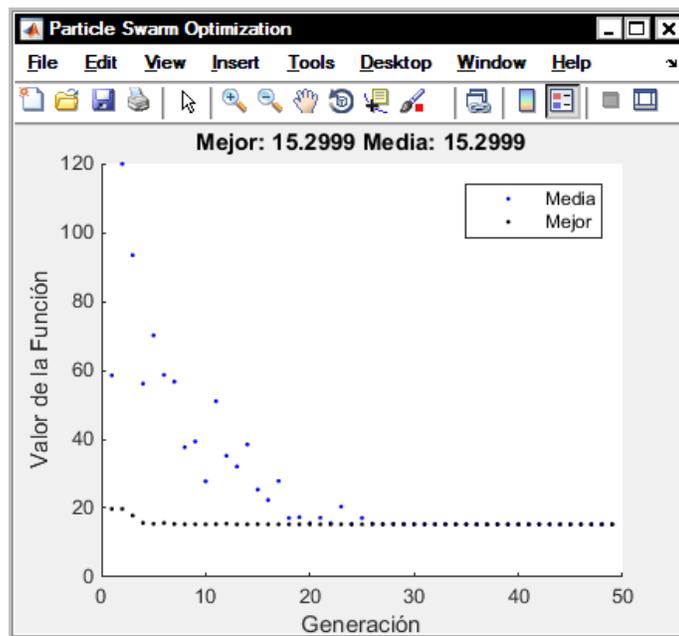


Figura 3.11. Adaptación media y mejor adaptación de un PSO simple.

Al ejecutar el programa, las partículas dispersas en el espacio solución gradualmente convergen hacia un mismo valor como se observa en la Figura 3.12., donde los puntos en color gris denotan la posición inicial, mientras que los puntos en color azul denotan las nuevas posiciones.

Para ser más exactos se presenta el progreso de las partículas por el espacio solución, partiendo de puntos totalmente al azar que posteriormente se dirigen a la mejor posición, dando lugar a la localización del valor óptimo.

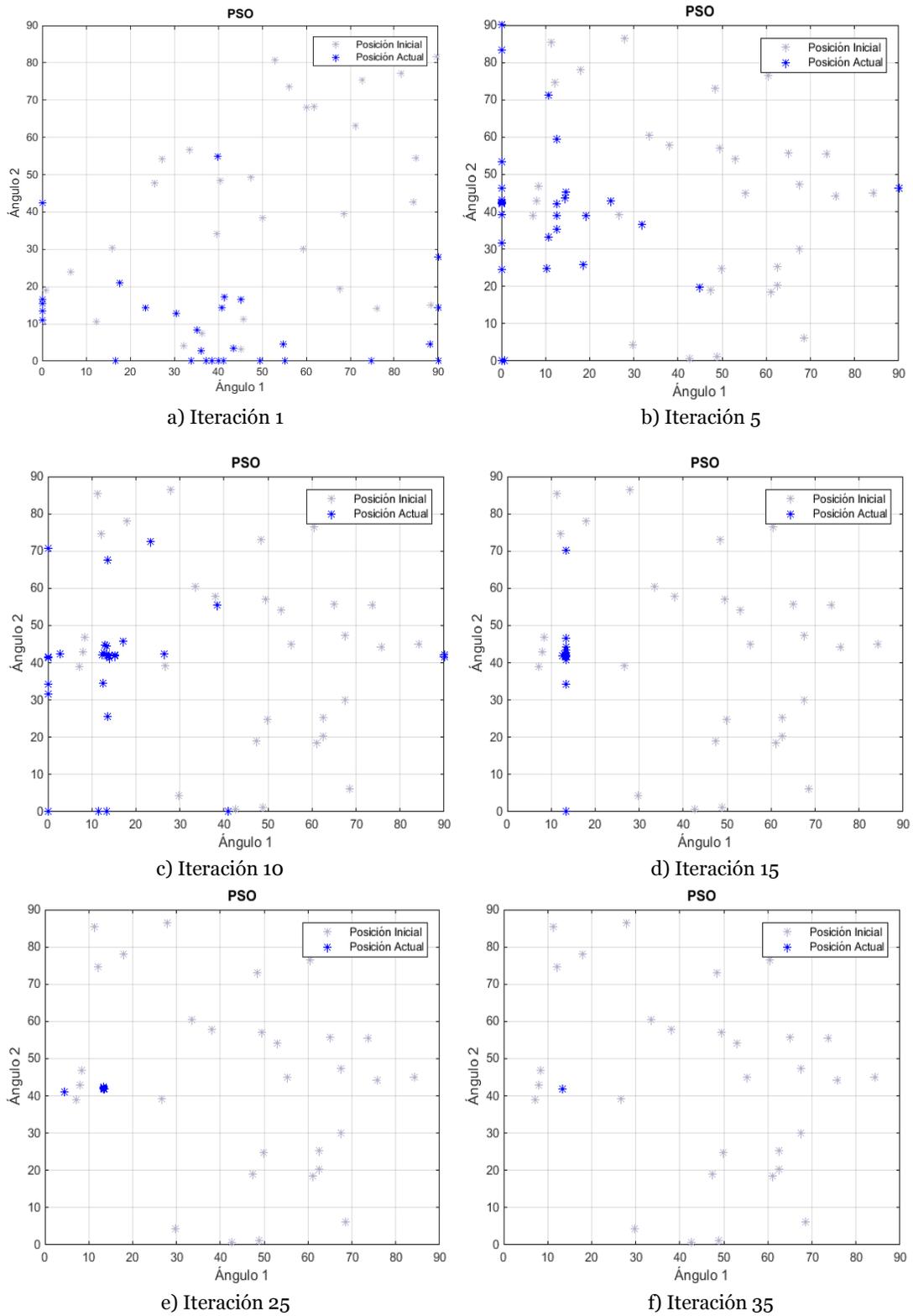


Figura 3.12. Resultado obtenido por el algoritmo PSO para el CMLI de cinco niveles.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante ambas técnicas de optimización desarrolladas, con el fin de dar solución al sistema de ecuaciones no lineales. La evaluación de los conjuntos solución se realiza en los inversores multinivel en cascada de cinco y siete niveles, los cuales se simulan en el entorno *PSIM/SIMULINK*.

El contenido armónico para cada caso de simulación es analizado y se efectúa una comparación entre las técnicas, mientras los porcentajes más importantes con respecto a la fundamental son mostrados.

En cada una de las comparativas se empleó los niveles de distorsión permisibles por las normas únicamente como una referencia que permita visualizar las amplitudes obtenidas.

Presentación de Resultados

Como parte del análisis de los conjuntos solución encontrados, estos se configuran en la simulación de los inversores, las soluciones previamente obtenidas por los algoritmos, corresponderán con los ángulos de conmutación para cada DSEP.

Los CMLI simulados corresponden con cinco y siete niveles bajo conmutación tradicional (un ángulo por nivel), y siete niveles con múltiples conmutaciones por nivel.

La estimación de los parámetros de configuración de los algoritmos se realizó con la herramienta *MATLAB*, en este proceso se realizaron corridas con poblaciones de diferentes tamaños en función de las dimensiones de cada individuo o partícula.

La población es inicializada aleatoriamente dentro de espacio de búsqueda, estableciendo como criterio de parada un máximo de evaluaciones de hasta 100 veces la dimensión del problema (número de variables), un límite de 50 iteraciones sin mejorar el resultado de la función objetivo, además se establecen ciertos valores de tolerancia para los resultados arrojados en cada evaluación.

Tabla.4.1. Parámetros de configuración.

Parámetro	Valor
Población	10*numVar
Evaluaciones	100*numVar
Iteraciones sin mejora	50
Tolerancia de la función	1e-30
Tolerancia de las restricciones	1e-15

Los parámetros de control de cada algoritmo, es decir; las constantes de confianza en el PSO, así como los porcentajes de los operadores del GA, son tomados de acuerdo a los valores recomendados en la literatura y según la experiencia desarrollada en la aplicación de los algoritmos a la solución de este problema.

Tabla.4.2. Parámetros de control propios del algoritmo.

Algoritmo	Parámetro	Valor
GA	Selección	Estocástica
	Elitismo	0.05*población
	P_c	0.8
	P_m	0.05
PSO	w	0.4 – 0.9
	C_1	0.5
	C_2	1.25

La corrida de cada técnica se ejecutó 20 veces, los resultados mostrados fueron los mejores obtenidos.

4.1. Simulación de los Inversores

La simulación de los inversores se realiza empleando el módulo *SimCoupler* que proporciona una interfaz entre *PSIM* y *MATLAB/SIMULINK* para la co-simulación del esquema propuesto.

De modo que parte del sistema puede ser implementado y simulado en *PSIM*, el cual consiste en un complemento para la simulación de sistemas electrónicos de potencia ya que permite simulaciones combinadas de circuitos eléctricos modelados con controles modelados en el entorno *SIMULINK*.

4.2. Inversor Multinivel en Cascada de Cinco Niveles

A continuación se presenta la simulación del CMLI de cinco niveles, en la Figura 4.1., se muestra el modelo en *SIMULINK* que interactuará con la etapa de potencia que se observa en la Figura 4.2., correspondiente con el circuito en *PSIM*.

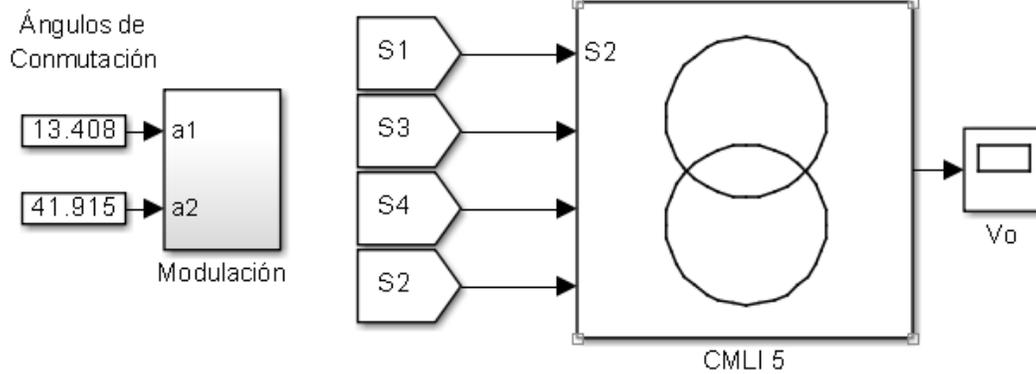


Figura 4.1. Modelo en SIMULINK del inversor de cinco niveles.

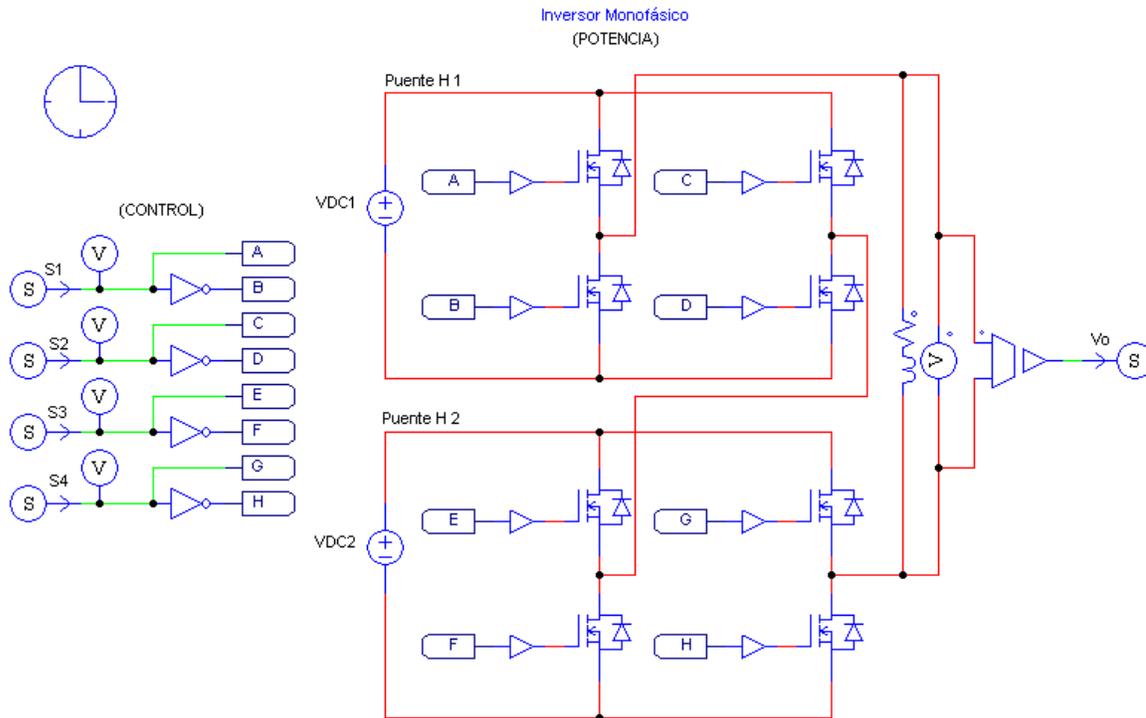


Figura 4.2. Diagrama esquemático del CMLI de cinco niveles.

Las señales de control de los interruptores se generan de acuerdo a los ángulos determinados por los algoritmos y se realiza la modulación en el sub-bloque mostrado en el modelo de control de *SIMULINK* el cual se detalla como parte de los Anexos de este trabajo.

La tensión a la salida del inversor se presenta de forma generalizada para los cinco niveles en la siguiente figura.

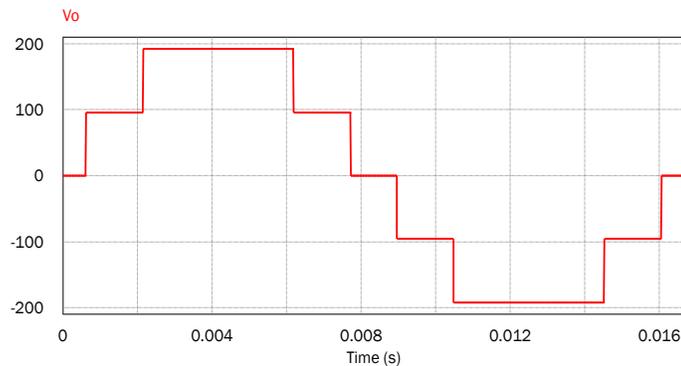


Figura 4.3. Señal de tensión a la salida del CMLI de cinco niveles.

a. Resultados CMLI 5 niveles con THD como función objetivo

Las mejores soluciones obtenidas para los ángulos de conmutación, una vez configurados en el CMLI y simulados arrojaron los siguientes valores para la amplitud de cada armónica, tal como se muestra en la Figura 4.4.

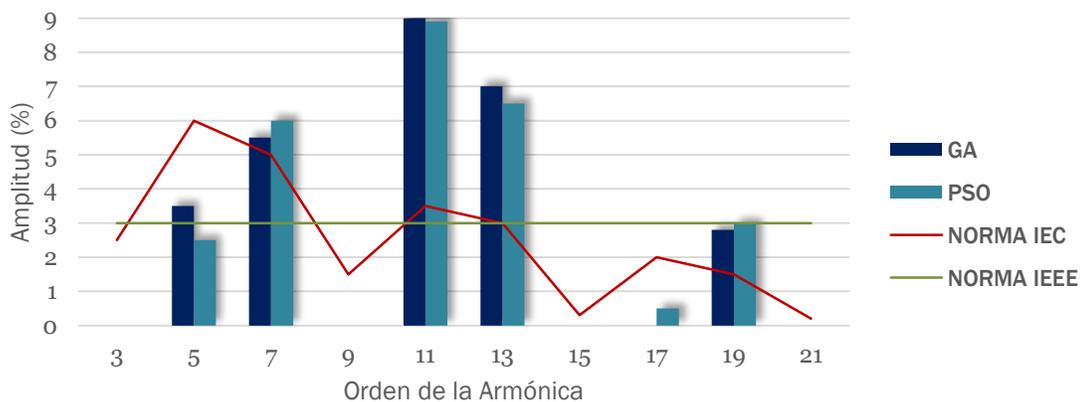


Figura 4.4. Niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para cinco niveles.

Los correspondientes espectros de frecuencia se presentan en la Figura 4.5., se observa la contaminación armónica empleando la estrategia “SHE”, reduciendo armónicas de bajo orden.

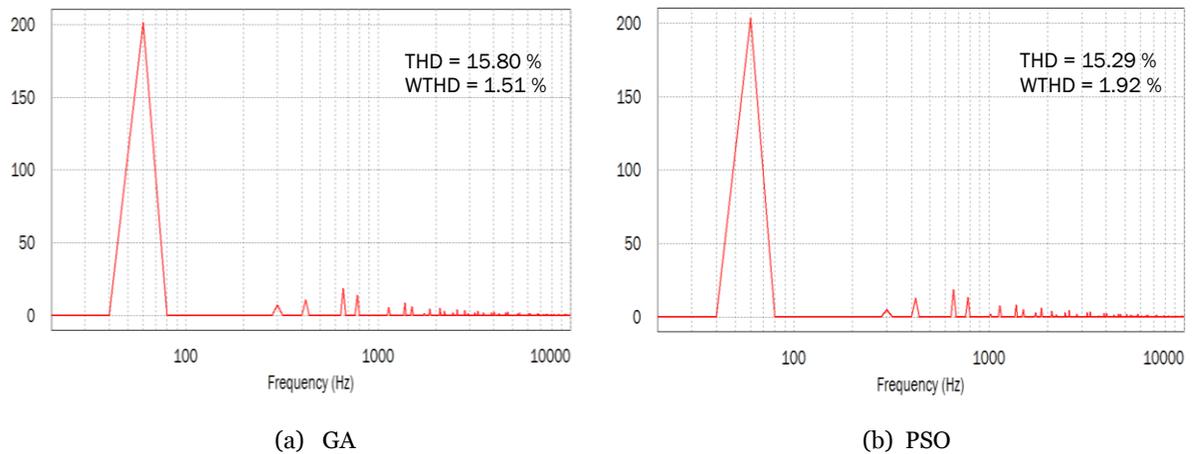


Figura 4.5. Espectro de frecuencia correspondiente a CMLI de cinco niveles minimizando THD.

El conjunto de soluciones se presentan dentro de la gama de índice de modulación de 0.3 a 1.5 para los cuales se calcula la eliminación de armónicos. La THD y WTHD de tensión contra el índice de modulación se muestra en las siguientes figuras.

Las soluciones para dos ángulos frente al índice de modulación M se muestran a continuación.

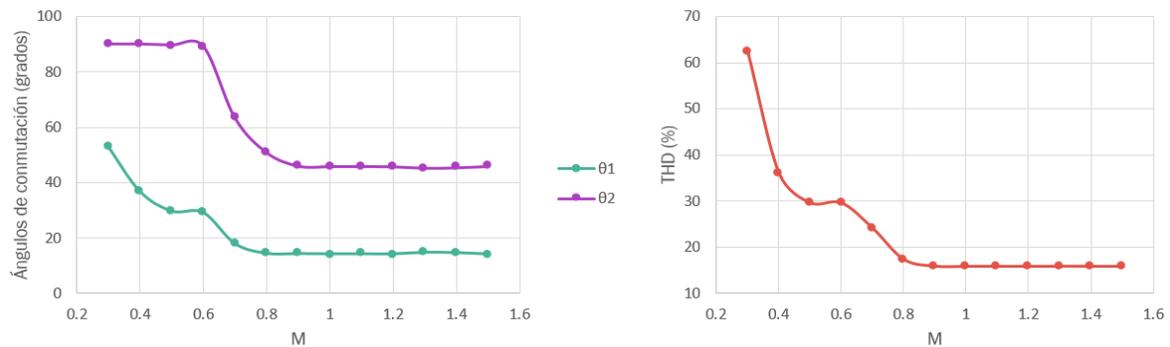


Figura 4.6. Conjunto de soluciones para THD empleando GA para dos ángulos.

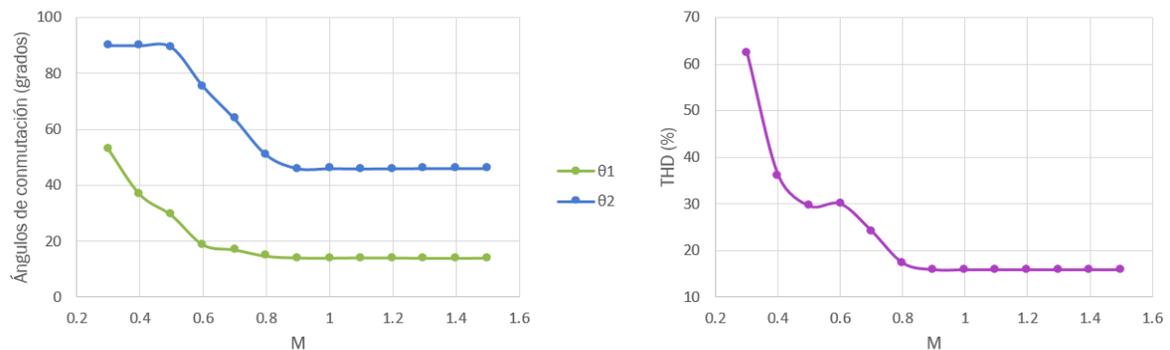


Figura 4.7. Conjunto de soluciones para THD empleando PSO para dos ángulos.

b. Resultados CMLI 5 niveles con WTHD como función objetivo

Se toma la WTHD como función objetivo la cual puede ser una función más apropiada de acuerdo a la aplicación del inversor.

La Figura 4.8., muestra la amplitud de las armónicas de acuerdo a los mejores ángulos localizados y se presentan a forma de comparación entre ambas técnicas.

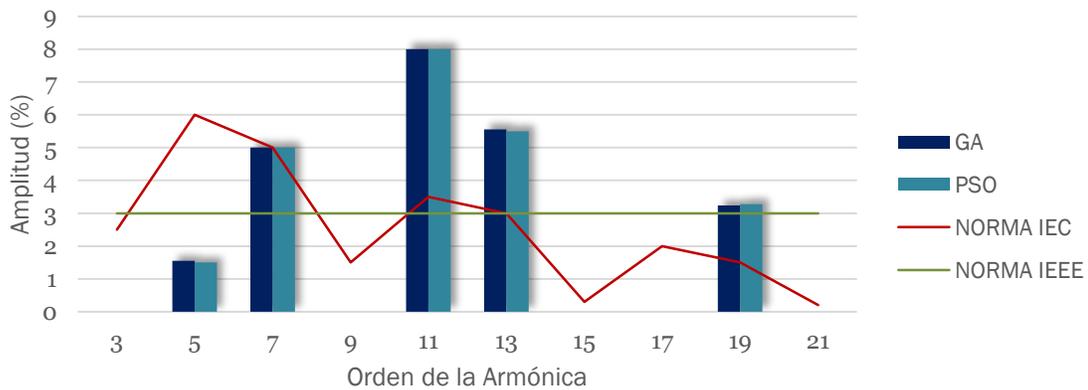


Figura 4.8. Comparativa entre niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para cinco niveles.

Los correspondientes espectros de frecuencia se presentan en la Figura 4.9., donde se observa una reducción de cada una de las armónicas con respecto a las amplitudes de la Figura 4.5., empleando la THD como función objetivo.

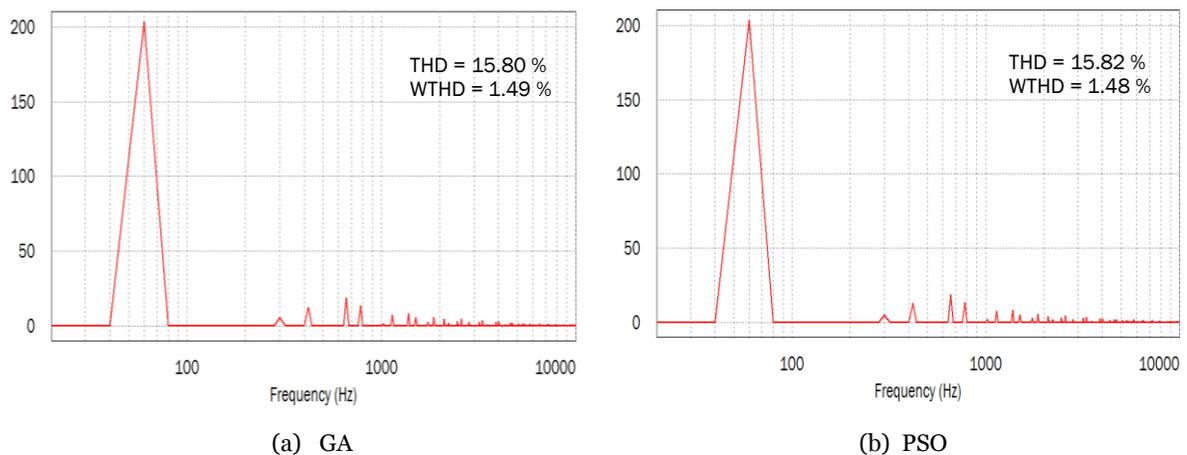


Figura 4.9. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de cinco niveles minimizando WTHD.

Las variaciones de los ángulos de conmutación frente al índice de modulación se presentan a continuación.

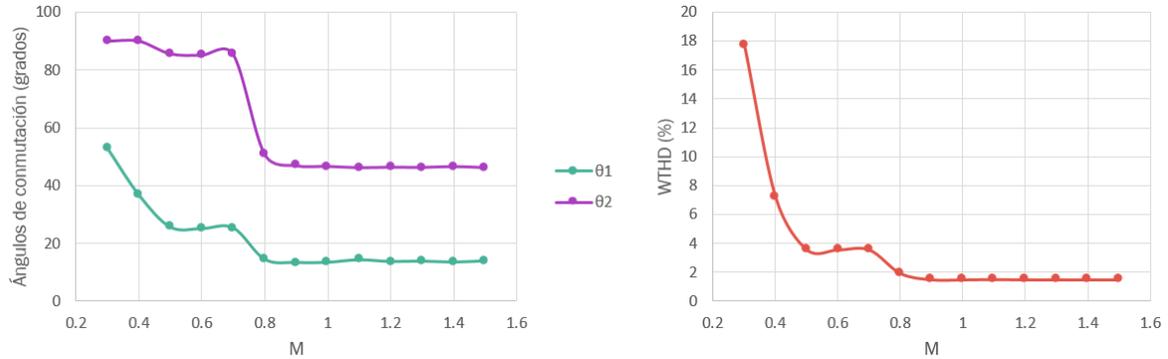


Figura 4.10. Conjunto de soluciones para WTHD empleando GA para dos ángulos.

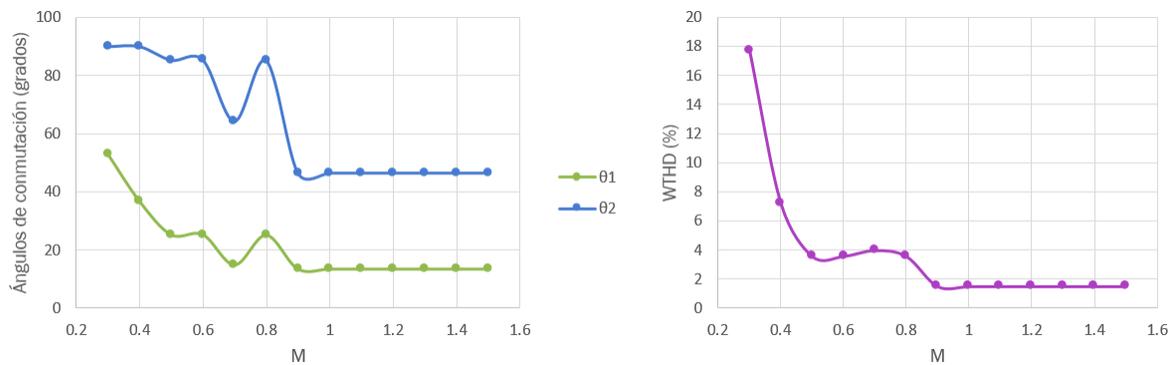


Figura 4.11. Conjunto de soluciones para WTHD empleando PSO para dos ángulos.

4.3. Inversor Multinivel en Cascada de Siete Niveles

Para el CMLI de siete niveles se muestra el modelo en *SIMULINK* en la Figura 4.12., mientras que su etapa de potencia en *PSIM* se observa en la Figura 4.13., cabe mencionar que este mismo circuito será empleado al aumentar el número de conmutaciones por nivel del inversor como parte del esquema multiángulo propuesto.

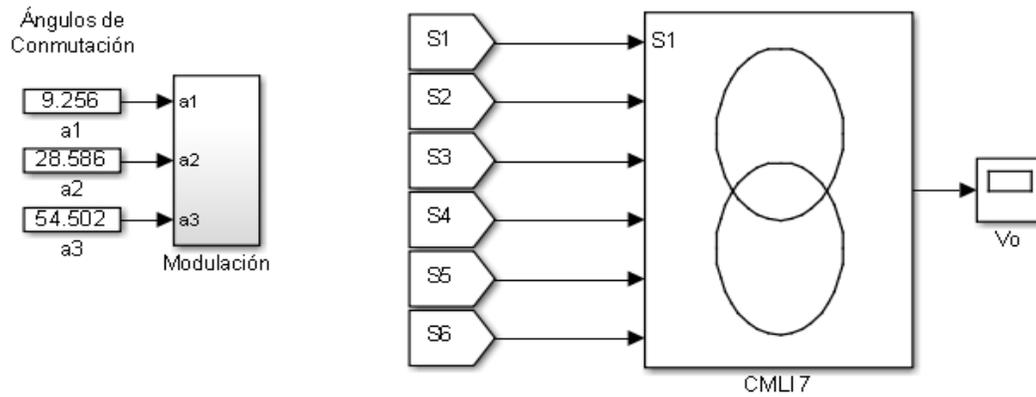


Figura 4.12. Modelo en SIMULINK del inversor de siete niveles.

Se muestra la etapa de potencia en el entorno *PSIM* para la generación de los siete niveles correspondientes a la tensión de salida de este CMLI.

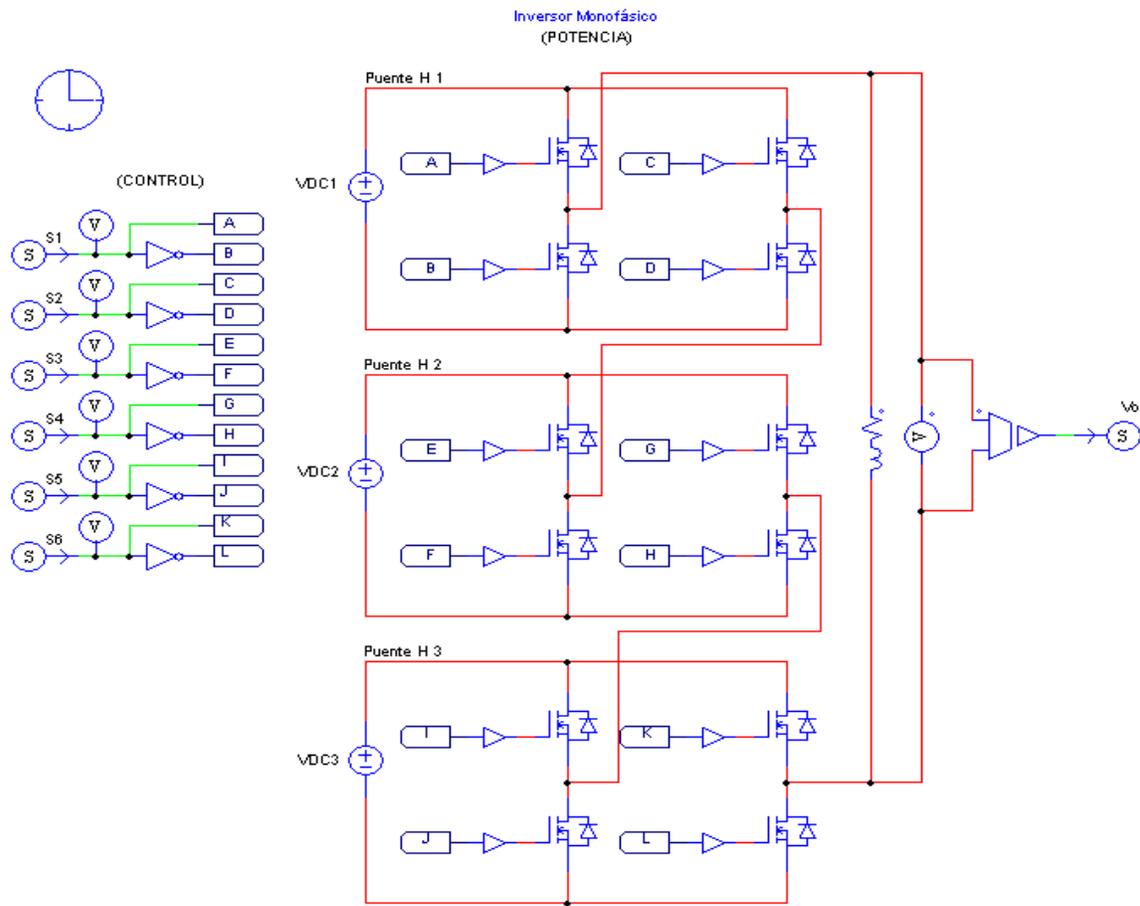


Figura 4.13. Diagrama esquemático del CMLI de siete niveles.

Las señales de control de los interruptores, encontrados por los algoritmos para esta estrategia de comando se generan de igual forma en el entorno *SIMULINK*, el sub-bloque de modulación se presenta como parte de los Anexos.

Para este inversor se visualiza la tensión de salida generalizada a continuación, corresponde a la suma de las tensiones en los tres puentes H del circuito de potencia.

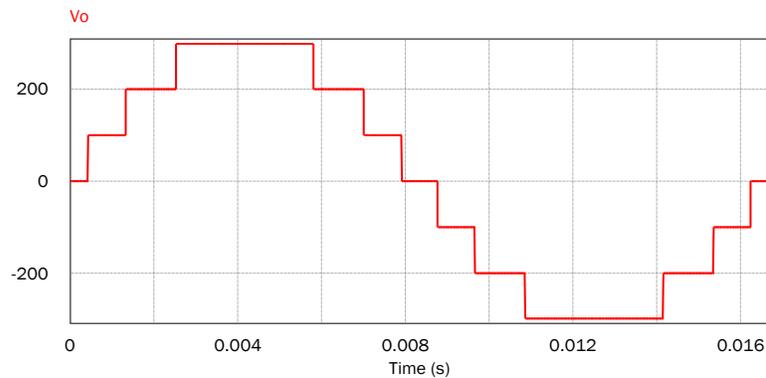


Figura 4.14. Señal de tensión a la salida del CMLI de siete niveles.

a. Resultados CMLI 7 niveles con THD como función objetivo

Las mejores soluciones obtenidas para el conjunto de tres ángulos de conmutación para este inversor, una vez configurados en el CMLI y simulados arrojaron los siguientes valores para la amplitud de cada armónica, tal como se muestra en la comparación de la Figura 4.15.

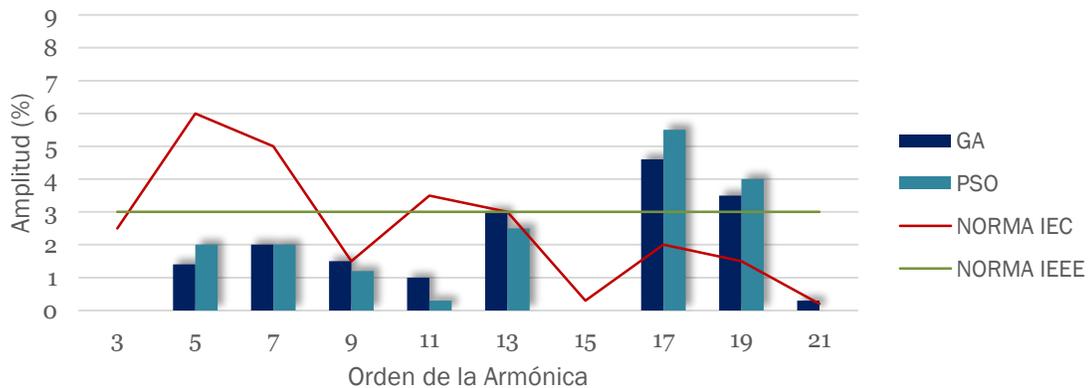


Figura 4.15. Niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles.

Los correspondientes espectros de frecuencia se presentan en la Figura 4.16. donde se observa la reducción de los armónicos de acuerdo al sistema de ecuaciones resuelto, aun cuando un armónico no se eliminó por completo es posible observar resultados favorables en todo el espectro logrando una reducción significativa.

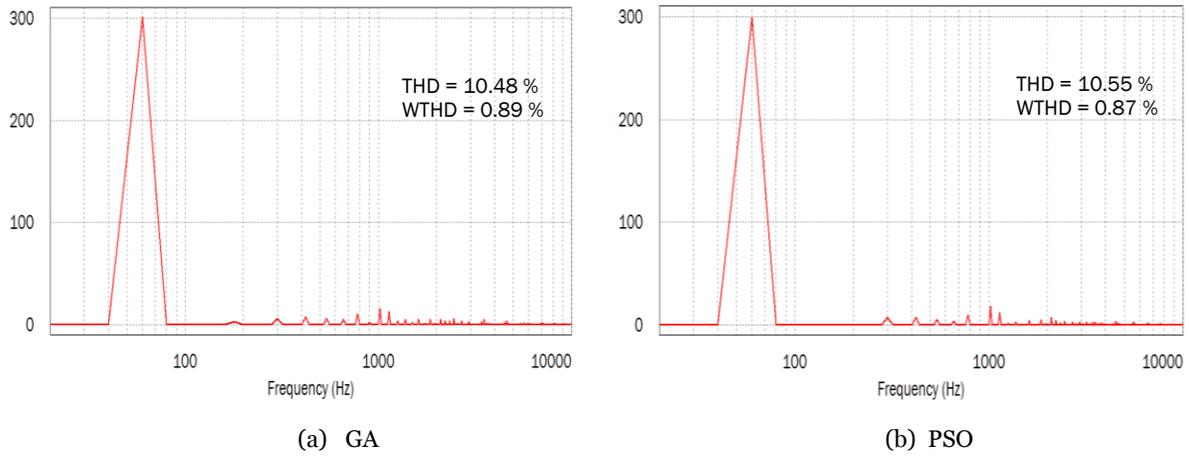


Figura 4.16. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles minimizando THD

Las soluciones para tres ángulos frente al índice de modulación M se presenta en las siguientes figuras.

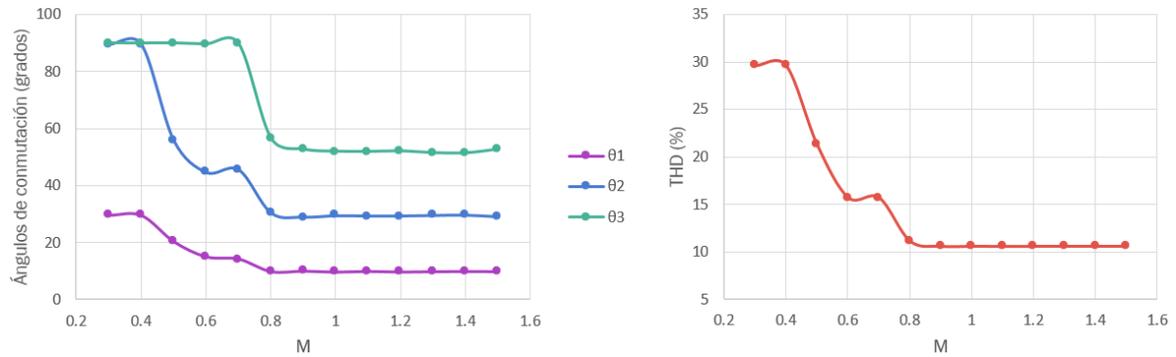


Figura 4.17. Conjunto de soluciones para THD empleando GA para tres ángulos

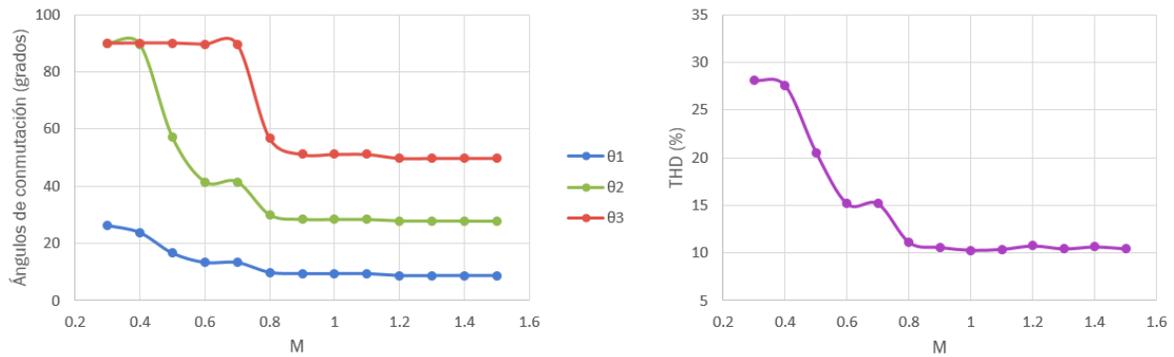


Figura 4.18. Conjunto de soluciones para THD empleando PSO para tres ángulos.

b. Resultados CMLI 7 niveles con WTHD como función objetivo

Una vez que se cambia la función objetivo por la función de la WTHD se toman las mejores soluciones para el conjunto de tres ángulos.

La amplitud de las armónicas de acuerdo a los mejores ángulos localizados se muestra en la Figura 4.19., y se presentan a forma de comparación entre ambas técnicas.

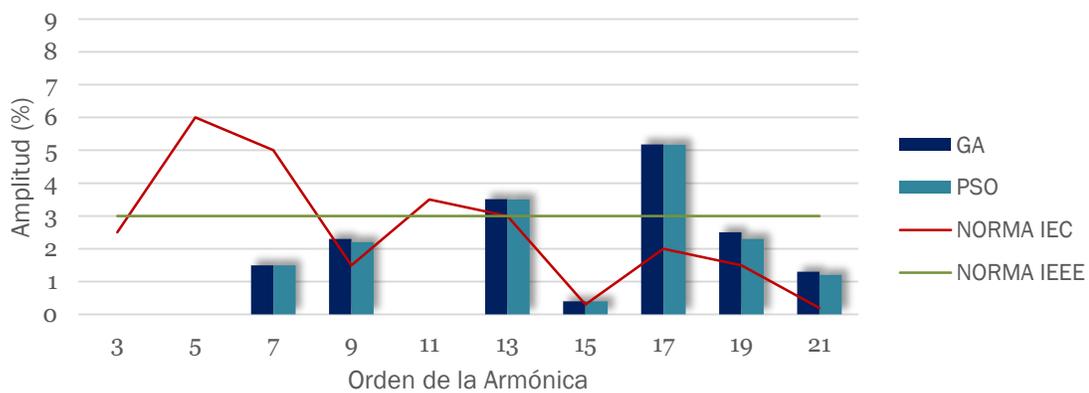


Figura 4.19. Comparativa entre los niveles máximos de las armónicas permisibles y las producidas por las técnicas para siete niveles.

Los correspondientes espectros de frecuencia se presentan en la Figura 4.20., se observa la reducción exitosa de los armónicos de bajo orden.

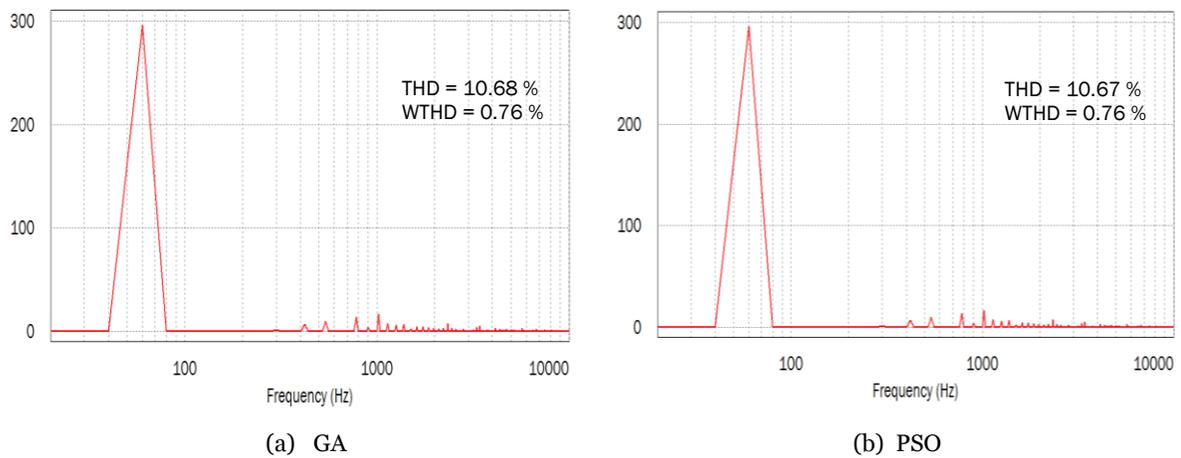


Figura 4.20. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles minimizando WTHD.

Las variación de los ángulos de conmutación *para WTHD* como función objetivo se muestran a continuación.

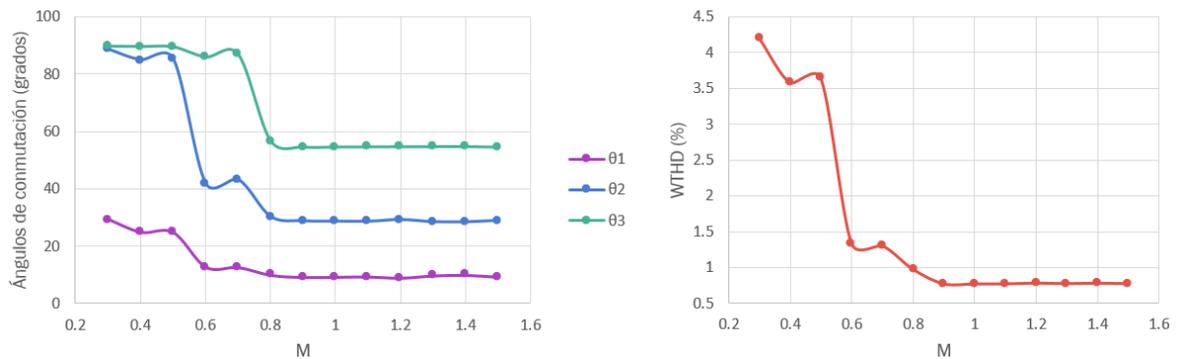


Figura 4.21. Conjunto de soluciones para WTHD empleando GA para tres ángulos.

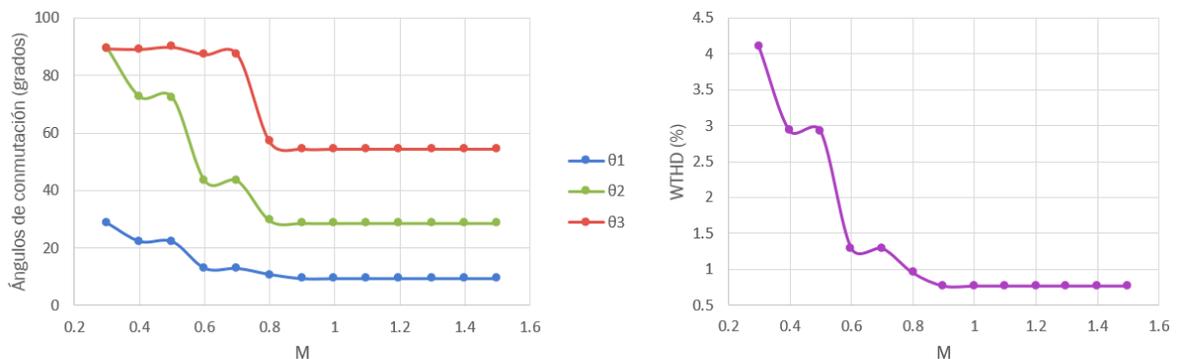


Figura 4.22. Conjunto de soluciones para WTHD empleando PSO para tres ángulos.

4.4. Inversor Multinivel en Cascada de Siete Niveles Multiángulos

Para la configuración multiángulo la etapa de control diseñada en el entorno *SIMULINK* se muestra en la Figura 4.23.

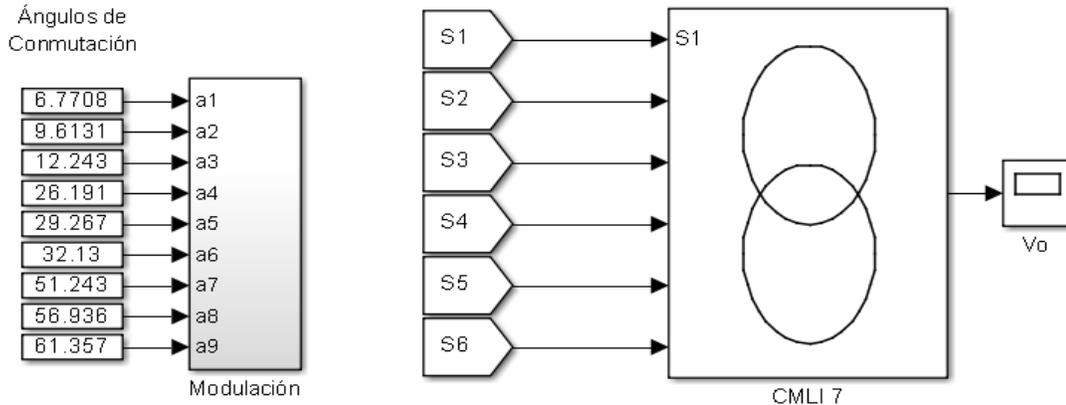


Figura 4.23. Modelo en SIMULINK del inversor de siete niveles multiángulos.

Los pulsos que se generaron para cada interruptor para el inversor de siete niveles con múltiples ángulos de conmutación por nivel se presentan en los Anexos. La tensión de salida del inversor de siete niveles al aumentar el número de conmutaciones por nivel y los correspondientes resultados para las armónicas se presenta a continuación.

Cabe recordar que al aumentar el número de variables (ángulos) en el sistema de ecuaciones para la eliminación de armónicos se logra aumentar el número de armónicas que serán eliminadas.

En la Figura 4.24., se muestra la tensión obtenida al aumentar el número de ángulos de conmutación, siendo ahora nueve los ángulos a determinar.

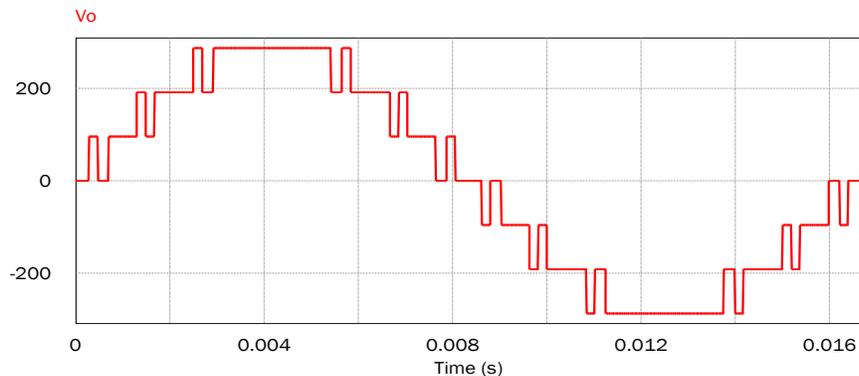


Figura 4.24. Señal de tensión a la salida del CMLI de siete niveles multiángulos.

a. Resultados CMLI 7 niveles multiángulo con THD como función objetivo

Se presentan las mejores soluciones obtenidas para el conjunto de ahora nueve ángulos de conmutación requeridos para este inversor, una vez simulados arrojaron los siguientes valores para la amplitud de cada armónica, tal como se muestra en la comparación de la Figura 4.25.



Figura 4.25. Niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles multiángulos.

Los correspondientes espectros de frecuencia se presentan en la Figura 4.26., para esta configuración se espera la reducción de ocho armónicas, sin embargo se observa la minimización de las armónicas en general, lo cual significa que aún cuando no elimina por completo cada armónica establecida en el sistema de ecuaciones, si se logra una reducción favorable al concentrarse en múltiples armónicas individuales.

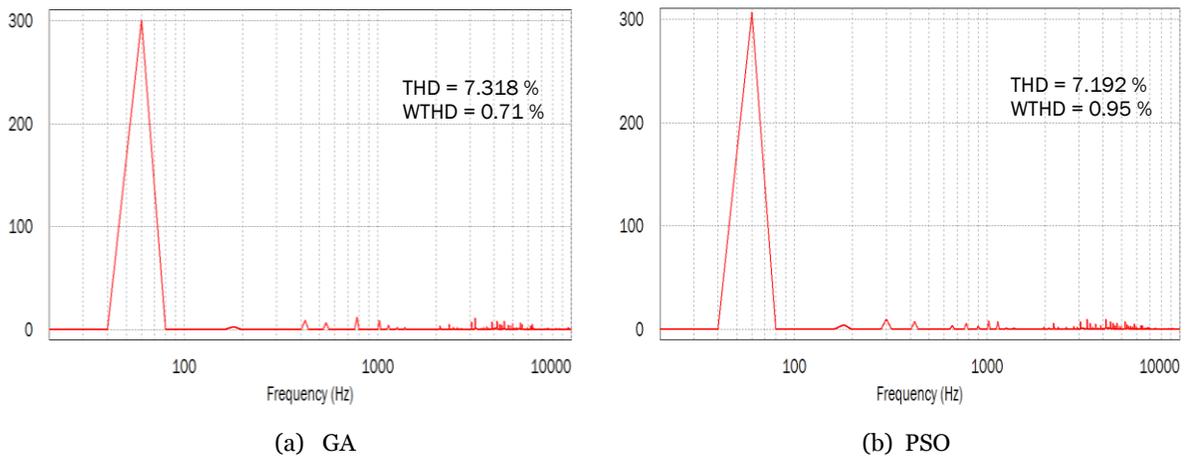


Figura 4.26. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de 7 niveles multiángulos minimizando THD.

b. Resultados CMLI 7 niveles multiángulo con WTHD como función objetivo

Por último se presentan los resultados para esta configuración del CMLI optimizando la WTHD. En la Figura 4.27., se presenta la comparativa entre los mejores ángulos obtenidos y se aprecia de una mejor forma la manera en que se optimiza el contenido armónico en la tensión de salida del CMLI.

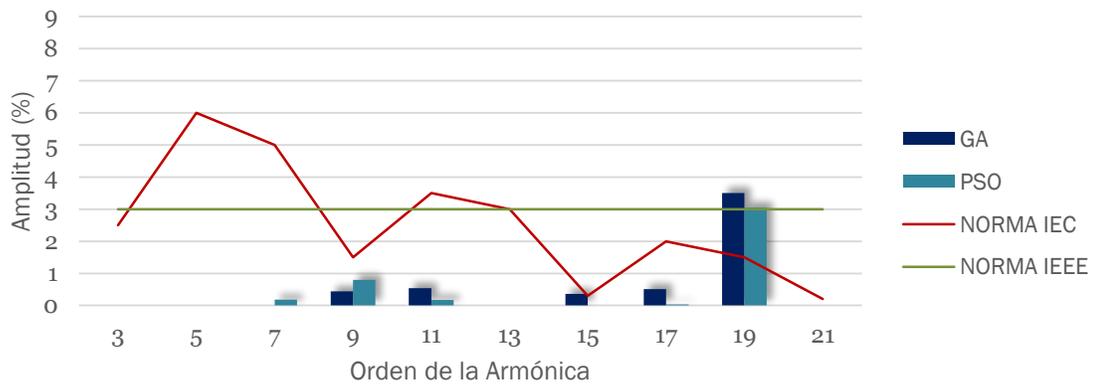


Figura 4.27. Comparativa entre niveles máximos permisibles de las armónicas y las producidas por las técnicas para siete niveles multiángulos.

Los correspondientes espectros de frecuencia se presentan en la Figura 4.28., se observa la reducción de las ocho armónicas de acuerdo al sistema de ecuaciones planteado.

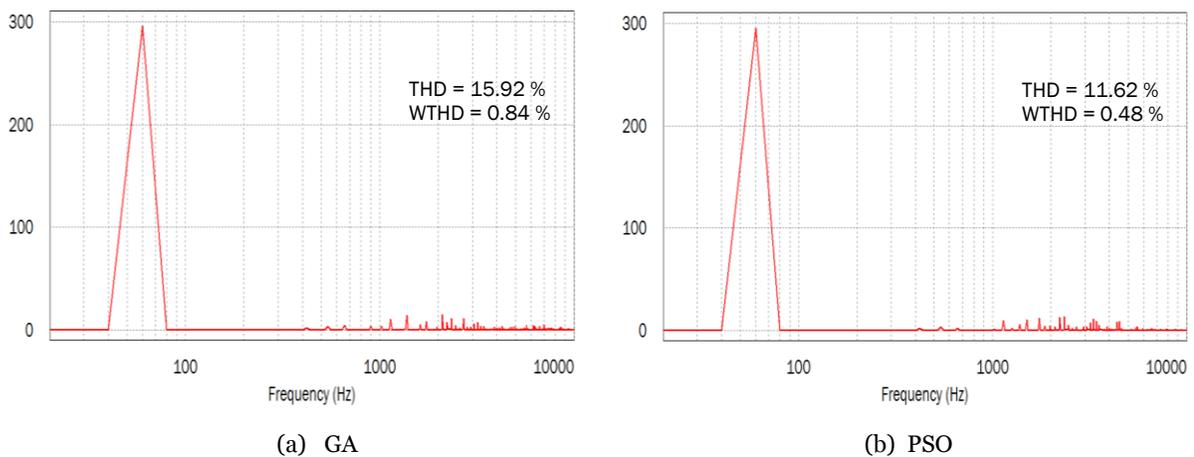


Figura 4.28. Espectro de frecuencias correspondiente a CMLI de siete niveles multiángulos minimizando WTHD.

4.6. Análisis de Resultados

La tabla siguiente presenta datos importantes obtenidos a partir de las técnicas empleadas, tales como porcentajes de THD, WTHD y la localización del mayor armónico.

Tabla. 4.3. Comparativa entre las técnicas de optimización empleadas para los CMLI de 5 y 7 niveles.

Algoritmo	CMLI	Función objetivo	Porcentaje de mayor armónico (%)	Orden de la armónica mayor	THD (%)	WTHD (%)
GA	5 niveles	THD	9	11	15.8	1.51
		WTHD	8	11	15.8	1.49
	7 niveles	THD	4.6	17	10.48	0.89
		WTHD	5.2	17	10.68	0.76
	7 niveles multiángulos	THD	3	13	7.31	0.71
		WTHD	3.5	19	15.92	0.84
PSO	5 niveles	THD	8.9	11	15.29	1.92
		WTHD	8	11	15.82	1.48
	7 niveles	THD	5.5	17	10.55	0.87
		WTHD	5.2	17	10.67	0.76
	7 niveles multiángulos	THD	2.6	19	7.19	0.95
		WTHD	3	19	11.62	0.48

Es posible observar como los porcentajes obtenidos por técnicas de optimización representan un resultado favorable en su uso para la minimización de armónicas, ya que en comparación con las técnicas empleadas tradicionalmente es posible combinar soluciones satisfactorias.

En cuanto al tiempo de ejecución de los algoritmos, aún cuando se trabaja con tiempos extremadamente cortos (computacionalmente más eficientes), en la Figura 4.29., se presenta una comparativa asociada al número de variables contra el número de evaluaciones de la función.

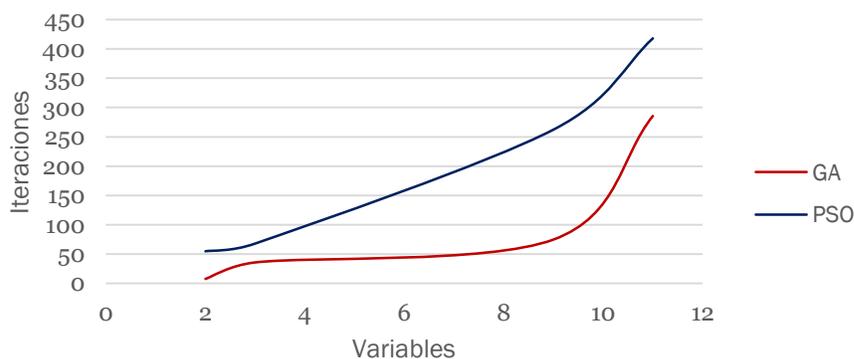


Figura 4.29. Comparación entre número de variables y ejecuciones requeridas.

En comparación con técnicas tradicionales comúnmente empleadas en la literatura y bajo las mismas condiciones de simulación, se presentan las amplitudes obtenidas para las armónicas de bajo orden en el CMLI de siete niveles.

En primer lugar se presentan las técnicas determinísticas, Newton-Raphson (N-R) y Aproximaciones Cuadráticas (A-C), de las cuales se muestra el contenido armónico en la Figura 4.30., posteriormente se muestran las técnicas de GA y PSO, el contenido armónico para el caso de un ángulo por nivel en la Figura 4.31., y en la Figura 4.32., empleando múltiples ángulos, consiguiendo la reducción de un mayor número de armónicas.

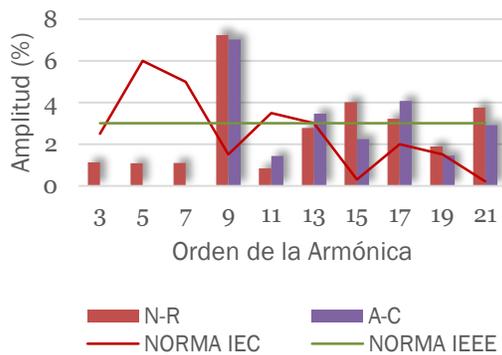


Figura 4.30. Técnicas tradicionales.

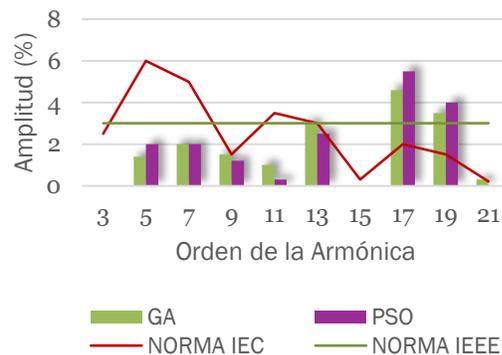


Figura 4.31. Técnicas heurísticas para conmutación simple.

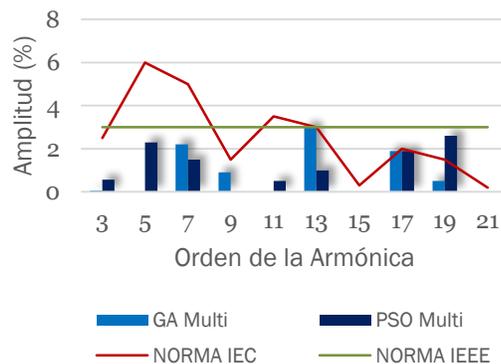


Figura 4.32. Técnicas heurísticas para conmutación múltiple.

Contra las técnicas tradicionales empleadas para la eliminación de armónicos se obtiene hasta un 4.3 % de diferencia en las amplitudes generadas por los conjuntos obtenidos, en cuanto al aumento de conmutaciones por nivel en el inversor la distorsión armónica se reduce alrededor de un 5.34 %.

En la siguiente tabla se presenta la localización de la armónica de mayor amplitud y porcentajes para las diferentes técnicas empleadas.

Tabla. 4.4. Comparativa entre diferentes técnicas para el CMLI de siete niveles.

Técnica	Porcentaje de mayor armónico (%)	Orden de la armónica mayor	THD (%)	WTHD (%)
Newton Raphson	7.23	9	12.53	0.93
Aproximaciones cuadráticas	7.03	9	11.55	0.91
GA	4.6	17	10.48	0.89
GA multiángulo	3	13	7.31	0.71
PSO	5.5	17	10.55	0.87
PSO multiángulo	2.6	19	7.19	0.95

Al emplear metaheurísticas para determinar los conjuntos solución se consigue recorrer la armónica de mayor amplitud de forma considerable, lo que permite aumentar la frecuencia de corte para el filtro de salida y reducir su tamaño.

En este trabajo se presenta los resultados obtenidos por medio de la simulación de los inversores multinivel de cinco y siete niveles, el conjunto solución para determinar los ángulos de conmutación para cada sistema de ecuaciones trascendentales se obtuvo por medio de los algoritmos de optimización y se abordó la conmutación multiángulo por nivel en el inversor de siete niveles.

Con esto se pretende reducir la amplitud de las armónicas de bajo orden con el fin de simplificar el diseño del filtro LC empleado a la salida del inversor, lo cual se traduce en un filtro de menor tamaño.

Además se aprovecha el potencial de técnicas metaheurísticas para la solución de problemas complejos de optimización.

5.1. Conclusiones

Técnicas como PSO y GA se inspiran en la naturaleza, y han demostrado ser soluciones efectivas para problemas de optimización.

Los objetivos planteados en la propuesta se cumplen al emplear las técnicas con el fin de obtener el conjunto de soluciones óptimas en el CMLI y comparar el rendimiento de estas dos técnicas de optimización para lograr una reducción de la THD en la tensión de salida del inversor.

Ambas técnicas son capaces de encontrar los ángulos de conmutación óptimos de una manera simple, permitiendo que no sea necesario abordar la solución de un sistema de ecuaciones trascendentales de manera formal, ya que se realiza una exploración en el espacio de búsqueda a partir de varios puntos de solución y no se enfoca en encontrar soluciones “exactas” sino la mejor solución al problema.

También reducen tanto la carga computacional y tiempo de ejecución, y se obtiene cierta calidad de los ángulos calculados tomando la distorsión armónica como un índice de rendimiento.

La técnica de PSO demostró su eficacia en la búsqueda de soluciones óptimas desde un punto de vista evolutivo debido a que el rendimiento del PSO es mejor que el del GA, puesto que ambos tienen un enfoque de búsqueda basado en poblaciones y dependen de intercambios de información para mejorar sus procesos utilizando una combinación estocástica y reglas probabilísticas.

PSO es similar al GA en el sentido de que ambos enfoques son basados en poblaciones y cada individuo tiene una función de aptitud. Además, los ajustes de los individuos en PSO son relativamente similar al operador de cruce aritmética utilizada en GA.

Sin embargo PSO está influenciada por la simulación del comportamiento social en lugar de la supervivencia del más apto y en general resulta fácil de implementar.

Los resultados demuestran que para la mayoría de los casos, los conjuntos solución calculados por PSO son aquellos que arrojan los mejores porcentajes de distorsión armónica, además requiere de un número menor de individuos para lograrlo en comparación del GA y su configuración es más simple al necesitar de pocos coeficientes de diseño.

La construcción de las restricciones permite manejar los límites individuales de las armónicas de forma que su amplitud permanezca dentro de los valores cercanos a la norma, en la mayoría de los casos.

En este trabajo también se realizó la conmutación adicional puesto que las ecuaciones que describen el problema de optimización del CMLI permiten la reducción de solo cierto número de armónicas. Sin embargo, es posible aumentar el número de armónicos a eliminar, al aumentar el número de conmutaciones.

Esto se comprobó de manera favorable en el CMLI de siete niveles para el cual se logró reducir la amplitud de hasta ocho armónicas, en contraste con los resultados obtenidos para el mismo inversor con conmutación tradicional donde se reducen con éxito dos de ellas, mientras que las tensiones armónicas de mayor amplitud son desplazadas a niveles más altos de frecuencia.

Puesto que estos algoritmos forman parte de métodos de optimización metaheurística, cada vez que se ejecutan se puede llegar a soluciones ligeramente distintas pero que satisfacen el problema de minimización. Además, la función objetivo y la apropiada selección de los parámetros de control involucrados son un punto clave para el éxito en la optimización.

Con la reducción de las armónicas y el desplazamiento de aquellas con mayor amplitud, es posible fijar la frecuencia de corte para el filtro de salida LC en frecuencias superiores permitiendo reducir su tamaño.

5.2. Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se propone el aumento de variables en el problema de optimización para la reducción de armónicas, con lo cual se pueden extender estas técnicas a casos de aplicación para múltiples niveles, consiguiendo amplitudes bajas de distorsión empleando un menor número de dispositivos (puentes H).

En cuanto a las técnicas metaheurísticas empleadas, es posible realizar combinaciones de estas, de forma que se aprovechen características de búsquedas propias de cada algoritmo, un ejemplo de ello son los algoritmos genéticos híbridos, empleando operadores genéticos para mejorar las soluciones obtenidas por técnicas de menor complejidad y la optimización por enjambre multi-poblaciones que integra varios subsistemas para garantizar la completa exploración del espacio de búsqueda al mismo tiempo que reduce el tiempo de ejecución.

Debido a que el objetivo de esta tesis es determinar mediante técnicas de optimización metaheurísticas la solución al sistema propuesto, con la intención de explorar estas técnicas, algunos de los aspectos importantes a realizar son, la validación de los conjuntos obtenidos mediante la implementación de los inversores multiniveles en cascada. A su vez una forma de enriquecer este trabajo es adaptar las funciones para un inversor multinivel en cascada trifásico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Skvarenina, T., “The Power Electronics Handbook”, Florida: Ed. CRC Press, pp. 283, 2002.
- [2] Rodriguez, J., Lai, J. S., & Peng, F. Z., “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
- [3] Lai, J. S., & Zheng Peng, F., “Multilevel converter new breed of power converters,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 32, no. 3, pp. 509–517, May 1985.
- [4] Rodriguez, J., Bernet, S., Wu, B., Pontt, J., & Kouro, S., “Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007.
- [5] Chiasson, J., Tolbert, L.M., Mckenzie, K., & Du, Z., “Control of a Multilevel Converter Using Resultant Theory,” *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 345-354, 2003.
- [6] Sanabria, C.A., “Estrategia PWM Implementada en un FPGA en Inversores Multinivel,” Tesis, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2004.
- [7] Corzine, K., Wielebski, M.W., Peng, F.Z., & Wang, J., “Control of Cascaded Multilevel Inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 732-738, 2004.
- [8] Franquelo, L., Rodriguez, J., Leon, J., Kouro, S., Portillo, R., & Prats, M., “The Age of Multilevel Converters Arrives,” *IEEE Industrial Electronics Magazine Jun’2008*, Vol. 2, No. 2, pp. 28-39, 2008.
- [9] Kouro, S., Lezana, P., Angulo, M., & Rodriguez, J., “Multicarrier PWM with DC-Link Ripple Feedforward Compensation for Multilevel Inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 1, pp. 52-59, 2008.
- [10] Estrada, J.A., “Modulador PWM en FPGA para un Inversor Multinivel en Cascada,” Tesis, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2009.
- [11] BenAbdelghani, A., Martins, C.A., Roboam, X., & Meynard, T.A., “Use of Extra Degrees Of Freedom in Multilevel Drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 965–977, Oct. 2002.
- [12] Pan, Z., Peng, F.Z., Corzine, K.A., Stefanovic, V.R., Leuthen, J.M., & Gataric, S., “Voltage Balancing Control of Diode-Clamped Multilevel Rectifier/Inverter Systems,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 41, no. 6, pp. 1698–1706, Nov. 2005.
- [13] Ozpineci, B., Tolbert, L.M., & Chiasson, J.N., “Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms,” *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 92–95, Sept. 2005.
- [14] McGrath, B.P., Holmes, D.G., & Meynard, T., “Reduced PWM Harmonic Distortion for Multilevel Inverters Operating Over a Wide Modulation Range,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 941–949, July 2006.
- [15] Du, Z., Tolbert, L.M., & Chiasson, J.N. “Active Harmonic Elimination for Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 459–469, Mar. 2006.
- [16] Franquelo, L.G., Napoles, J., Portillo, R., Leon, J.I., & Aguirre, M., “A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3022–3029, Dec. 2007.
- [17] Rech C., & Pinheiro, J.R., “Hybrid multilevel converters: Unified Analysis and Design Considerations,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 1092–1104, Apr. 2007.
- [18] Yacoubi, L., Al-Haddad, K., Dessaint, L.A., & Fnaiech, F., “Linear and Nonlinear Control Techniques for a Three-Phase Three-Level NPC Boost Rectifier,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1908–1918, Dec. 2006.

- [19] Lezana, P., Silva, C.A., Rodriguez, J., & Prez, M.A., "Zero-Steady-State-Error Input-Current Controller for Regenerative Multilevel Converters Based On Single-Phase Cells," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 733–740, Apr. 2007.
- [20] Bárcenas, E., "Análisis y Desarrollo de un Inversor Multinivel", Tesis de Maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Diciembre, 2002.
- [21] Bretón Schuwirth, A.A, "Diseño y Construcción de un Inversor Trifásico Multinivel de Cuatro Etapas para Compensación Armónica de Reactivos". Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2003.
- [22] Holmes, D.G., & Lipo, T., "Pulse Width Modulation for Power Converters", Wiley-Interscience, pp. 95-253, Canada, 2003.
- [23] Ziogas, M.A., P.D., "State-of-the-Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, No. 2, pp. 271-280, March/April 1998.
- [24] Tolbert, L.M. & Habetler, T.G., "Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, No. 5, pp. 1098-1107, September-October 1999.
- [25] Bäck, T., "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms", Jan 11, 1996.
- [26] Lizcano, A. F., Díaz, J. L., & Pardo, A., "Harmonic Distortion Minimization Of A Pwm Modulation Using Genetic Algorithms", *Eifth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2010.
- [27] Napoles, J., Leon, J.I. , Portillo, R., Franquelo, L.G., & Aguirre, M.A., "Selective Harmonic Mitigation Technique for High-Power Converters", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 7, pp. 2315-2323, 2010.
- [28] Duffey, C. K., & Stratford, R. P., "Update of Harmonic standard IEEE-519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 6, pp. 1025 1034, 1989.
- [29] G. de Diseño de Instalaciones Eléctricas, Detección y filtrado de armónicos, Schneider Electric, 2008.
- [30] Li, L., Czarkowski, D., Yaguang L., & Pillay, P., "Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in Series-Connected Voltage Inverters," in *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.36, no.1, pp.160-170, Jan/Feb 2000.
- [31] Patel, H.S., & R. G. Hoft, "Generalized harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I—Harmonic Elimination," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-9, no. 3, pp. 310–317, May/Jun. 1973.
- [32] Patel, H.S., & R. G. Hoft, "Generalized harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part II—Voltage Control Technique," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-10, no. 5, pp. 666–673, Sep./Oct. 1974.
- [33] Enjeti, P.N., Ziogas, P.D., & Lindsay, J.F., "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation," *IEEE Trans. Ind.Appl.*, vol. 26, no. 2, pp. 302–316, Mar./Apr. 1990.
- [34] Kumar, J., Das, B., & Agarwal, P., "Selective Harmonic Elimination Technique for Multilevel Inverter," *15th National Power System Conference (NPSC)*, IIT Bombay, pp. 608-613, 2008.
- [35] Sundareswaran, K., Jayant, K., & Shanavas, T.N., "Inverter Harmonic Elimination through a Colony of Continuously Exploring Ants," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volume 54, no. 5, pp. 2558-2565, 2007.
- [36] Vinoth, N, & Umesh, H., "Simulation of Particle Swarm Optimization Based Selective Harmonic Elimination", *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* Volume 2, Issue 7, pp 215-218, 2013.

-
- [37] Maswood, A.I., Wei, S., & Rahman, M.A., "A Flexible Way to Generate PWM-SHE Switching Patterns Using Genetic Algorithm," Conference Proceedings of IEEE (APEC), 2001, pp. 1130-1134.
- [38] Ozpineci, B., Tolbert, L.M., & Chiasson, J.N., "Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithm," 35 Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany, 2004.
- [39] Salehi, R., Farokhia, N., Abedi, M., & Fathi, S.H., "Elimination of Low Order Harmonics in Multilevel Inverters Using Genetic Algorithm," Journal of Power Electronics, volume 11, no. 2, pp. 132-139, 2011.
- [40] Al-Othman, A.K., & Abdelhamid, T.H., "Elimination of Harmonics in Multilevel Inverters with Non-Equal DC Sources Using PSO", Energy Conversion and Management Volume 50, Issue 3, pp. 756-764, March 2009.
- [41] Kouzou, A., Mahmoudi, M.O., & Boucherit M.S, "Application of SHE-PWM for Seven-Level Inverter Output Voltage Enhancement Based on Particle Swarm Optimization", 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2010.
- [42] Muthuramalingam, A., Balaji, M., & Himavathi, S., "Selective Harmonic Elimination Modulation Method for Multilevel Inverters," in Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on, vol., no., pp.40-45, 19-21 Dec. 2006.
- [43] Ray, R.N., Chatterjee, D., & Goswami, C S.K., "Harmonics Elimination in a Multilevel Inverter Using Particle Swarm Optimization Technique", IET Power Electronics, Vol. 2, Iss. 6, pp. 646- 652, 2009.
- [44] Luna, F., "Metaheurísticas Avanzadas para Problemas Reales en Redes de Telecomunicaciones", Tesis de Doctorado, Universidad de Málaga, 2008.
- [45] Momoh J. A., Adapa, R., & El-Hawary, M. E., "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. I. Nonlinear and Quadratic Programming Approaches," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 1, pp. 96-104, 1999.
- [46] Momoh, J. A., El-Hawary M. E., & Adapa, R., "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. II. Newton, Linear Programming and Interior Point Methods," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 1, pp. 105-111, 1999.
- [47] Echer, J., & Kupferschmid, M., "Introduction to Operations Research". New York: Wiley, 1988.
- [48] Glover, F., and Ghaziri H., "Optimización Heurística y Redes Neuronales", Paraninfo, España, 1996.
- [49] Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J. R., Dorado, J. & Pazos, A. "Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética". Universidad da Coruña, Servizo de Publicacións, pp. 76, 2010.
- [50] Goldberg, D. A., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, Massachusetts, Jan 1, 412 p., 1989.
- [51] Vis, J.K., "Particle Swarm Optimizer for Finding Robust Optima", (Unpublished dissertation), Leiden, Netherlands, Leiden University, 2009.
- [52] Al-Rashidi, M.R., "A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems," vol. 13, no. 4, pp. 913-918, 2009.
- [53] Umapathy, P., Venkataseshiah, C., & Arumugam, M.S., "Particle Swarm Optimization with Various Inertia Weight Variants for Optimal Power Flow Solution", Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2010, Article ID 462145, 15 p, 2010.
- [54] Kennedy, J. & Eberhart, R., "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory", IEEE, Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 39-43, 1995.
- [55] Clerc M., Kennedy J., "The Particle Swarm-Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 58-73, 2002.
-

- [56] Pohlheim, H., “GEATbx: Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox for use with MATLAB”, 1997.
- [57] “Global Optimization Toolbox for Use with Matlab”, The MatWorks inc, 2015.

ANEXO A

Modulación de los inversores

De acuerdo al circuito mostrado en la Figura A.1., se presenta el sub-bloque de modulación empleado para el inversor de cinco niveles.

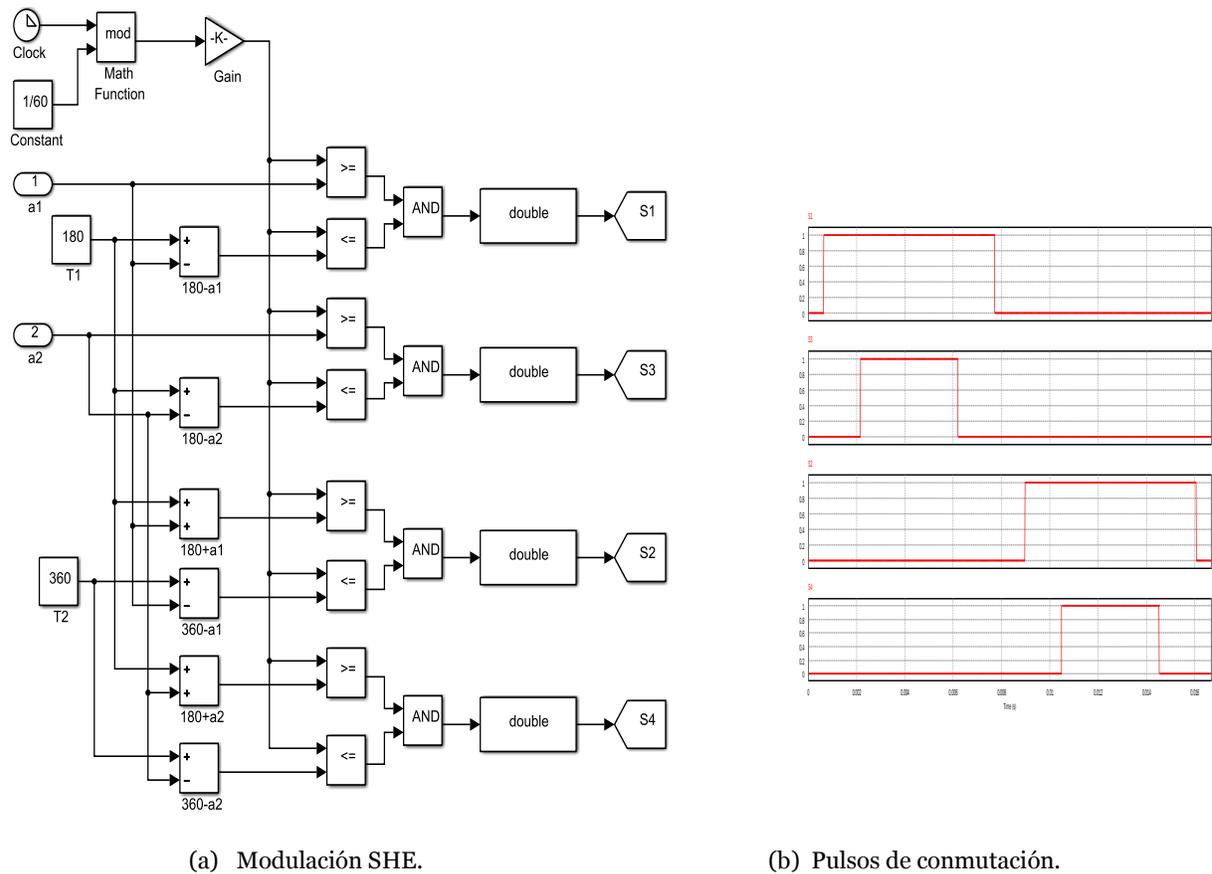


Figura A.1. Sub-bloque de modulación del CMLI de cinco niveles.

El sub-bloque de modulación para el inversor de siete niveles se muestra en la siguiente figura, mientras que los pulsos de conmutación se presentan en la Figura A.3.

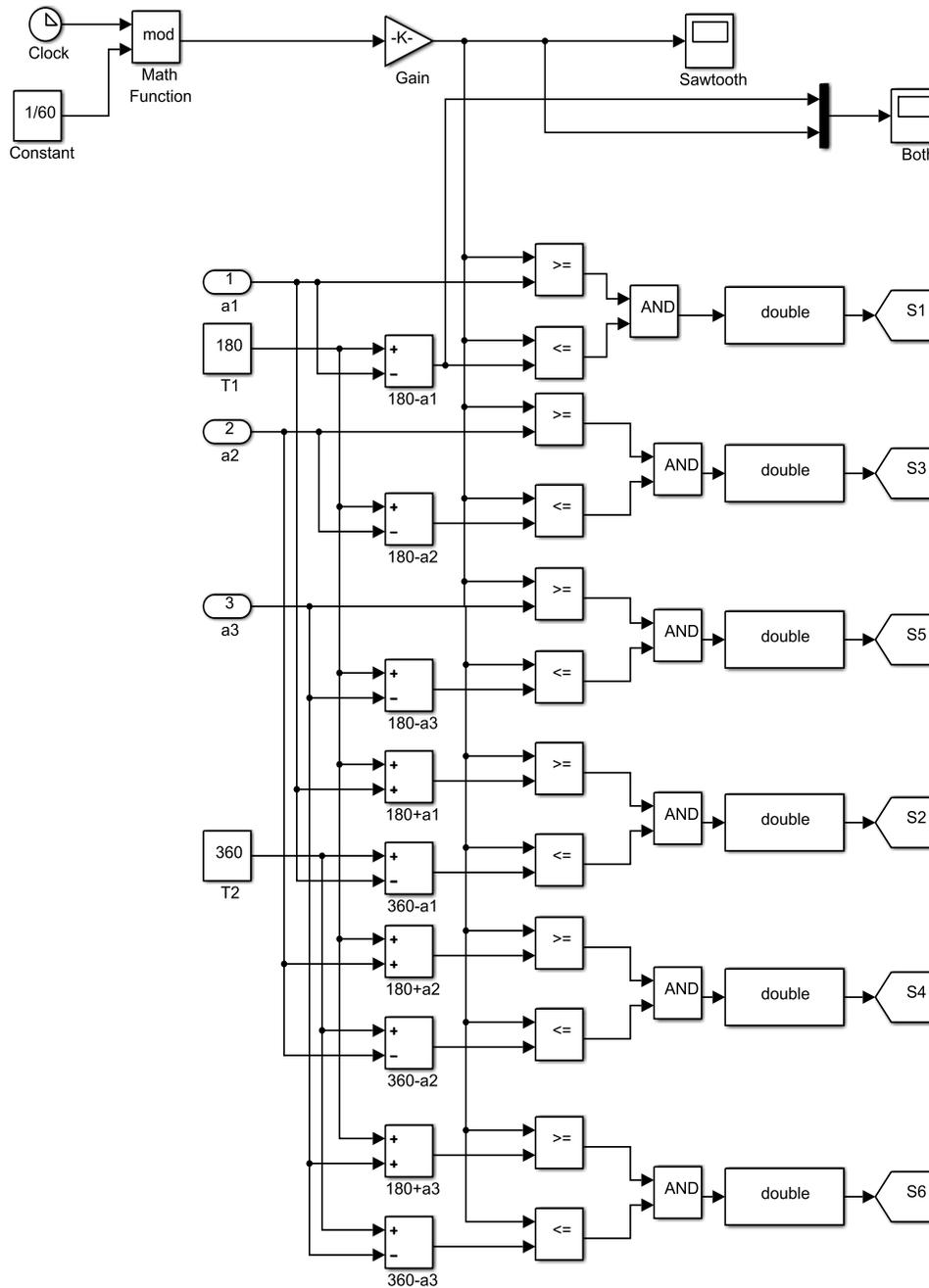


Figura A.2. Sub-bloque de modulación del CMLI de siete niveles.

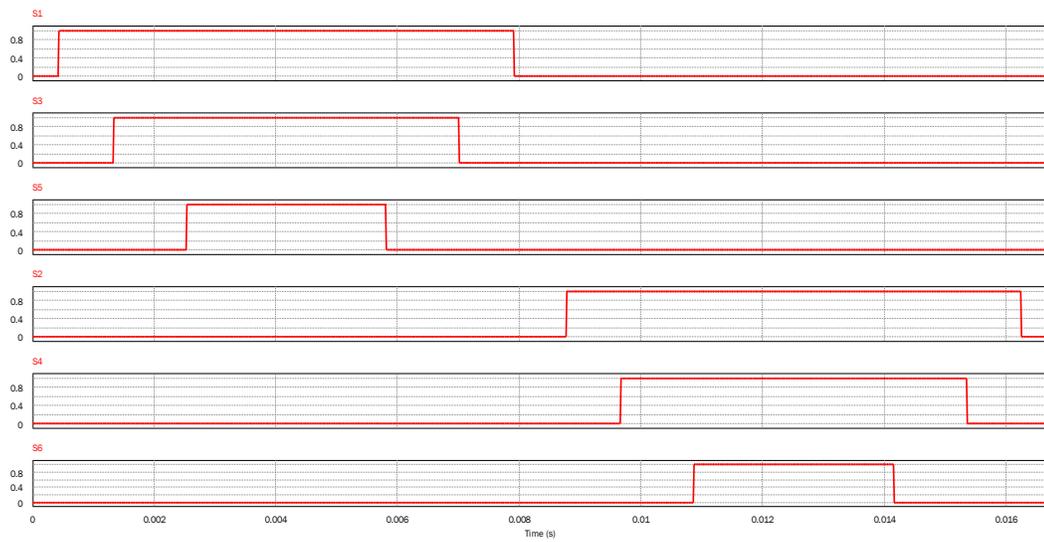


Figura A.3. Pulsos de conmutación para el CMLI de siete niveles.

Por su parte el sub-bloque para la modulación multiángulo es mostrado en la Figura A.5., los pulsos de conmutación requeridos se ejemplifican a continuación en la siguiente figura.

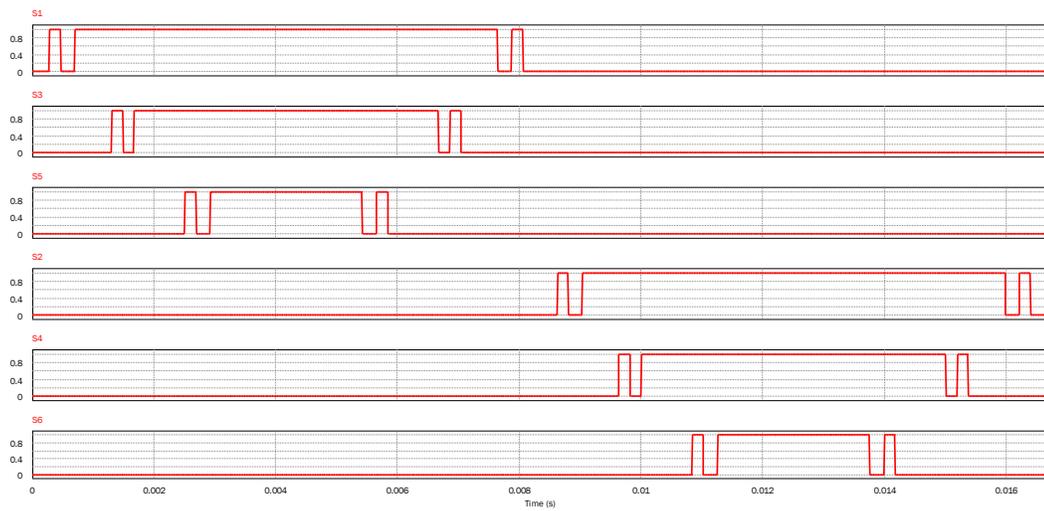


Figura A.4. Pulsos de conmutación para el CMLI de siete niveles multiángulo.

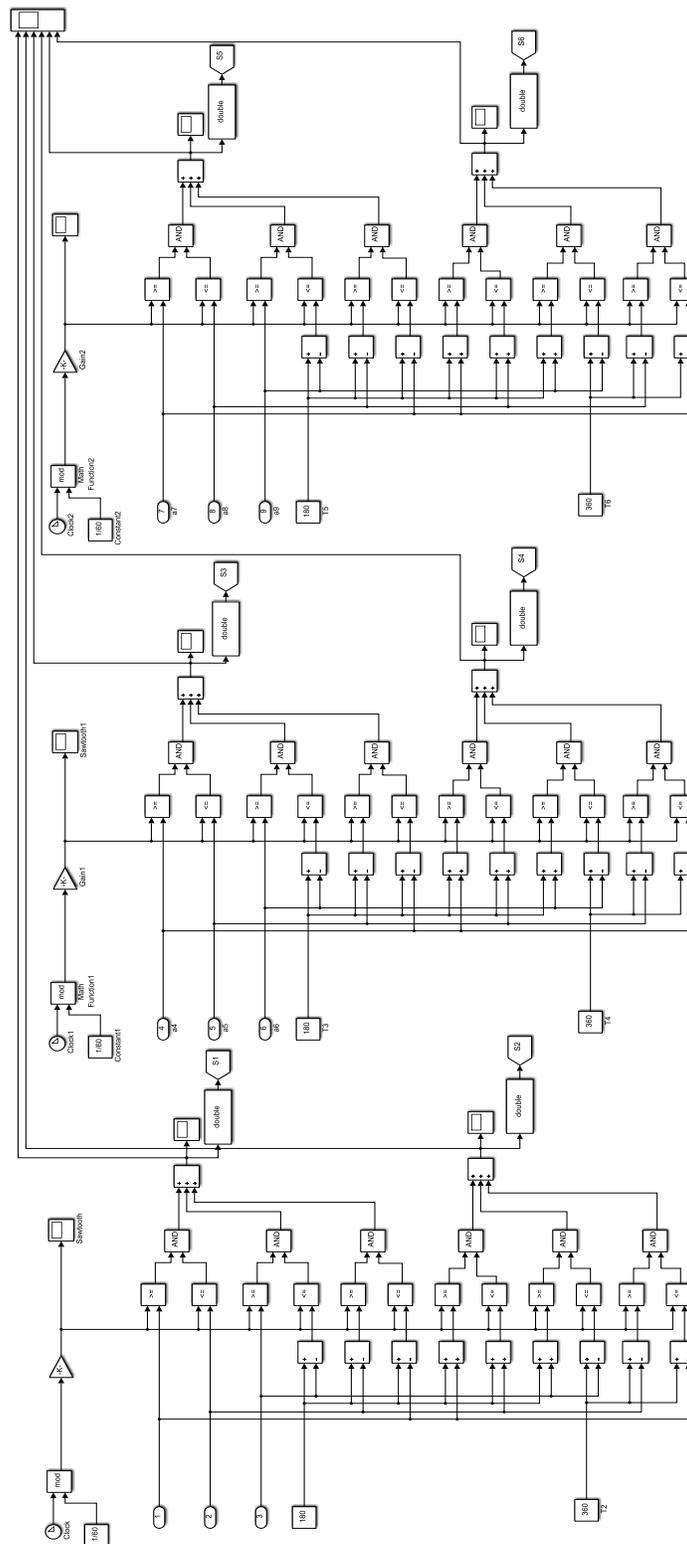


Figura A.5. Sub-bloque de modulación del CMLI de siete niveles multiángulo.

ANEXO B

Programas para la optimización del inversor multinivel en cascada

Código para el cálculo de THD como función objetivo.

```
%%% Función Objetivo THD / CMLI - 5 Niveles
function THD = funObj(x)
    sum=0;
    for n=3:2:49
        T = (((cos(x(1)*n*pi/180) + cos(x(2)*n*pi/180))/n)^2);
        sum = sum+T;
        THD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180));
    end
```

```
%%% Función Objetivo THD / CMLI - 7 Niveles
function THD = thd_7(x)
    sum=0;
    for n=3:2:49
        T = (((cos(x(1)*n*pi/180) + cos(x(2)*n*pi/180)...
            + cos(x(3)*n*pi/180))/n)^2);
        sum = sum+T;
        THD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)...
            +cos(x(3)*pi/180));
    end
```

```
%%% Función Objetivo THD / CMLI - 7 Niveles Multiángulos
function THD = thd_7M(x)
    sum=0;
    for n=3:2:49
        T = (((cos(x(1)*n*pi/180) - cos(x(2)*n*pi/180) + cos(x(3)*n*pi/180)+...
            cos(x(4)*n*pi/180) - cos(x(5)*n*pi/180) + cos(x(6)*n*pi/180)+...
            cos(x(7)*n*pi/180) - cos(x(8)*n*pi/180) + cos(x(9)*n*pi/180))/n)^2);
        sum = sum+T;
        THD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)-cos(x(2)*pi/180)+ ...
            cos(x(3)*pi/180)+cos(x(4)*pi/180)-cos(x(5)*pi/180)+ ...
            cos(x(6)*pi/180)+cos(x(7)*pi/180)-cos(x(8)*pi/180)+ ...
            cos(x(9)*pi/180));
    end
```

Código para el cálculo de WTHD como función objetivo.

```
%%% Función Objetivo WTHD / CMLI - 5 Niveles
function WTHD = wthd_5(x)
    sum=0;
    for n=3:2:49
        T = (((((cos(x(1)*n*pi/180) + cos(x(2)*n*pi/180) )/n))/n)^2);
        sum = sum+T;
    end
```

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

```
%%% Función Objetivo WTHD / CMLI - 7 Niveles
```

```
function WTHD = wthd_7(x)  
sum=0;  
for n=3:2:49  
T = (((cos(x(1)*n*pi/180) + cos(x(2)*n*pi/180) ...  
+ cos(x(3)*n*pi/180))/n)/n)^2;  
sum = sum+T;  
WTHD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)...  
+cos(x(3)*pi/180));  
end
```

```
%%% Función Objetivo THD / CMLI - 7 Niveles Multiángulos
```

```
function WTHD = wthd_7MS(x)  
sum=0;  
for n=3:2:49  
T = (((cos(x(1)*n*pi/180) - cos(x(2)*n*pi/180) + cos(x(3)*n*pi/180)+...  
cos(x(4)*n*pi/180) - cos(x(5)*n*pi/180) + cos(x(6)*n*pi/180)+...  
cos(x(7)*n*pi/180) - cos(x(8)*n*pi/180) + cos(x(9)*n*pi/180))/n)/n)^2;  
sum = sum+T;  
WTHD = sqrt(sum)*100/(cos(x(1)*pi/180)-cos(x(2)*pi/180)+ ...  
cos(x(3)*pi/180)+cos(x(4)*pi/180)-cos(x(5)*pi/180)+ ...  
cos(x(6)*pi/180)+cos(x(7)*pi/180)-cos(x(8)*pi/180)+ ...  
cos(x(9)*pi/180));  
end
```

Código para las restricciones del inversor multinivel en cascada.

```
%%% Restricciones / CMLI - 5 Niveles
```

```
M=0.9;  
function [c, ceq] = restriccion_5(x)  
c=[  
cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)+(2*M);  
cos(3*x(1)*pi/180)-cos(3*x(2)*pi/180);  
  
(x(2)*pi/180)-(pi/2);  
(x(1)*pi/180)-(x(2)*pi/180);  
-(x(1)*pi/180);  
];  
ceq = [];
```

```
%%% Restricciones / CMLI - 7 Niveles
```

```
M=0.9;  
function [c, ceq] = constr_7(x)  
c = [  
cos(x(1)*pi/180)+cos(x(2)*pi/180)+cos(x(3)*pi/180)-(3*M);  
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);  
  
(x(3)*pi/180)-(pi/2);  
(x(2)*pi/180)-(x(3)*pi/180);  
];
```

```
(x(1)*pi/180)-(x(2)*pi/180);
-(x(1)*pi/180);
];
ceq = [];
```

```
%% Restricciones / CMLI - 7 Niveles Multiángulo
```

```
M=0.9;
```

```
function [c, ceq] = constr_7M(x)
```

```
c= [
```

```
cos(x(1)*pi/180)-cos(x(2)*pi/180)+cos(x(3)*pi/180)+...
cos(x(4)*pi/180)-cos(x(5)*pi/180)+cos(x(6)*pi/180)+...
cos(x(7)*pi/180)-cos(x(8)*pi/180)+cos(x(9)*pi/180)-(3*M);
```

```
cos(3*x(1)*pi/180)-cos(3*x(2)*pi/180)+cos(3*x(3)*pi/180)+...
cos(3*x(4)*pi/180)-cos(3*x(5)*pi/180)+cos(3*x(6)*pi/180)+...
cos(3*x(7)*pi/180)-cos(3*x(8)*pi/180)+cos(3*x(9)*pi/180);
```

```
cos(5*x(1)*pi/180)-cos(5*x(2)*pi/180)+cos(5*x(3)*pi/180)+...
cos(5*x(4)*pi/180)-cos(5*x(5)*pi/180)+cos(5*x(6)*pi/180)+...
cos(5*x(7)*pi/180)-cos(5*x(8)*pi/180)+cos(5*x(9)*pi/180);
```

```
cos(7*x(1)*pi/180)-cos(7*x(2)*pi/180)+cos(7*x(3)*pi/180)+...
cos(7*x(4)*pi/180)-cos(7*x(5)*pi/180)+cos(7*x(6)*pi/180)+...
cos(7*x(7)*pi/180)-cos(7*x(8)*pi/180)+cos(7*x(9)*pi/180);
```

```
cos(9*x(1)*pi/180)-cos(9*x(2)*pi/180)+cos(9*x(3)*pi/180)+...
cos(9*x(4)*pi/180)-cos(9*x(5)*pi/180)+cos(9*x(6)*pi/180)+...
cos(9*x(7)*pi/180)-cos(9*x(8)*pi/180)+cos(9*x(9)*pi/180);
```

```
cos(11*x(1)*pi/180)-cos(11*x(2)*pi/180)+cos(11*x(3)*pi/180)+...
cos(11*x(4)*pi/180)-cos(11*x(5)*pi/180)+cos(11*x(6)*pi/180)+...
cos(11*x(7)*pi/180)-cos(11*x(8)*pi/180)+cos(11*x(9)*pi/180);
```

```
cos(13*x(1)*pi/180)-cos(13*x(2)*pi/180)+cos(13*x(3)*pi/180)+...
cos(13*x(4)*pi/180)-cos(13*x(5)*pi/180)+cos(13*x(6)*pi/180)+...
cos(13*x(7)*pi/180)-cos(13*x(8)*pi/180)+cos(13*x(9)*pi/180);
```

```
cos(15*x(1)*pi/180)-cos(15*x(2)*pi/180)+cos(15*x(3)*pi/180)+...
cos(15*x(4)*pi/180)-cos(15*x(5)*pi/180)+cos(15*x(6)*pi/180)+...
cos(15*x(7)*pi/180)-cos(15*x(8)*pi/180)+cos(15*x(9)*pi/180);
```

```
cos(17*x(1)*pi/180)-cos(17*x(2)*pi/180)+cos(17*x(3)*pi/180)+...
cos(17*x(4)*pi/180)-cos(17*x(5)*pi/180)+cos(17*x(6)*pi/180)+...
cos(17*x(7)*pi/180)-cos(17*x(8)*pi/180)+cos(17*x(9)*pi/180);
```

```
(x(9)*pi/180)-(pi/2);
(x(8)*pi/180)-(x(9)*pi/180);
(x(7)*pi/180)-(x(8)*pi/180);
(x(6)*pi/180)-(x(7)*pi/180);
(x(5)*pi/180)-(x(6)*pi/180);
(x(4)*pi/180)-(x(5)*pi/180);
(x(3)*pi/180)-(x(4)*pi/180);
(x(2)*pi/180)-(x(3)*pi/180);
(x(1)*pi/180)-(x(2)*pi/180);
-(x(1)*pi/180);
];
ceq = [];
```

Código para la optimización por enjambre de partículas simple

```
%%% PSO

clear all
clc

% --- Parámetros constantes en PSO
s = 20;           % número de partículas a evaluar
max_i = 400;     % número máx de iteraciones
n = 2;           % dimensión del problema (número de variables)
C1 = 0.12;       % constante de confianza individual C1
C2 = 1.2;        % constante de confianza colectiva C2
w = 0.9;         % momento de inercia

fun.Objetivo = @thd_5;           % se carga el archivo .m con la función objetivo

% --- Posición y velocidad inicial
pos = zeros(s,n);
for i = 1:n
    pos(:,i) = random('unif',0,90,s,1); % posición inicial
end
vel = w.*rand(s,n);             % velocidad inicial

% --- Evaluar posición actual
Fitness = zeros(s,1);           % inicializa vector de resultados para la función objetivo
for i = 1:s
    Fitness(i) = fun.Objetivo(pos(i,:)); % valor de la función objetivo para cada posición
end

% --- Gráfica posición inicial
x1=pos(:,1);
y1=pos(:,2);
z1=pos(:,3);

% --- Declara mejor local y mejor resultado de la función objetivo
Pbest = pos;
P_Fitness = Fitness;

% --- Declara mejor global y mejor resultado de la función objetivo
[G_Fitness,index] = min(P_Fitness); % declara como mejor resultado global al mínimo de la población
Gbest = repmat(Pbest(index,:),s,1); % mejor solución global/reproduce la mejor solución al tamaño de la
% población

% --- Actualiza velocidad y posición
R1 = rand(s,n);                 % vector de mejores soluciones locales
R2 = rand(s,n);                 % vector de mejores soluciones globales

vel = w.*vel+C1*(R1.*(Pbest-pos))+C2*(R2.*(Gbest-pos));
pos = pos + vel;

% --- Iteraciones
iter = 0;
while (iter < max_i)

    iter = iter+1
```

```

%--- Evaluación de la posición actual
for i = 1:s
    Fitness(i) = fun.Objetivo(pos(i,:));
end

% --- Actualiza mejor local
indexes = find(Fitness < P_Fitness);
P_Fitness(indexes) = Fitness(indexes);
Pbest(indexes,:) = pos(indexes,:);

% --- Actualiza mejor global
[G_FitnessNew,index] = min(P_Fitness);
if G_FitnessNew < G_Fitness
    G_Fitness = G_FitnessNew;
    Gbest = repmat(Pbest(index,:),s,1);
end

% --- Actualiza velocidad y posición
R1 = randn(s,n);
R2 = randn(s,n);
vel = w.*vel+C1*(R1.*(Pbest-pos))+C2*(R2.*(Gbest-pos));
pos = Pbest + vel;

% --- Gráfica del enjambre
x=pos(:,1);
y=pos(:,2);

clf
plot(x1, y1, '*','Color',[0.7,0.7,0.8])
grid on
hold on
axis([0 90 0 90]);

plot(x, y, '* b')
axis([0 90 0 90]);
title('PSO')
ylabel('Ángulo 2');
xlabel('Ángulo 1');
legend('Posición Inicial','Posición Actual');
grid on
pause(.00001)

% --- Gráfica del fitness
M = mean(P_Fitness);
F = G_Fitness;
I = iter;

hold on
plot (I,F, 'k',I,M, '.')
xlabel('Iteraciones');
ylabel('THD(%)');
pause(.1)

titletxt = sprintf('Mejor: %g Media: %g',F(end),M(end)) ;
title(titletxt)

```

```
% --- Imprime resultados
M = mean(P_Fitness);           % promedio del fitness
if (iter==1)|| (rem(iter,100)==0);
    fprintf('\nIteración - %2.0d | Mejor F(x) = %d | Media F(x) = %d\n',iter,G_Fitness,M);
    fprintf('Posiciones | x(1) = %d | x(2) = %d \n', Gbest(1,1),Gbest(1,2));
end
end
```