



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

Reducción de contenido armónico en un
Inversor Multinivel utilizando el algoritmo de
optimización basado en enseñanza-
aprendizaje

presentada por

Ing. Kenia Yadira Gómez Díaz

como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Directora de tesis

Dra. Susana Estefany de León Aldaco

Codirector de tesis

Dr. Jesús Aguayo Alquicira



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

23/enero/2023
SAC/026/2023
Autorización de impresión de tesis

**KENIA YADIRA GÓMEZ DÍAZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

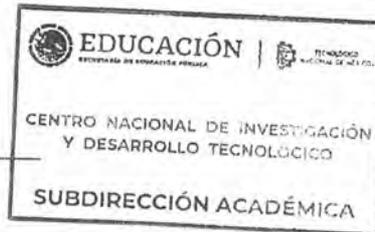
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "REDUCCIÓN DE CONTENIDO ARMÓNICO, EN UN INVERSOR MULTINIVEL UTILIZANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN ENSEÑANZA-APRENDIZAJE", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/RMA





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

16/enero/2023

DIE/002/2023

Aceptación de documentos de
tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Ing. Kenia Yadira Gómez Díaz, con número de control M2ICE033 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Reducción de Contenido Armónico, en un Inversor Multinivel Utilizando el Algoritmo de Optimización Basado en Enseñanza-Aprendizaje" 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

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

CODIRECTOR DE TESIS

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

REVISOR 1

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

REVISOR 2

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica
Cédula profesional 5999002

C.p. Lic. Silvia del Carmen Ortiz Fuentes- jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
HEE/mrsr



Agradecimientos

A mi directora de tesis la Dra. Susana Estefany De León Aldaco por ser una gran guía en esta etapa, por brindarme sus conocimientos y apoyo en todo momento, también por su disponibilidad para resolverme dudas de cualquier tipo, su paciencia y empatía.

A mi codirector el Dr. Jesus Aguayo Alquicira por sus consejos para la realización de mi tema de tesis, así como el atender mis dudas con paciencia, por su tiempo y todos los conocimientos que me transmitió a lo largo de esta etapa.

³ A mis revisores de tesis el Dr. Mario Ponce Silva y el Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino, por sus comentarios y apoyo para el desarrollo de esta tesis, por sus cuestionamientos en las presentaciones y sus contribuciones en el producto académico que se realizó.

A todos mis compañeros que fueron de gran apoyo a lo largo de las clases que nos impartieron, por los momentos de alegría y ánimo cuando fue necesario.

A mis padres Juan Gómez Torrez y María Eulalia Díaz García, por todos los sacrificios que han realizado para que yo pueda estar hoy cumpliendo esta etapa, por su amor, motivación y ánimo que me brindaron cuando se me presentaron dificultades a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis. Me han enseñado y formado para ser la persona que soy, gracias por ser mi mayor ejemplo a seguir.

A mi esposo Rafael de Jesús González Chávez, por ser un gran compañero de vida, quiero seguir desarrollándome a tu lado y cumplir todos esos objetivos y proyectos que tenemos para esta hermosa familia que hemos formado. Eres la persona que mejor me conoce y mi mayor apoyo siempre que lo necesito, gracias por tu amor, prudencia, optimismo y amistad que siempre me brindas.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por brindarme las instalaciones y la oportunidad de estudiar este posgrado, así como todos los administrativos por su tiempo y dedicación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para poder desarrollar esta tesis.

Resumen

Los inversores son dispositivos capaces de convertir el voltaje de corriente directa en voltaje de corriente alterna, y pueden ser clásicos o también denominados de dos niveles y los multiniveles. Actualmente los inversores multinivel tienen diversas aplicaciones en la industria y en la implementación de las energías limpias.

La técnica del inversor multinivel se basa en sintetizar la tensión de corriente alterna a partir de varios niveles de tensión de corriente directa. A medida que aumenta el número de niveles de tensión en el lado de la corriente directa, la forma de onda de salida añade más niveles, por lo que se va produciendo una onda escalonada que se aproxima a una onda sinusoidal con una distorsión armónica mínima.

Este trabajo presenta el análisis y la aplicación del algoritmo de Optimización Basado en Enseñanza-Aprendizaje (TLBO, por sus siglas en inglés), así como una comparación con otros algoritmos como el Algoritmo Genético (GA, por sus siglas en inglés), Evolución Diferencial (DE, por sus siglas en inglés) y Optimización por Enjambre de Partículas (PSO, por sus siglas en inglés), para la obtención de los ángulos de conmutación óptimos para disminuir la distorsión armónica total (THD).

El algoritmo TLBO y el algoritmo PSO presentaron resultados muy similares, ambos con un mejor desempeño para optimizar los armónicos en los inversores multinivel en comparación con los algoritmos GA y DE, todo esto mediante el análisis comparativo de los resultados obtenidos en este trabajo.

La simulación del inversor multinivel en cascada de 7 niveles se llevó a cabo en el software Pspice y la implementación de los algoritmos para la obtención de los ángulos de conmutación fue mediante el software Matlab.

Abstract

Inverters are devices capable of converting direct current voltage into alternating current voltage, and can be classical or also called two-level and multilevel. Multilevel inverters currently have various applications in industry and the implementation of clean energy.

The multilevel inverter technique is based on synthesizing the AC voltage from several levels of DC voltage. As the number of voltage levels on the DC side increases, the output waveform adds more levels, thus producing a step wave that approximates a sine wave with minimal harmonic distortion.

This paper presents the analysis and application of the Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) algorithm, as well as a comparison with other algorithms such as Genetic Algorithm (GA), Differential Evolution (DE) and Particle Swarm Optimization (PSO), for obtaining the optimal switching angles to decrease the total harmonic distortion (THD).

The TLBO algorithm and the PSO algorithm presented very similar results, both with better performance to optimize the harmonics in the multilevel inverters compared to the GA and DE algorithms, all this through the comparative analysis of the results obtained in this work.

The simulation of the 7-level cascaded multilevel inverter was carried out in Pspice software and the implementation of the algorithms for obtaining the switching angles was through Matlab software.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	I
Resumen.....	II
Abstract	III
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas.....	VIII
Acrónimos	IX
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Los Inversor Multinivel	1
1.2 Problemática	6
1.3 Función Objetivo	64
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo Principal	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	8
1.5 Estructura de la tesis	8
Capítulo 2. Estado del arte	10
2.1 Metodología	10
2.2 Datos obtenidos	11
2.3 Conclusión del Estado del Arte.....	17
Capítulo 3. Algoritmos bioinspirados	18
3.1 Definición	18
3.2 El algoritmo de Optimización Basado en Enseñanza-Aprendizaje (TLBO)	19
3.3 El Algoritmo Genético (GA)	23
3.4 El algoritmo Evolución Diferencial (DE).....	24
3.5 El algoritmo Optimización por Enjambres de Partículas (PSO)	25
3.6 Comparación de los parámetros de control de los algoritmos	26
Capítulo 4. Caso de estudio	28
4.1 Selección de la topología.....	28
4.2 Aplicación de los inversores multinivel	29
Capítulo 5. Simulación y resultados.....	31
5.1 Esquemático del inversor multinivel	31
5.2 Señal de la tensión de salida	32

Capítulo 6.	Comparación y discusión de resultados.....	39
6.1	Comportamiento del porcentaje de THD y los armónicos.....	39
6.2	Comparación de la eficiencia de los algoritmos.....	42
Capítulo 7.	Conclusión	45
7.1	Conclusión	45
7.2	Trabajos futuros	46
7.3	Productos académicos	46
Anexos.....		57
Anexo A.	Código TLBO [1].....	57
Anexo C.	Código GA [1]	59
Anexo E.	Código DE [1].....	62
Anexo G.	Código PSO [1].....	64
Anexo I.	Código Función Objetivo [1].....	66
Anexo J.	Código Índice de Modulación.....	67
Anexo K.	Código Restricciones	68
Anexo L.	Ejemplo Cálculos Teóricos.....	69
Anexo M.	Productos Académicos	74

Índice de Figuras

Figura 1.1 Clasificación de los inversores [3].	2
Figura 1.2 Circuito de inversor multinivel en cascada de 7 niveles y su forma de onda de la tensión de salida.	4
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la selección de los artículos a revisar para formar parte del estado del arte.	11
Figura 2.2 La gráfica representa el porcentaje de los artículos de conferencia y revista.	12
Figura 2.3 Gráfica de los años de publicación de los artículos usando el algoritmo TLBO.	13
Figura 2.4 La gráfica representa el porcentaje de las áreas a las que pertenecen los artículos.	13
Figura 2.5 La gráfica representa las subáreas de la electrónica de potencia.	14
Figura 2.6 La gráfica representa el número de niveles más usado en los inversores multinivel.	16
Figura 2.7 La gráfica representa el tipo de carga más usada en inversores multinivel.	17
Figura 3.1 Clasificación de los métodos metaheurísticos.	19
Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo TLBO.	21
Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo genético.	24
Figura 3.4 Diagrama de flujo del algoritmo DE.	25
Figura 3.5 Diagrama de flujo del algoritmo PSO.	26
Figura 3.6 Orden cronológico del desarrollo de los algoritmos utilizados en este trabajo.	28
Figura 4.1 Selección de la topología a usar como caso de estudio.	29
Figura 4.2 Diagrama de las áreas de aplicación de los inversores multinivel.	30
Figura 5.1 Esquemático del inversor multinivel de 7 niveles puente H en cascada.	32
Figura 5.2 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo TLBO.	33
Figura 5.3 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo TLBO.	33
Figura 5.4 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo GA.	34
Figura 5.5 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo GA.	34
Figura 5.6 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo DE.	35
Figura 5.7 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo DE.	35
Figura 5.8 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo PSO.	36
Figura 5.9 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo PSO.	36
Figura 6.1 Porcentaje de THD con respecto al índice de modulación que se deseaba tener.	40
Figura 6.2 Comparación de armónicos de varios métodos metaheurísticos para un inversor multinivel de 7 niveles.	41
Figura 6.3 Histograma del comportamiento de cada uno de los algoritmos en la minimización de la THD con respecto al índice de modulación.	42
Figura 6.4 Gráfica comparativa del porcentaje de THD con respecto al índice de modulación para cada uno de los algoritmos elegidos.	43
Figura 6.5 Comparación del tiempo de ejecución de los algoritmos con respecto al índice de modulación que se buscaba tener.	43

Figura 6.6 Gráfica del error absoluto de los algoritmos entre el índice de modulación deseado y el obtenido. 44

Figura 6.7 Acercamiento a la gráfica del error absoluto de los algoritmos TLBO y PSO entre el índice de modulación deseado y el obtenido. 45

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Comparación de las tres topologías de convertidores multinivel en base a la cantidad de componentes [5].</i>	5
<i>Tabla 2 Áreas de aplicación del algoritmo TLBO en la literatura.</i>	11
<i>Tabla 3 Datos sobre los artículos donde aplican el algoritmo TLBO en inversores multinivel.</i>	15
<i>Tabla 4 Comparación de los parámetros de cada uno de los algoritmos.</i>	27
<i>Tabla 5 Parámetros de simulación.</i>	30
<i>Tabla 6 Comparación de la magnitud (cuya unidad son los Volts) de los armónicos obtenidos de manera teórica.</i>	36
<i>Tabla 7 Comparación de la magnitud (cuya unidad son los Volts) de los armónicos obtenida mediante simulación.</i>	37
<i>Tabla 8 Comparación de algunas características del inversor de forma teórica.</i>	38
<i>Tabla 9 Comparación del porcentaje de THD mediante los cálculos teóricos y mediante la simulación con los ángulos de conmutación de cada uno de los algoritmos.</i>	39
<i>Tabla 10 Tiempo mínimo y máximo de ejecución de cada uno de los algoritmos.</i>	43

Acrónimos

CA – Corriente Alterna

CD – Corriente Directa

CHBMLI – Inversor Multinivel en Cascada Puente H

Cr – Factor de cruza

DCMLI – Inversor Multinivel con Diodos Enclavados

ED – Evolución Diferencial

F – Factor escala

GA – Algoritmo Genético

IGBT – Transistor Bipolar de Compuerta Aislada

IM – Índice de Modulación

MLI – Inversor Multinivel

MR – Probabilidad de mutación

OMTHD – Minimización Óptima de la Distorsión Armónica Total

PSO – Optimización por Enjambre de Partículas

PWM – Modulador de Ancho de Pulso

SHE – Eliminación Selectiva de Armónicos

SPWM – Modulación de Ancho de Pulso Sinusoidal

STACTCOM – Compensadores Estáticos

SVPWM – Modulación de Espacio Vectorial

THD – Distorsión Armónica Total

TLBO – Algoritmo de Optimización Basado en Enseñanza-Aprendizaje

W_{max} – Valor máximo del peso de inercia

W_{min} – Valor mínimo del peso de inercia

Capítulo 1. Introducción

Existe gran interés en los inversores multinivel con la finalidad de reducir el impacto ecológico y también cubrir la necesidad de brindar mayores potencias en la industria, lo cual se puede satisfacer mediante el uso de los inversores.

En la industria, existen diversas cargas como pueden ser: motores, computadoras y la red eléctrica incluso es una posible carga para el inversor. Debido a esto, es importante el correcto manejo de la energía eléctrica y la calidad de la misma para que sea entregada de manera confiable y eficiente a la red eléctrica.

La optimización ha sido una herramienta básica en todas las áreas de las matemáticas aplicadas, la ingeniería, la economía, la ciencia médica y otros campos de las ciencias. En las últimas décadas, los desarrollos tienden a usar algoritmos metaheurísticos ya que son más rápidos y eficaces que los métodos convencionales.

En el área de la ingeniería electrónica un reto puede ser el cálculo de los ángulos de conmutación óptimos en un inversor multinivel, esto mediante la solución de las ecuaciones lineales no trascendentales, en este trabajo se realiza mediante la optimización de la THD, por lo que se presenta un trabajo de OMTHD.

En este capítulo se presentan los antecedentes y el por qué se realizó esta investigación. Así como un contexto del problema de optimización de los inversores multinivel, las diferentes técnicas a usar para la solución del problema de optimización.

1.1 Los Inversor Multinivel

La técnica del inversor multinivel se basa en sintetizar la tensión de corriente alterna a partir de varios niveles de tensión de corriente directa. A medida que aumenta el número de niveles de tensión en el lado de la corriente directa, la forma de onda de salida añade más niveles, por lo que se va produciendo una onda escalonada que se aproxima a una onda sinusoidal con una distorsión armónica mínima, la cual fue establecida por la norma IEEE519 y EN50160 que establecen que la distorsión armónica total (THD) de la tensión no debe de ser mayor al 8% [1, 2].

En la Figura 1.1 se muestra la clasificación de los inversores, únicamente de las topologías más comunes:

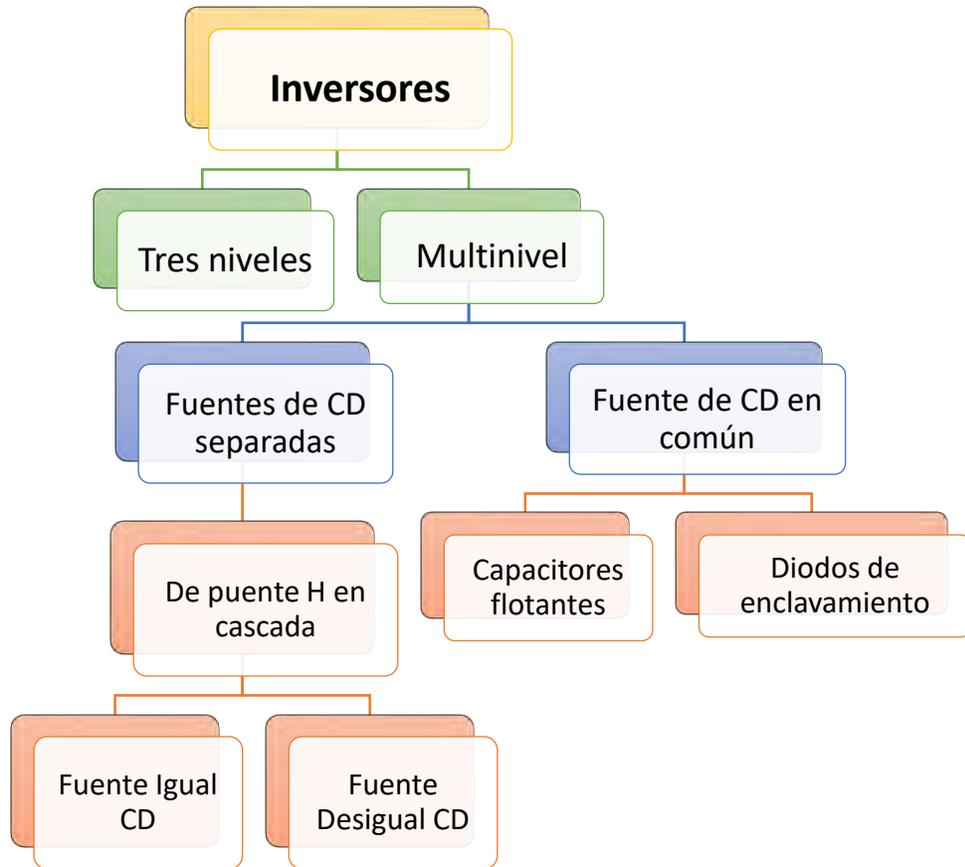


Figura 1.1 Clasificación de los inversores [3].

Como complemento a estas topologías, surgen diversas estrategias de modulación y control para los inversores multinivel. Entre estas están la modulación sinusoidal de ancho de pulso (PWM); espacio vectorial PWM, eliminación selectiva de armónicos (*SHE*); y modulación vectorial espacial (*SVM*). Entre estas cuatro estrategias de modulación, las primeras dos son de alta frecuencia de conmutación y las últimas dos son de frecuencia de conmutación fundamental.

Los métodos que utilizan bajas frecuencias de conmutación, se tratan generalmente de los semiconductores de potencia que únicamente, realizan una o dos conmutaciones durante un ciclo de las tensiones de salida, generando así una onda escalonada.

Es importante encontrar los índices de modulación para poder obtener los ángulos de conmutación en los que se tiene el menor porcentaje de THD en la onda de salida. Todo lo mencionado anteriormente, se realiza mediante la resolución de ecuaciones lineales no trascendentales, para las cuales existen métodos y algoritmos que pueden ser clasificados en tres tipos [3]:

1. Métodos algebraicos: como suma de fuerzas, teoría de los polinomios simétricos, entre otros.
2. Métodos numéricos: como Newton-Raphson, optimización gradiente, algoritmo de homotopía entre otros.
3. Algoritmos metaheurísticos: como el algoritmo genético (*GA*), evolución diferencial (*DE*), optimización por enjambre de partículas (*PSO*), optimización basada en enseñanza-aprendizaje (*TLBO*), entre otros.

Cabe añadir, que el método algebraico y el método numérico se incluyen en una sola categoría, denominada métodos convencionales. Por otro lado, los algoritmos metaheurísticos o bio-inspirados, son más recientes, pero su implementación ha tenido un incremento en algunas áreas industriales.

La principal diferencia entre los métodos convencionales y los metaheurísticos es la velocidad con la que resuelven las ecuaciones lineales no trascendentales porque son más rápidos y eficaces en la minimización de la THD. Esta diferencia se puede observar con claridad en los inversores *online* que están conectados a la línea de la red eléctrica. En este caso, un método clásico no brinda el resultado de forma eficiente y en el tiempo requerido. Este factor hace ver la importancia de explorar los métodos nuevos. Los métodos bio-inspirados consisten en maximizar o minimizar una función real eligiendo sistemáticamente valores de entrada dentro de un conjunto permitido y calculando el valor de la función. La generalización de la teoría y las técnicas de optimización a otras formulaciones constituye un amplio campo de la matemática aplicada.

En términos generales, la optimización consiste en encontrar los mejores valores disponibles de alguna función objetivo dado un dominio definido e incluye una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y de dominios. Una de las tendencias más significativas en el campo de la optimización, es el énfasis cada vez mayor en la naturaleza interdisciplinaria [4].

La presente investigación, se enfocará en el análisis de los inversores multinivel puente H en cascada cuyo circuito se muestra en la Figura 1.2, además, se muestra la onda escalonada como salida de un inversor de siete niveles. También, se presenta un desglose de cada uno de los niveles del inversor. Este circuito requiere de menor cantidad de componentes por cada nivel. Algunas aplicaciones del inversor puente H en cascada son: sistema de accionamiento del motor, fotovoltaico, baterías de combustible y sistema de baterías.

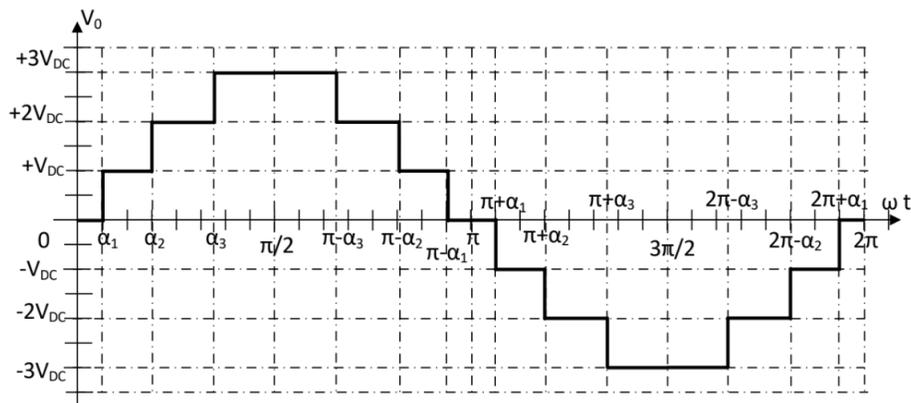
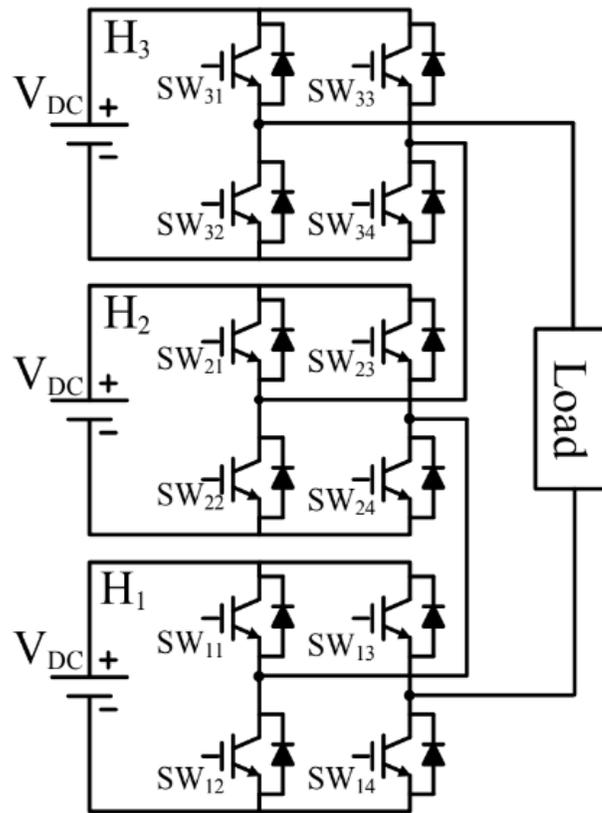


Figura 1.2 Circuito de inversor multinivel en cascada de 7 niveles y su forma de onda de la tensión de salida.

1 Este tipo de inversor tiene diferentes ventajas en comparación con las otras dos topologías. A continuación se describen dichas ventajas [5]:

1. Menor volumen, esto gracias a que consta de menor cantidad de componentes.
2. Produce tensión en modo común, se reduce el estrés.

3. Bajas distorsiones en la corriente de entrada.
4. Funciona a las dos frecuencias fundamentales de conmutación.
5. La distorsión armónica total es muy baja en la forma de onda de salida sin ningún circuito de filtrado.

Sin embargo, así como cuenta con ventajas tiene algunas desventajas [5]:

1. Se requieren fuentes de corriente continua o capacitores independientes para cada módulo.
2. Se requiere un controlador más complejo debido a la cantidad de capacitores.

La Tabla 1, muestra una comparación de las tres topologías principales de los inversores multinivel de acuerdo con los componentes que emplea, donde m representa el número de niveles de tensión, donde m representa el número de niveles.

Tabla 1 Comparación de las tres topologías de convertidores multinivel en base a la cantidad de componentes [5].

Tópico	Diodos de enclavamiento	Capacitor flotante	Cascada Puente H
Interruptores semiconductores de potencia	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diodos de acoplamiento por fase	$(m-1)(m-2)$	0	0
Capacitor del bus de CC	$(m-1)$	$(m-1)$	$(m-1)/2$
Capacitor de equilibrio por fase	0	$(m-1)(m-1)/2$	0
Desequilibrio de tensión	Medio	Alto	Muy bajo

En la tabla anterior, se aprecia que componentes se reducen en comparación con las otras dos topologías. Por esta razón, se eligió el inversor multinivel de puente H en cascada para este trabajo de tesis. En la industria siempre se busca reducir gastos y

aumentar la eficiencia en cada uno de los procesos que se requieren para obtener las máximas ganancias. Además, lo principal es que en esta topología el THD incluso sin filtro alguno es menor a las otras dos.

1.2 Problemática

El propósito principal de esta investigación es reducir el THD en la señal de salida de un inversor debido a los problemas que se presentan al obtener un alto porcentaje de THD. Algunos de estos problemas son los siguientes:

1. Sobrecalentamientos en los conductores.
2. Malfuncionamiento de los aparatos eléctricos y electrónicos.
3. Sobrecalentamiento en los motores.

El efecto de las armónicas y desbalances en el sistema sobre los motores, se presenta principalmente en el calentamiento del mismo provocando pérdidas en el núcleo. Además, provoca pares parásitos en la flecha del motor, provocando pares pulsantes, es decir, vibración. Finalmente, eso es un estrés para el mismo y provoca una reducción del tiempo de vida útil. Por otro lado, en el caso del equipo electrónico, las corrientes armónicas provocan la distorsión de las tensiones en los nodos de alimentación, esta distorsión de la tensión provoca la mala operación de dispositivos electrónicos más sensibles, tales como controladores lógicos programables (PLC, por sus siglas en inglés), equipos de control y procesos en donde su sincronización depende de los cruces por cero de la tensión. Gran cantidad de estos equipos requieren de una alimentación totalmente limpia para su correcta operación [6].

El factor de potencia de distorsión describe como el armónico la distorsión de una corriente de carga disminuye la potencia media transferido a la carga. Las cargas no lineales con un espectro armónico idéntico, conectado a una red de distribución trifásica, provocó una acumulación del tercer armónico y sus múltiplos desiguales (9, 15, 21, entre otros) en el neutro o conductor neutro de protección a tierra (PEN, por sus siglas en inglés). Esto puede causar una sobrecarga de estos conductores. Como la corriente en esos conductores normalmente no se supervisa, existe el riesgo de que se sobrecalienten y se incendien [7].

En los equipos de medición de energía, también afecta la THD porque los equipos de medición más usados en el mundo son los wattmetros de inducción, los cuales ocupan más del 90% del total de los medidores instalados. El principio de funcionamiento de un wattmetro de inducción se basa en que las formas de onda,

tanto de la tensión como de la corriente, son totalmente senoidales. Esto provoca que los wattmetros tengan mayor porcentaje de error en su medición. Este error es proporcional al porcentaje de distorsión armónica total que exista en la onda [6].

1.3 Función Objetivo

Gracias al análisis de Fourier, la señal de la tensión de salida de una onda escalonada se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$v_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{CD}}{n\pi} [\sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k)] \sin(n\omega t) \quad (1)$$

Al ser una señal con simetría de un cuarto de onda n se define como el orden del armónico impar (1,3,5,7, ... n), s se define como el numero de etapas del inversor multinivel, k es un número entero positivo (1,2, 3,... s) y θ_k es el k -ésimo ángulo de conmutación, que debe de cumplir las siguientes restricciones:

$$\theta_1 < \theta_2 < \dots \theta_s < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

Al realizar una expansión de la ecuación (1) se tiene la siguiente ecuación:

$$b_n = \frac{4V_{CD}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots \cos(n\theta_s)] \quad (3)$$

De acuerdo a la norma IEEE-519 se deben de evaluar al menos 50 armónicos y se calcula el porcentaje de THD con la ecuación (4), con la finalidad de determinar la calidad de la señal de salida de un inversor.

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

Donde n se define como el orden del armónico impar (1,3,5,7, ... 49), V_1 es el valor de del primer armónico, es decir el voltaje fundamental y V_n^2 se refiere a $\left(\frac{4V_{CD}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots \cos(n\theta_s)] \right)^2$, cumpliendo las restricciones representadas en la ecuación (2).

Finalmente se establece la función objetivo involucrando el índice de modulación (IM) y el porcentaje de THD ya que el problema de optimización era encontrar los ángulos de conmutación óptimos para determinado índice de modulación y poder realizar un barrido desde 0.44 hasta 1.16. El término de la función del IM esta dado por el valor absoluto del error requerido para ajustar el armónico fundamental. De tal forma que la ecuación quedo de la siguiente manera:

$$FO = |V_1^* - V_1| + \%THD \quad (5)$$

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

- Estudiar el algoritmo de optimización basado en enseñanza-aprendizaje para la reducción de armónicos en inversores multinivel.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Análisis del algoritmo de optimización basado en enseñanza-aprendizaje (estado del arte).
- Estudio y selección de la topología para el inversor multinivel, caso de estudio.
- Diseño y simulación del inversor multinivel.
- Análisis del funcionamiento y orientación de la aplicación del algoritmo de optimización basado en enseñanza-aprendizaje para el cálculo de los ángulos de conmutación para el inversor seleccionado como caso de estudio.
- Adaptación del algoritmo de optimización basado en enseñanza-aprendizaje y el inversor multinivel mediante pruebas de simulación.
- Evaluación de los resultados.

1.5 Estructura de la tesis

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte del algoritmo TLBO en la optimización de problemas del área de ingeniería electrónica.

En el capítulo 3 se describen los algoritmos bioinspirados, así como algunas de sus características e historia del desarrollo de los mismos.

En el capítulo 4 se presenta el caso de estudio elegido y la justificación de las decisiones que se tomaron a lo largo de la selección del caso de estudio.

En el capítulo 5 se muestra la simulación y resultados, donde se puede ver el esquemático implementado del inversor multinivel, así como las señales de la tensión de salida del inversor.

En el capítulo 6 se presenta finalmente la comparación y discusión de los resultados de este trabajo, mediante algunas graficas que resumen los datos obtenidos a lo largo de esta investigación.

En el capítulo 7 se muestran las conclusiones y posibles trabajos futuros para complementar esta investigación, así como los productos académicos que se desarrollaron a lo largo de esta tesis.

Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se presentará el proceso que se llevó a cabo para la búsqueda de la literatura que formaría parte del estado del arte. Teniendo como primer subtítulo la metodología para la selección de los artículos, que se obtuvo a través del análisis de los mismo y algunas graficas que resumen los datos obtenidos.

2.1 Metodología

En primer lugar, se buscaron artículos que realizaran un survey o una revisión sistemática del algoritmo TLBO. También se analizó si se enfocaban en el área de ingeniería electrónica o si abarcaban todas las áreas siempre y cuando tuvieran una aplicación de optimización mediante este algoritmo. Gracias a esto se observó la necesidad de presentar directamente aquellos artículos del algoritmo TLBO en el área de la ingeniería electrónica, ya que no existían tantos artículos que pudieran resumir este algoritmo que permitieran tener un acercamiento directo y fácil de entender sobre TLBO. Esta búsqueda definió el enfoque que se tendría en la búsqueda de la literatura.

El estado del arte de este trabajo involucra a todos aquellos artículos donde se aplicó el algoritmo Teaching Learning Based Optimization (TLBO) al área de la ingeniería electrónica, analizando y clasificando publicaciones del período 2013 - 2021.

La búsqueda de publicaciones se inició en diversas bases de datos y buscadores como IEEExplore, Springer Nature, ScienceDirect y SciELO, entre otros. El universo de publicaciones analizadas y clasificadas es de 63 artículos relacionados con la optimización mediante el algoritmo TLBO en el área de la ingeniería electrónica.

El proceso de selección de los artículos a revisar se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.1, donde se pueden entender los pasos seguidos para la selección de los 63 artículos, uno de los primeros pasos fue la selección de las palabras clave, que fueron "TLBO electronic engineering", "TLBO Multilevel Inverter", "Electronic TLBO", "Electronic optimization TLBO".

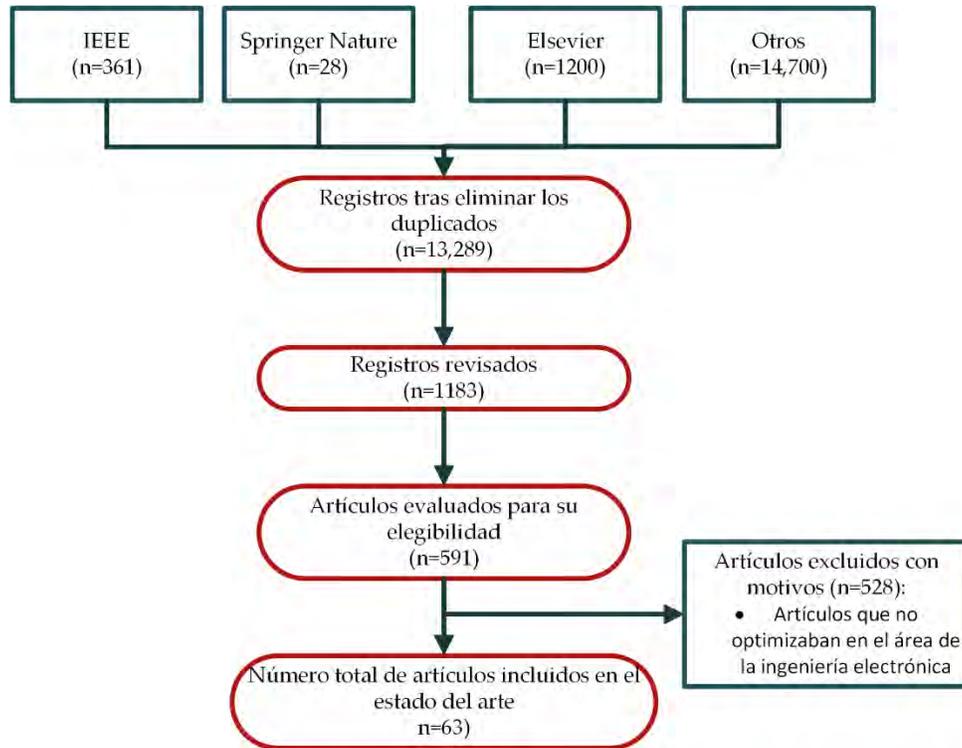


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la selección de los artículos a revisar para formar parte del estado del arte.

2.2 Datos obtenidos

En la Tabla 2 se muestran las áreas, años, referencias y aplicaciones que se pueden encontrar en la literatura sobre el algoritmo TLBO en ingeniería electrónica, a partir de esta clasificación también se realizaron algunas graficas de pastel para ilustrar más detalladamente los resultados de este estado del arte.

Tabla 2 Áreas de aplicación del algoritmo TLBO en la literatura.

Área	Aplicación	Año	Referencia
Electrónica de Potencia	Inversores Multinivel, Generación y Distribución de Energía, Otros	2014-2021	[8-46]
Control	PID, Otros	2014-2020	[47-58]

Electromagnetismo	Máquinas Eléctricas y Otros	2016-2019	[59-62]
Electrónica Digital	Filtros y Cámaras	2013-2020	[63-65]
Electrónica Analógica	Antenas y Filtros	2016-2020	[66-68]

De estos artículos se clasificó el porcentaje de los que son de revista y aquellos que son de conferencia. De acuerdo a la Figura 5 el 77% son publicaciones de revista.

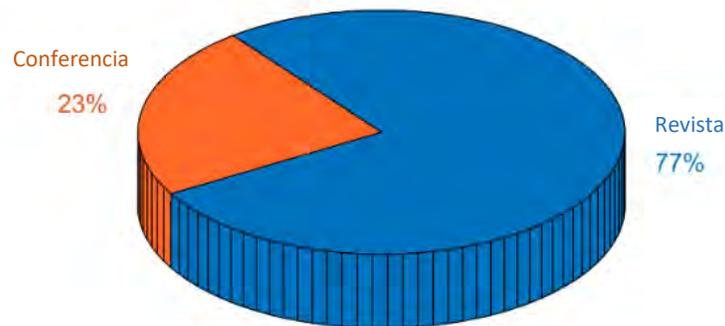


Figura 2.2 La gráfica representa el porcentaje de los artículos de conferencia y revista.

Esta investigación se centra en el estado del arte del algoritmo TLBO aplicado en subáreas de la electrónica, como la electrónica de potencia, el control eléctrico o electrónico, la electrónica analógica, la electrónica digital y el electromagnetismo.

La figura 2.3 muestra un histograma con el número de publicaciones por año de publicación en la publicación de artículos del algoritmo TLBO.

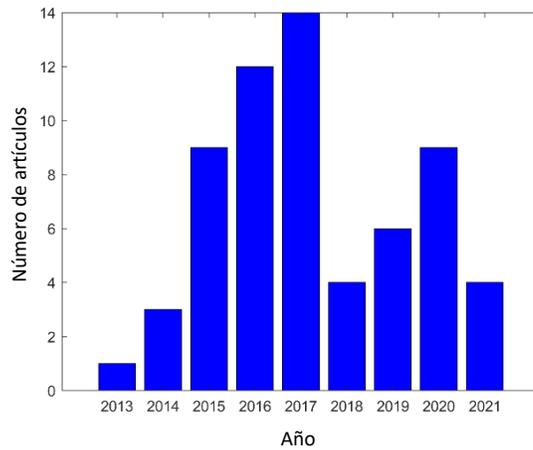


Figura 2.3 Gráfica de los años de publicación de los artículos usando el algoritmo TLBO.

La búsqueda de publicaciones en las distintas bases de datos se centró en la aplicación del algoritmo TLBO en el ámbito de la ingeniería electrónica. Para organizar la información recopilada se dividió en cinco categorías: electrónica de potencia, control, electromagnetismo, electrónica digital y electrónica analógica. La Figura 2.4 muestra la distribución porcentual de cada categoría.

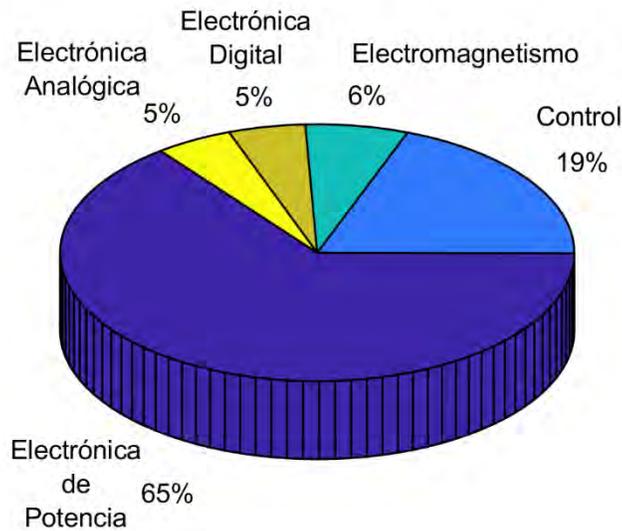


Figura 2.4 La gráfica representa el porcentaje de las áreas a las que pertenecen los artículos.

La Figura 2.5 muestra la distribución porcentual de la categoría de electrónica de potencia, que se divide en tres subáreas: inversores multinivel, generación y distribución de energía y otros.

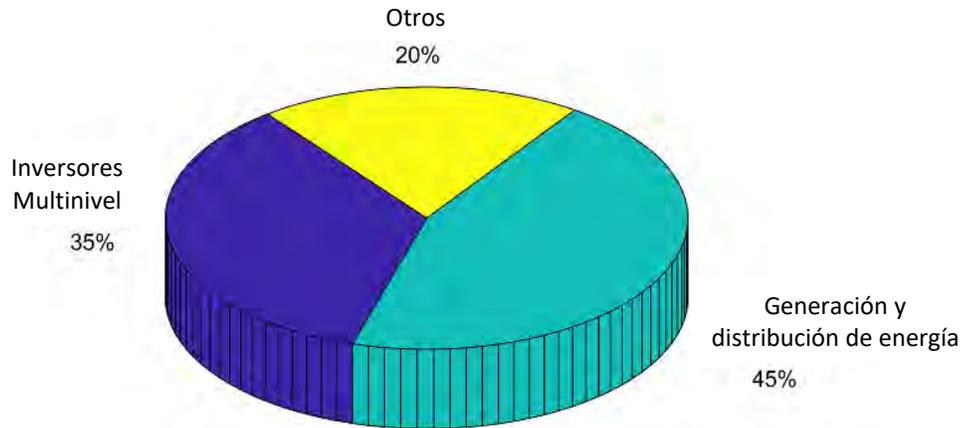


Figura 2.5 La gráfica representa las subáreas de la electrónica de potencia.

La mayor contribución, con un 45%, corresponde al tipo de aplicaciones relacionadas con la generación y distribución de energía, que incluye los STATCOM, las redes de distribución, el diseño de sistemas energéticos y la monitorización del punto de máxima potencia, entre otros. El 35% corresponde exclusivamente a los inversores multinivel. Finalmente, la contribución del 20% corresponde a aplicaciones etiquetadas como "otras", donde se abordan temas como la obtención de parámetros de modelos fotovoltaicos, sistemas de potencia híbridos AC/DC, convertidores DC-DC, vehículos eléctricos y compensación del factor de potencia.

Resulta especialmente interesante analizar con más detalle los artículos agrupados en el tipo de aplicación de los inversores multinivel, ya que los 14 artículos que componen el 35% de las subáreas de electrónica de potencia pertenecen al mismo tema de aplicación, en comparación con el área de generación y distribución de energía, que aunque es mayoritaria implica más temas de aplicación como las redes de distribución, el diseño de sistemas de potencia, el seguimiento global del punto de máxima potencia.

En los artículos sobre los inversores multinivel, se presentan las tres topologías de inversores multinivel (MLI) más utilizadas, que son los diodos de enclavamiento, los condensadores flotantes y el puente H en cascada. En ellas se buscaba reducir el porcentaje de distorsión armónica total (THD). La razón principal para reducir la THD en la señal de salida de un MLI son los problemas que se producen cuando se obtiene un alto porcentaje de THD.

La Tabla 3, muestra información más detallada de los artículos relacionados con los inversores multinivel. La mayoría de los artículos comparan el algoritmo TLBO con otros algoritmos de optimización como el Algoritmo de Depredadores Marinos

(MPA), el Algoritmo de Polinización de Flores (FPA), un algoritmo híbrido que combina el algoritmo PSO con el Optimizador del Lobo Gris (GWO), que se resume como PSOGWO, La optimización basada en el aprendizaje elitista (ETLBO), las técnicas de control PI acopladas al algoritmo de optimización basada en el aprendizaje (TLBOPI), el sistema de inferencia neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS), el control lógico difuso (FLC), así como los métodos clásicos como el Newton-Raphson (NR). La palabra “niveles” que se encuentra en la primera columna representa el número de niveles y en la última columna Ref significa referencia, CHMLI significa Inversor Multinivel de Puente H en Cascada y DCMLI significa Inversor Multinivel de Diodos. También se puede observar la eficiencia del algoritmo TLBO en este tipo de aplicaciones, ya que en casi todos los artículos se obtuvo un porcentaje de THD inferior al 10%.

Tabla 3 Datos sobre los artículos donde aplican el algoritmo TLBO en inversores multinivel.

Niveles	Año	Carga	Resultados (%THD)	Ref
CHMLI				
5	2019	R	No específica	[34]
7	4 2017	R	Línea= 11.53 Fase=10.33	[8]
	2018	R	Caso1= 8.20 Caso2= 7.70	[35]
	2016	R	NR= 8.86 TLBO= 6.95	[36]
	2020	R	FLC= 7.77 TLBO= 2.13 ANFIS=1.68	[37]
	2015	R	Línea= 9.45 Fase= 13.3	[38]
	2017	R	Línea= 5.98 Fase= 18.89	[39]
	2021	R	TLBO= 8.2 MPA= 5.5 FPA=6.1 PSOGWO=8.2	[40]
	2020	R	TLBO= 5.2 PSO= 6.22	[41]
	2017	R	TLBO=5.95	[42]
27	2020	R	ETLBO= 4.0 NR= 3.02	[43]
DCMLI				
5	2016	RL	41.13	[44]
7	2014	RL	TLBO= 8.1 ETLBO= 9.0	[45]
Modular				
9	2020	R	7.3	[46]

En estos artículos se obtuvo información muy relevante sobre el número de niveles, el tipo de carga más utilizada y cuánto se redujo el porcentaje de THD con respecto

a otros algoritmos, algunos de estos artículos se obtuvieron gracias a la optimización de la siguiente función objetivo [8, 39, 42]:

$$10 \times |V_1^* - V_1| + THD_{Phase} \quad (6)$$

Donde V_1^* es el índice de modulación de la componente fundamental y varía de cero a uno, V_1 es el índice de modulación que se utilizó para la eliminación de uno de los armónicos, y $|V_1^* - V_1|$ es el valor absoluto del error, necesario para ajustar el armónico fundamental. Se aplicó un factor de ponderación igual a diez a los términos de error para aumentar la importancia de la componente fundamental. La componente fundamental casi alcanza los valores deseados, así como la mínima THD posible en la salida con el factor de ponderación presentado. Las variables de decisión serían los ángulos de conmutación que deben cumplir ciertas características presentadas en la Ec. (7), éstas también pueden ser definidas como restricciones [8, 39, 42].

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

La Figura 2.6, muestra el número de niveles de tensión con su respectivo porcentaje. Como se puede observar, el inversor multinivel de 7 niveles es el más común, que tiene tres variables de decisión, es decir, tres ángulos de conmutación; cuantas más variables de decisión, mayor es la complejidad del problema a optimizar, por lo que hay un porcentaje menor en los inversores de 9 y 27 niveles.

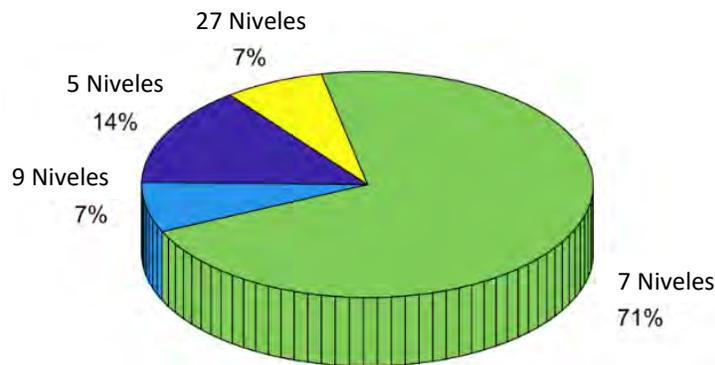


Figura 2.6 La gráfica representa el número de niveles más usado en los inversores multinivel.

La Figura 2.7, muestra la distribución porcentual según el tipo de carga utilizada en el inversor. El 86% de las publicaciones analizadas utilizan carga resistiva (R), y el 14% son para la carga resistiva-inductiva (RL).

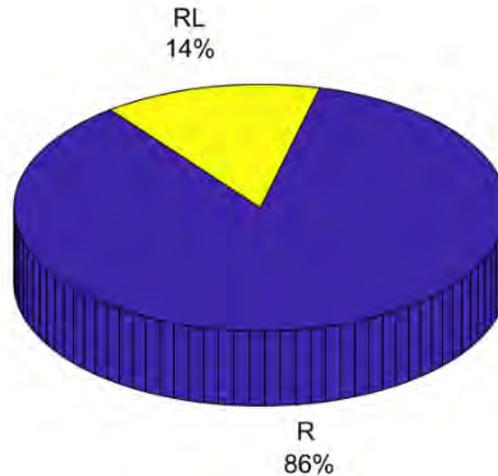


Figura 2.7 La gráfica representa el tipo de carga más usada en inversores multinivel.

Se observa que hay artículos recientes sobre este tipo de aplicaciones ya que el algoritmo podría considerarse moderno, lo que aumenta el interés por implementarlo y estudiarlo en una gran variedad de áreas de aplicación [69], un ejemplo de ello es en los inversores multinivel gracias a las características que tiene el algoritmo.

2.3 Conclusión del Estado del Arte

Mediante el análisis del estado del arte que se presentó en este capítulo se pudo definir el caso de estudio para esta tesis, el cual sería un inversor multinivel monofásico de 7 niveles con carga resistiva. También se pudo observar el interés que tienen los investigadores en este tipo de temas y en general en el área de la ingeniería electrónica.

En los artículos mostrados en todas las tablas y gráficas, se puede observar la eficiencia del algoritmo TLBO en este tipo de aplicaciones, es decir, en el cálculo de los ángulos de conmutación para la minimización del porcentaje de THD en el área del inversor multinivel, también en las demás áreas es una buena opción para optimizar. También se observa que hay artículos recientes en todo tipo de aplicaciones, esto debido a que el algoritmo podría considerarse joven o reciente, lo que aumenta el interés por implementarlo y estudiarlo en una gran variedad de áreas de aplicación. TLBO ha sido utilizado para resolver problemas de optimización multiobjetivo y ha logrado algunos resultados notables. Por lo tanto, estudiar y ampliar las variantes multiobjetivo del algoritmo TLBO para resolver problemas multiobjetivo es también un reto para los futuros investigadores interesados en este algoritmo, o también en el área de los inversores multinivel y los métodos metaheurísticos.

Capítulo 3. Algoritmos bioinspirados

En este capítulo se podrá brindar información sobre los algoritmos bioinspirados, así como su definición y algunas de sus características, para poder tener una idea general de su uso en la optimización de problemas de ingeniería. También a partir de esta idea explicar cada uno de los algoritmos a utilizar en esta tesis y una breve comparación de los mismos.

3.1 Definición

Las áreas de optimización abarcan gran cantidad de disciplinas y aplicaciones como puede ser desde diseño, planeación de negocios, hasta aplicaciones industriales. Sin embargo, algunos problemas de optimización pueden llegar a ser un complicados de resolver, especialmente los problemas que son no lineales, o bien problemas de gran magnitud. Actualmente los algoritmos bioinspirados se están volviendo muy populares para resolver problemas de manejo de datos y de optimización.

A partir de los años 60, comenzó a aparecer el algoritmo genético el cual imita la teoría de la evolución de Darwin, este usa cruza, mutación y selección como operadores básicos para realizar las operaciones. Al mismo tiempo L.J. Fogel y sus colegas comenzaron a estudiar la inteligencia artificial, lo que dio paso al desarrollo de la programación evolutiva. Actualmente esos algoritmos y muchos algoritmos nuevos son parte de los algoritmos evolutivos, también denominada computación evolutiva.

²⁶ Los algoritmos bioinspirados se basan en emplear analogías con sistemas naturales o sociales para la solución de problemas. Estos algoritmos simulan el comportamiento de sistemas naturales para el diseño de métodos heurísticos no determinísticos de búsqueda, aprendizaje, comportamiento, etc. Algunas de sus principales características es que no son determinísticos,⁶¹ a menudo presentan una estructura paralela es decir múltiples agentes y también son adaptativos, ya que utilizan una realimentación con el entorno para modificar el modelo y los parámetros, hasta llegar a una solución óptima. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama con la clasificación de los métodos de optimización.

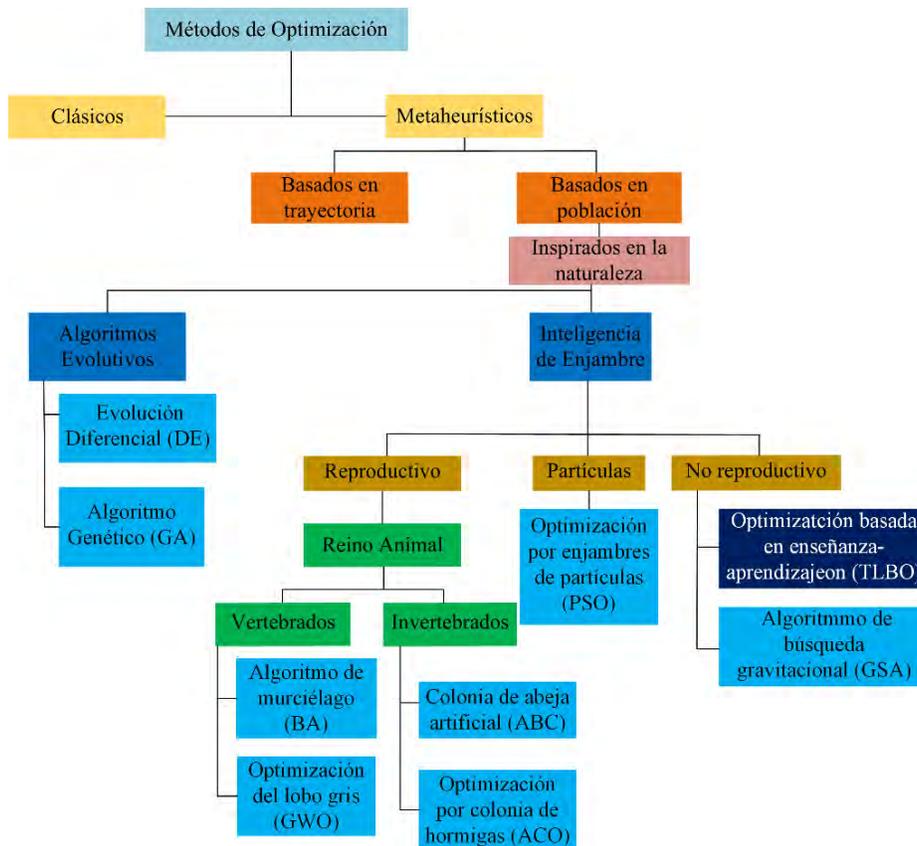


Figura 3.1 Clasificación de los métodos metaheurísticos.

3.2 El algoritmo de Optimización Basado en Enseñanza-Aprendizaje (TLBO)

El algoritmo TLBO fue introducido originalmente por el doctor V. Rao en el año 2011 [70], y se inspira en la filosofía del proceso de enseñanza-aprendizaje en un aula e imita la influencia de un profesor en los resultados de los alumnos. Al igual que otros algoritmos de inteligencia de enjambre, TLBO es un algoritmo de optimización estocástica heurística basado en la población. Ha tenido gran popularidad debido a algunas características propias del algoritmo TLBO, como su concepto y que no requiere parámetros específicos, es rápido y fácil de implementar, se ha aplicado ampliamente para resolver numerosos problemas en diversas áreas de ingeniería [71].

El algoritmo TLBO se basa en el impacto que ejerce el profesor sobre los alumnos de la clase. Al igual que los algoritmos inspirados en la naturaleza, el TLBO es también un enfoque basado en la población que utiliza como población de explicaciones para remitir a la resolución global, sin embargo, el camino no tiene un parámetro especificado por el usuario. Una colección de estudiantes se considera la población.

Cada estudiante se considera una persona. A través del algoritmo TLBO, los diversos temas presentados a los estudiantes se ven como diversos elementos del esquema. El resultado del aprendizaje de un estudiante es será similar a la aptitud como ocurre en los diferentes algoritmos de optimización. El procedimiento de TLBO se divide en un par de etapas. La primera etapa se compone de la "fase del profesor" y la otra de la "fase del alumno". La "fase del profesor" es donde los estudiantes aprenden a través del profesor, es decir, cuando imparte la lección y la "fase del alumno" se refiere al aprendizaje a través de la interacción que existe entre los alumnos, todo esto es ejecutado de forma aleatoria [72].

En la Figura 3.2, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo TLBO, como se puede observar el usuario proporciona una población, un número de temas, es decir, el diseño de las variables y también los criterios de terminación, posteriormente calcula algunos otros parámetros como el valor promedio de cada variable, establece la mejor solución y de ahí comienza la iteración donde calcula otra mejor solución y si cumple los parámetros y es mejor la primera, se coloca como la nueva mejor solución o bien comienza a realizar otro cálculo hasta encontrar una mejor solución. Posteriormente compara dos soluciones elegidas de forma aleatoria, se selecciona la mejor de esas dos y se comparan con la que se había establecido como mejor solución, si es mejor vuelve a sustituir a la que se había elegido como profesor hasta cumplir los criterios de terminación y se reporta la mejor solución obtenida en base a las iteraciones realizadas.

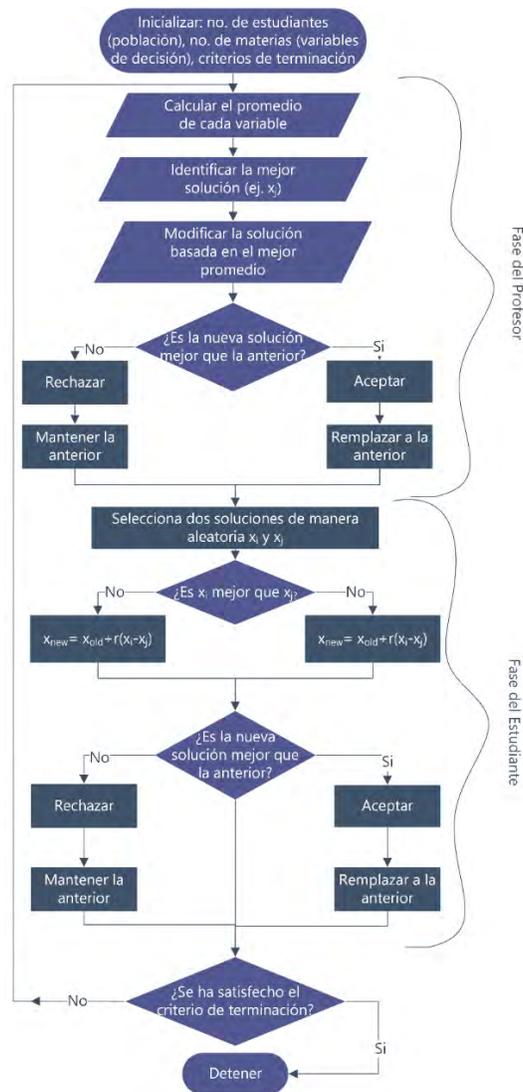


Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo TLBO.

1. Inicialización: el usuario proporciona una población (número de alumnos), las variables de decisión o de diseño (número de temas), y el criterio de terminación es el número máximo de iteraciones.

2. Fase del profesor: Es la primera parte del algoritmo en la que los alumnos aprenden a través del profesor. Durante esta fase, el profesor intenta aumentar la puntuación media de la clase en la asignatura que imparte según su capacidad. En cualquier iteración i , se supone que hay "m" número de asignaturas (es decir, variables de diseño), "n" número de alumnos (es decir, tamaño de la población, $k = 1, 2, \dots, n$) y $M_{j,i}$ es el resultado medio de los alumnos en una asignatura particular "j" ($j = 1, 2, \dots, m$). El mejor resultado global $X_{total-kbest,i}$ considerando todas las asignaturas juntas obtenido en toda la población de alumnos puede considerarse como el

resultado del mejor alumno kbest. Sin embargo, como se suele considerar que el profesor es una persona muy preparada que entrena a los alumnos para que puedan obtener mejores resultados, el algoritmo considera que el mejor alumno identificado es el profesor.

3. Fase de aprendizaje: Es la segunda parte del algoritmo en la que los alumnos aumentan sus conocimientos interactuando entre ellos. Un alumno interactúa aleatoriamente con otros alumnos para mejorar sus conocimientos. Un alumno aprende cosas nuevas si el otro alumno tiene más conocimientos que él. El que proporcione el mejor resultado a la función es el que será elegido y terminará el proceso cuando se cumpla el criterio de terminación que se estableció en la etapa de inicialización.

Todo lo anterior nos permite decir que el algoritmo TLBO se desarrolla en los siguientes pasos:

- 1) Formulación de la función objetivo o función de aptitud.
- 2) Inicialización de los parámetros de optimización y de los límites de las variables.
- 3) Generación de una población aleatoria. La población se expresa como:

$$Población = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{P_n,1} & x_{P_n,2} & \dots & x_{P_n,D} \end{bmatrix} \quad (8)$$

- 4) Fase del profesor: La media de la variable particular puede calcularse como la siguiente ecuación.

$$M_{*,D} = [m_1, m_2, \dots, m_D] \quad (9)$$

- 5) La mejor solución será considerada como maestro para esa iteración:

$$X_{teacher} = X_{(f(X)=\min)} \quad (10)$$

- 6) Ordenar la nota de cada variable de cada alumno y se calcula el nuevo destete. La diferencia entre dos medias se puede calcular con la siguiente ecuación, TF puede ser considerado como 1 o 2.

$$Difference_{*,D} = r(M_{new,D} - T_F \times M_{*,D}) \quad (11)$$

- 7) Actualizar los valores añadiendo la diferencia a la solución anterior.

$$X_{new,D} = X_{old,D} + Difference_{*,D} \quad (12)$$

8) Fase de aprendizaje, en esta segunda fase, la transferencia de conocimientos se produce entre las interacciones mutuas entre los alumnos. Las ecuaciones matemáticas son las siguientes:

$$\begin{cases} X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_i - X_j) \\ X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_i - X_j) \end{cases} \quad (13)$$

9) El proceso finalizará sólo si se alcanza la generación máxima, de lo contrario se repetirá todo el proceso.

3.3 El Algoritmo Genético (GA)

Desarrollado en 1975 por John Henry Holland, el algoritmo genético es una técnica de búsqueda basada en la evolución que funciona de forma

aleatoria y basada en la teoría de Darwin. Utiliza datos históricos y actuales para ser analizarlos en el futuro. Esto sigue las reglas de "Supervivencia del más apto". Esto hace uso de la mejor programación mediante la cual se asignan las tareas a los recursos de acuerdo a la función aptitud para cada parámetro del proceso de programación. El concepto de algoritmo genético aplicado a la optimización consta de cuatro pasos principales:

1. Iniciación de la población
2. Evaluación de la función objetivo
3. Selección
4. Aplicación de operadores genéticos.

El algoritmo genético (GA) es un algoritmo de optimización que se inspira en la selección natural. Es un algoritmo de búsqueda basado en la población, que utiliza el concepto de supervivencia del más apto [73]. En la Figura 3.3, se muestra un diagrama de flujo del algoritmo genético.



Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo genético.

3.4 El algoritmo Evolución Diferencial (DE)

La evolución diferencial (DE) en la sección de evolución y pertenece a la clase de los algoritmos evolutivos. La DE es un método desarrollado por Kenneth Price y publicado en 1994. Este algoritmo es un método matemático de optimización para funciones multidimensionales. DE incluye el tipo de algoritmo evolutivo. Los principales procedimientos son la inicialización, la mutación, el cruce o recombinación y selección [74]. Este algoritmo consta de las siguientes 5 etapas:

1. Configuración de los parámetros, esto involucra los parámetros de control, así como los parámetros de inicialización.
2. Inicialización, se genera la población inicial.
3. Mutación, el proceso de mutación realizado después de la primera generación de la población obtenida, en esta etapa influye el parámetro de control denominado factor de mutación.

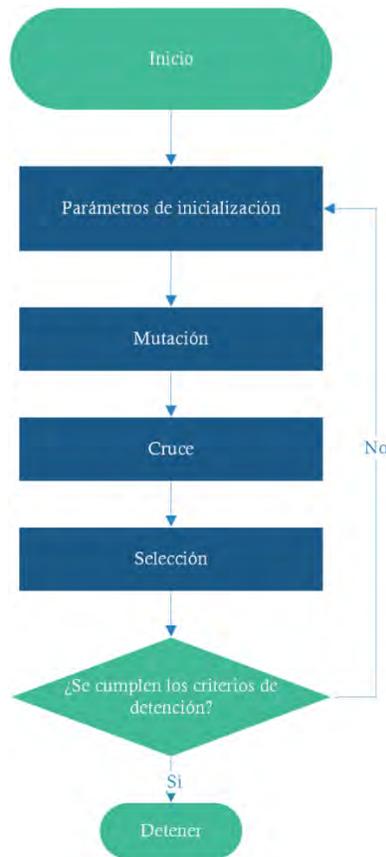


Figura 3.4 Diagrama de flujo del algoritmo DE.

3.5 El algoritmo Optimización por Enjambres de Partículas (PSO)

Desarrollado en 1995 por J. Kennedy y R. Eberhart la metodología PSO es una herramienta muy potente para la optimización de funciones no lineales. Físicamente, esto imita a una bandada de pájaros que se comunican juntos mientras vuelan. Cada pájaro mira en una dirección específica, y luego, al comunicarse entre sí, identifican al pájaro que está en la mejor ubicación. En consecuencia, cada pájaro acelera hacia el mejor pájaro utilizando una velocidad que depende de su posición actual. Cada pájaro, entonces, investiga el espacio de búsqueda desde su nueva posición local, y el proceso se repite hasta que la hasta que la bandada llegue al destino deseado. Es importante señalar que el proceso implica tanto la interacción social como la inteligencia, de modo que las aves aprenden de su propia experiencia (búsqueda local) y de su propia

experiencia (búsqueda local) y también de la experiencia de otros global). En la Figura 3.5, se muestra el diagrama de flujo básico del algoritmo PSO, se determina como básico porque es de aquel algoritmo que no tiene variaciones o mejoras.

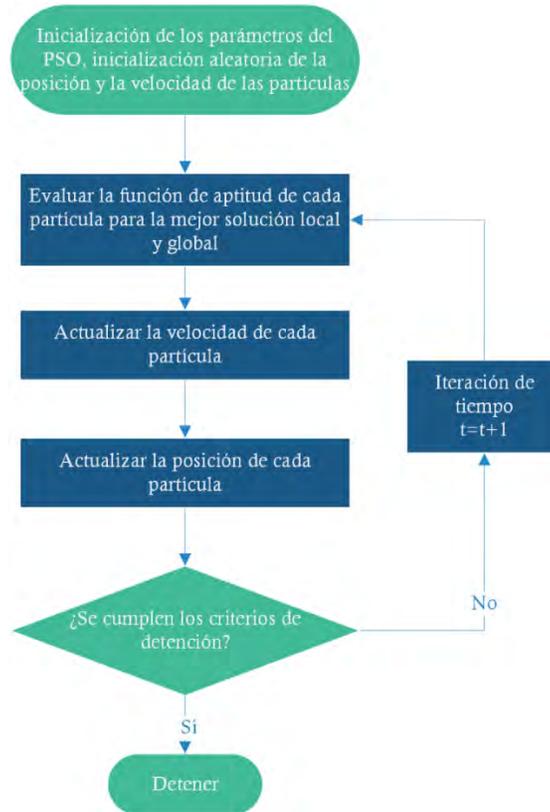


Figura 3.5 Diagrama de flujo del algoritmo PSO.

3.6 Comparación de los parámetros de control de los algoritmos

Una de las propiedades más importantes que señala el autor del algoritmo TLBO es que es que no tiene parámetros, es decir que no requiere parámetros de control, únicamente requiere de los parámetros de inicialización que engloba a la población, el número máximo de iteraciones y también el número de evaluación de la función en caso de que se requiera reducir para la obtención de un menor tiempo, sin embargo estos parámetros son un requisito para el uso de cualquier algoritmo como se puede observar en la Tabla 4, ya que como se puede observar en esos parámetros se colocó el mismo valor para todos los métodos elegidos, pero es claro que aparte de esos datos, en el caso de GA, DE y PSO se requieren otros parámetros denominados de control ya que estos van a determinar el comportamiento de cada uno de los algoritmos, ya que son parte fundamental en la ejecución de las

ecuaciones que componen a dichos métodos. En este caso el algoritmo que más parámetros de control requiere es el algoritmo PSO que tiene 4 parámetros de control. En este caso estos parámetros fueron tomados de la literatura que existe para fines únicamente comparativos con el algoritmo analizado, pero en el caso de tener un nuevo problema de optimización estos parámetros se deben de evaluar uno a uno y determinar en qué combinación de los valores se tiene un comportamiento óptimo para lo esperado en cada uno de los problemas.

Tabla 4 Comparación de los parámetros de cada uno de los algoritmos.

Algoritmo	TLBO	GA		DE		PSO		
Población	20	20	20	20	20	20		
Iteraciones	50	50	50	50	50	50		
Número de Evaluación de la Función	50	50	50	50	50	50		
Parámetros de Control	No tiene	CR	MR	CR	F	c1, c2	W_{max}	W_{min}
Valor	-	0.8	0.2	1	0.8	2	0.9	0.4

El algoritmo de principal interés es el TLBO, y se decidió que se compararía con otros algoritmos para la validación de los resultados con aquellos algoritmos que tienen más tiempo de implementación en diversas áreas, pero sobre todo en inversores multinivel, para tener mayor acceso a literatura y poder generar estadísticas al respecto. Por esto se muestra en la Figura 3.6 una línea del tiempo de la creación de los algoritmos para poder tener una idea de la diferencia de tiempo que existe en su creación.

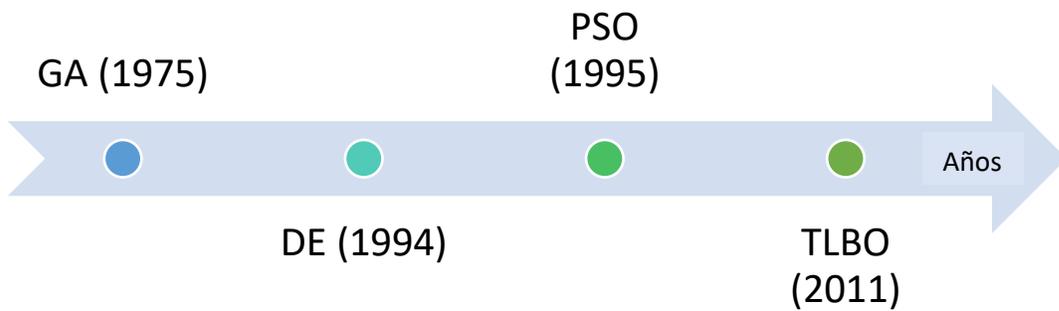


Figura 3.6 Orden cronológico del desarrollo de los algoritmos utilizados en este trabajo.

Capítulo 4. Caso de estudio

Como se mencionó en el capítulo 1, los inversores son dispositivos capaces de convertir el voltaje de corriente directa en voltaje de corriente alterna, existen diversas topologías típicas para realizar esta acción como pueden ser de capacitores flotantes, diodos de enclavamiento y de puente H en cascada. Como también se mencionó cada uno tiene diferentes características.

4.1 Selección de la topología

Para este trabajo se eligió un inversor multinivel, con fuentes de CD separadas, es decir, de puente H en cascada y con fuentes iguales de CD. Otro factor a considerar es si sería monofásico o trifásico, esta elección se realizó a través del análisis de los artículos del estado del arte y también que en el caso de los trifásicos se elimina el tercer armónico, lo que reduce considerablemente el valor de THD. Por tal motivo se definió el caso de estudio, como un inversor multinivel monofásico de 7 niveles de puente H en cascada. En la Figura 4.1 se muestra con un indicador rojo la ruta que se tomó para la elección de la topología.

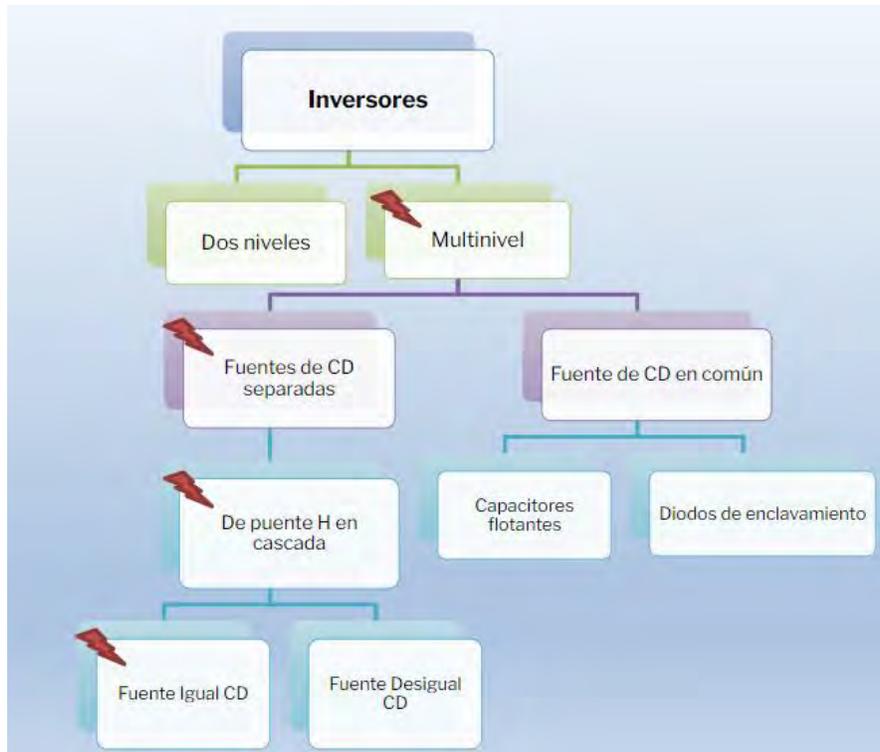


Figura 4.1 Selección de la topología a usar como caso de estudio.

4.2 Aplicación de los inversores multinivel

Existen diversas aplicaciones de los inversores multinivel, en la Figura 4.2 se muestran algunas de ellas, las cuales se dividieron en la interfaz de servicios públicos, tracción, energía renovable y como fuente ininterrumpida de poder (UPS, por sus siglas en inglés). En el área de servicios públicos se divide en 4 subáreas las cuales son compensador síncrono estático (STATCOM) que sirve para compensar la potencia reactiva, también se encuentran los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS), algunos medios eficaces para transmitir gran cantidad de energía que el HVDC por sus siglas en inglés que significan corriente continua de alto voltaje. En la subárea de tracción se encuentra la minería, los autos eléctricos o híbridos, los variadores de velocidad que pueden ser enfocados en el control del par directo (DTC), el cual permite variar directamente el torque del motor y los de control orientado al campo, el cual controla las corrientes estáticas, es decir, controla la velocidad del motor. La subárea de energía renovable se divide en energía eólica y en aplicaciones fotovoltaicas, las cuales pueden ir desde electrodomésticos, hasta alumbrado exterior.

Mediante el análisis de estas aplicaciones se definió la aplicación del inversor multinivel el cual fue como una fuente ininterrumpida de poder para la

alimentación de alumbrado exterior, por lo que su carga sería una carga resistiva. Además, que esto se sustenta también en los datos obtenidos en el estado del arte, ya que el tener una carga resistiva es beneficiosa para el análisis del algoritmo ya que no se tiene ninguna alteración en la señal de salida. Y permite ver el comportamiento del algoritmo TLBO de manera natural con los ángulos calculados.

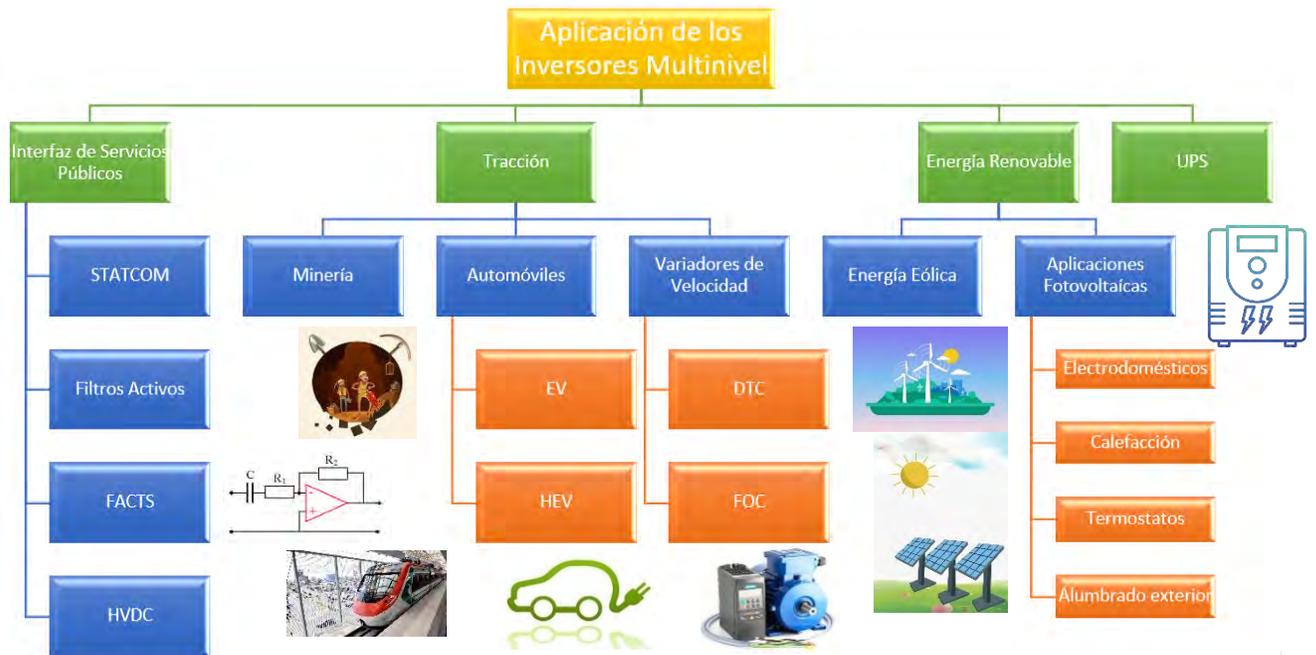


Figura 4.2 Diagrama de las áreas de aplicación de los inversores multinivel.

Posteriormente se definieron los parámetros de simulación, así como los IGBT a usar, los cuales fueron APT30GF60BN que tiene características de 30A, 600V. En el caso de las fuentes de CD se usaron 60V y las resistencias de base del IGBT de 20Ω y la resistencia de carga de 16Ω , con una frecuencia de 60Hz. En la tabla 5 se muestran los parámetros de simulación usados para la realización de este trabajo.

Tabla 5 Parámetros de simulación.

Nombre	V1 (V)	V2 (V)	TD (ms)	TR (ns)	TF (ns)	PW (ms)	PER (ms)
V8, V13, V18 (CD)	60	-	-	-	-	-	-
V6 (Pulso)	0	15	14.66m-Ang1	10	10	10	1/fs = 16.66
V7 (Pulso)	0	15	8.33m+Ang1	10	10	10	16.66
V9 (Pulso)	0	15	6.33m -Ang1	10	10	10	16.66
V10 (Pulso)	0	15	Ang1	10	10	10	16.66

Capítulo 5. Simulación y resultados

Mediante la simulación en el software de Pspice se pudo evaluar el comportamiento de los algoritmos, así como generar una comparación entre lo calculado y lo simulado, para corroborar de tal manera si la THD era igual o variaba considerablemente a lo que se calculó mediante el software de Matlab, en este último se realizó todo lo relacionado a la programación de los algoritmos para evaluar 49 armónicos, los cuales se determinaron gracias a la norma IEEE-519 [1], la cual especifica que deben ser evaluados 50 armónicos sin embargo este último al ser número par no se considera porque es un número muy cercano a 0, como índice de modulación para todo aquello que no se esté realizando el barrido del mismo se consideró el índice de modulación como **1.06**, ya que en este punto se tuvo una menor THD en la mayoría de los algoritmos.

5.1 Esquemático del inversor multinivel

En la Figura 5.1, se muestra el esquemático del inversor multinivel de 7 niveles monofásico puente H en cascada que se utilizó para la obtención de las gráficas de la señal de tensión de salida del inversor, así como la obtención de la Transformación rápida de Fourier (FFT), la cual es una herramienta que permite descomponer una señal en sus componentes espectrales individuales y así proporcionar información sobre su composición.

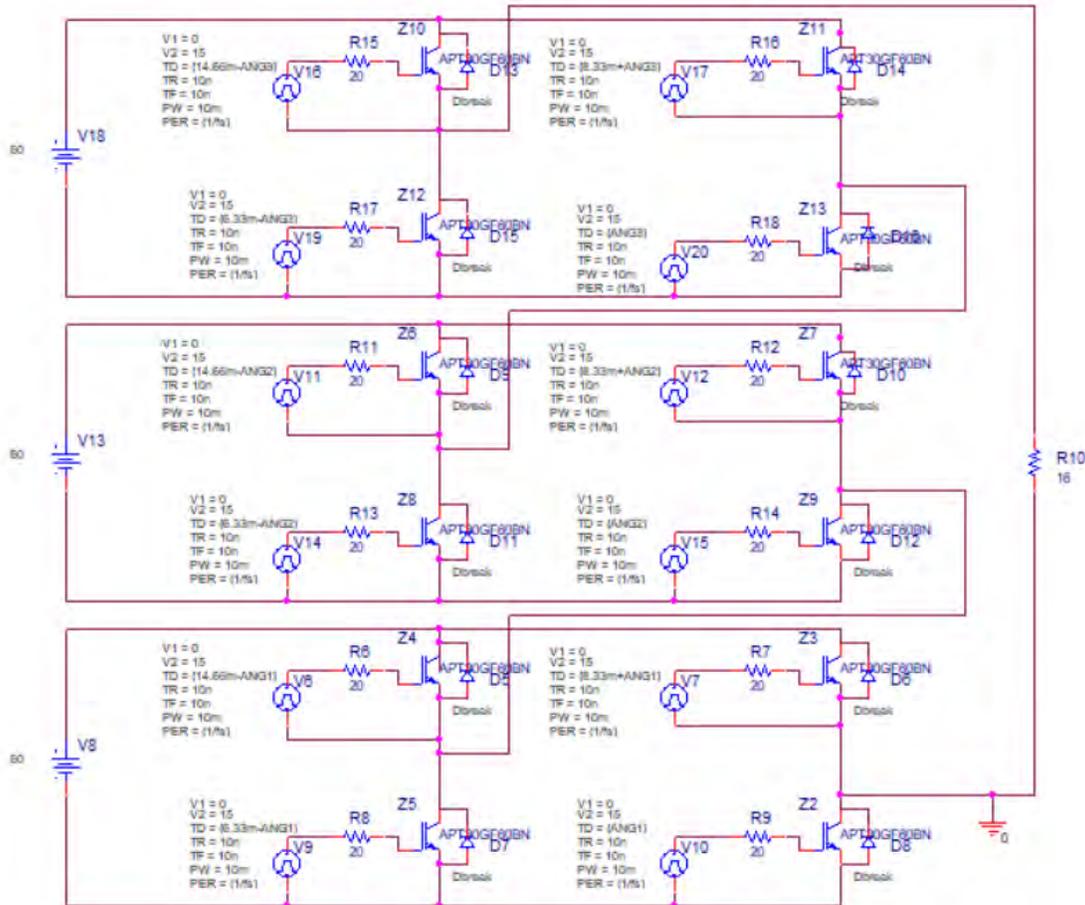


Figura 5.1 Esquemático del inversor multinivel de 7 niveles puente H en cascada.

5.2 Señal de la tensión de salida

En la Figura 5.2, se muestra la forma de onda de la tensión de salida del inversor multinivel con los ángulos de conmutación obtenidos mediante el algoritmo TLBO, posteriormente en la Figura 5.3, se evaluó la Transformación rápida de Fourier (FFT), para comparar los armónicos que se presentan con dichos ángulos, para finalmente compararse con los armónicos calculados.

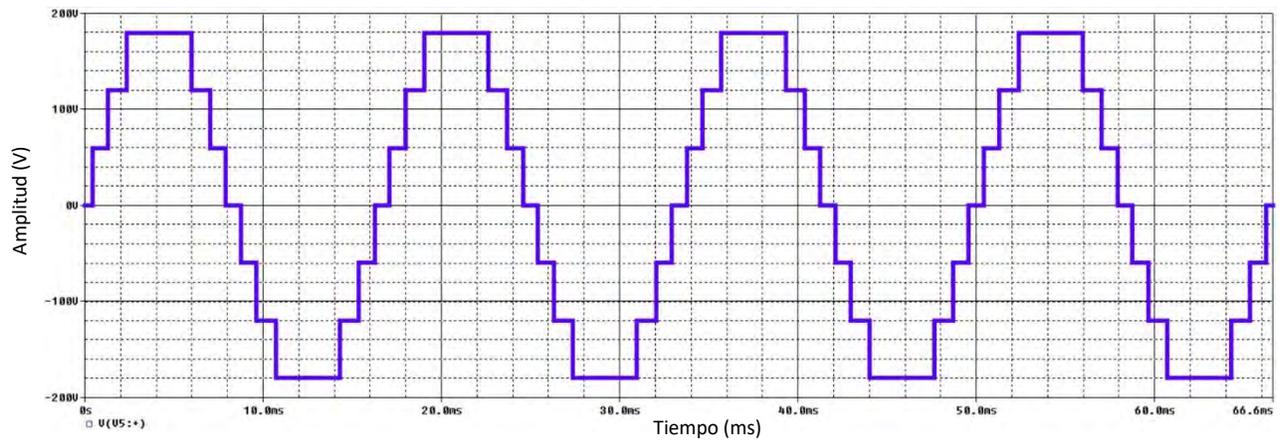


Figura 5.2 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo TLBO.

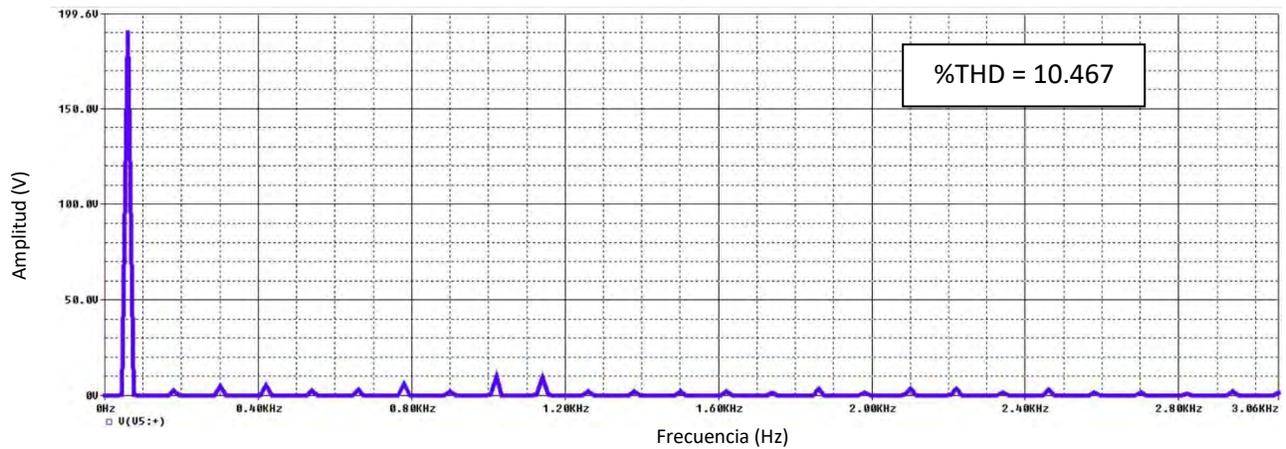


Figura 5.3 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo TLBO.

En la Figura 5.4, se muestra la forma de onda de la tensión de salida del inversor multinivel con los ángulos de conmutación obtenidos mediante el algoritmo GA, posteriormente en la Figura 5.5, se evaluó la Transformación rápida de Fourier (FFT), para comparar los armónicos que se presentan con dichos ángulos, para finalmente compararse con los armónicos calculados.

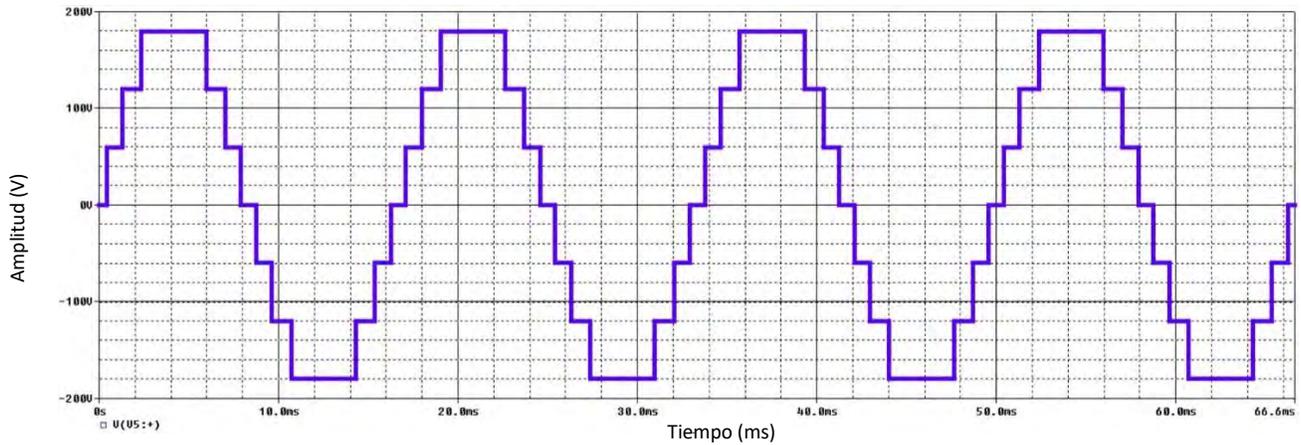


Figura 5.4 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo GA.

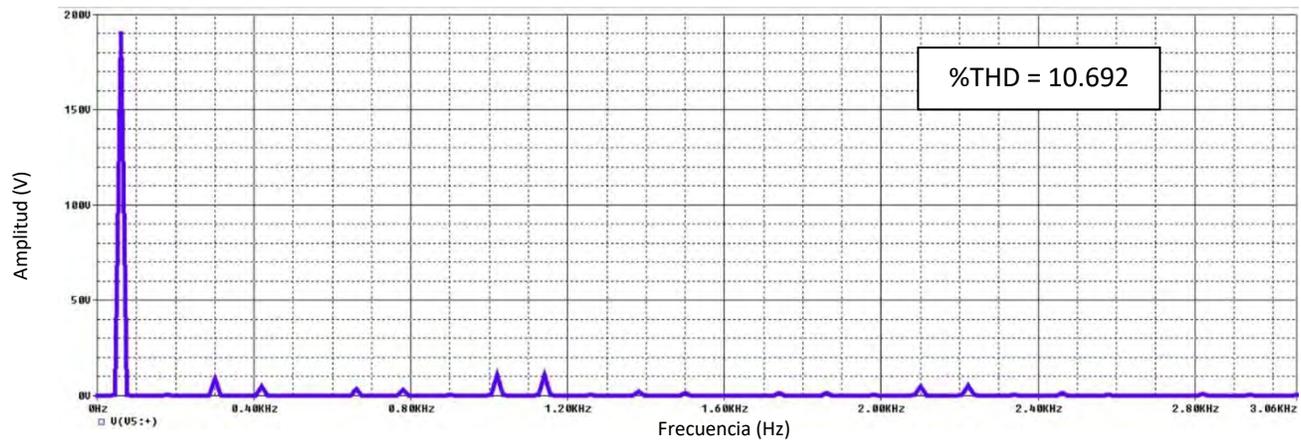


Figura 5.5 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo GA.

En la Figura 5.6, se muestra la forma de onda de la tensión de salida del inversor multinivel con los ángulos de conmutación obtenidos mediante el algoritmo DE, posteriormente en la Figura 5.7, se evaluó la Transformación rápida de Fourier (FFT), para comparar los armónicos que se presentan con dichos ángulos, para finalmente compararse con los armónicos calculados.

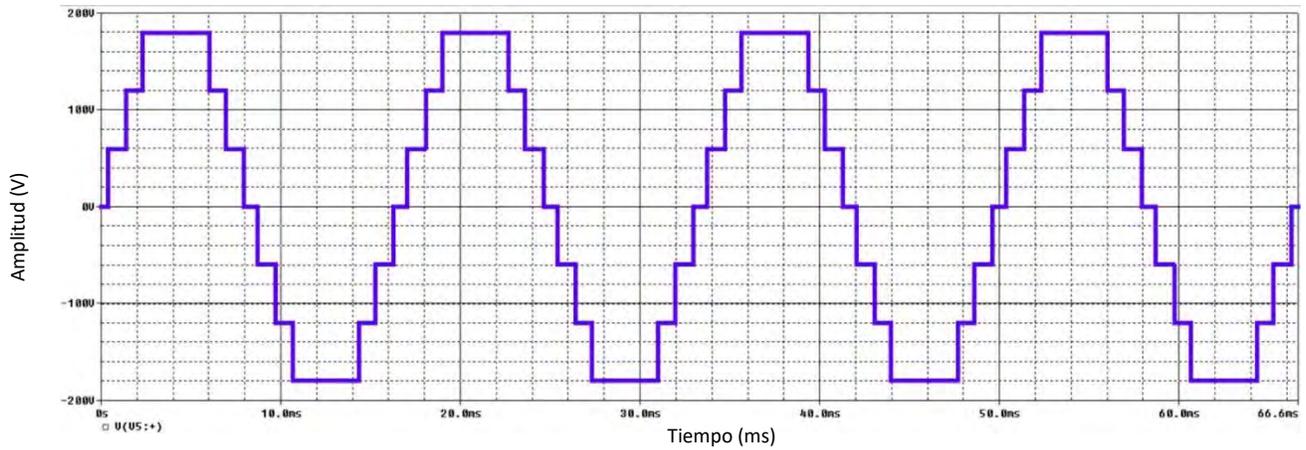


Figura 5.6 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo DE.

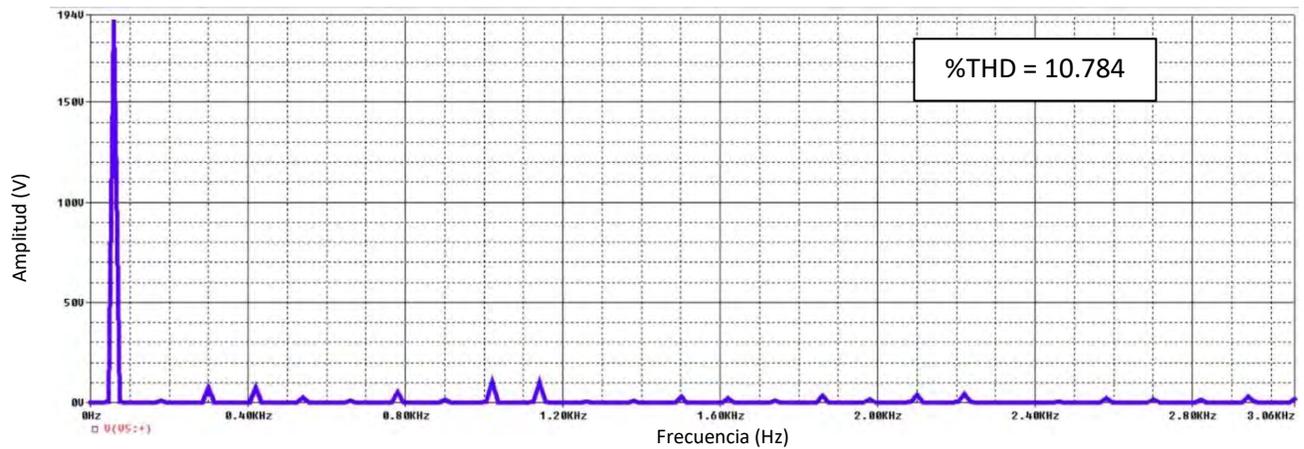


Figura 5.7 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo DE.

En la Figura 5.8, se muestra la forma de onda de la tensión de salida del inversor multinivel con los ángulos de conmutación obtenidos mediante el algoritmo GA, posteriormente en la Figura 5.9, se evaluó la Transformación rápida de Fourier (FFT), para comparar los armónicos que se presentan con dichos ángulos, para finalmente compararse con los armónicos calculados.

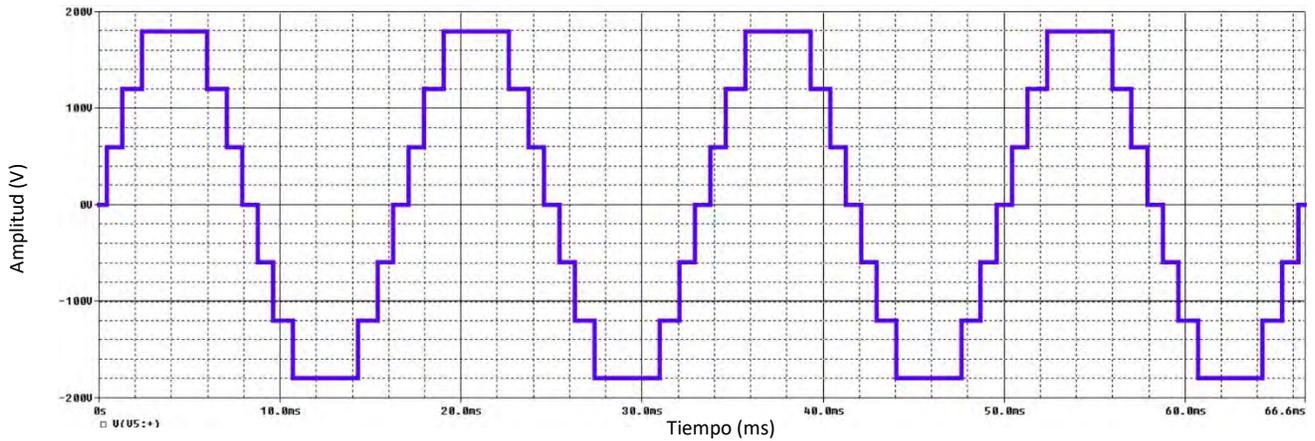


Figura 5.8 Señal de la tensión de salida, con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo PSO.

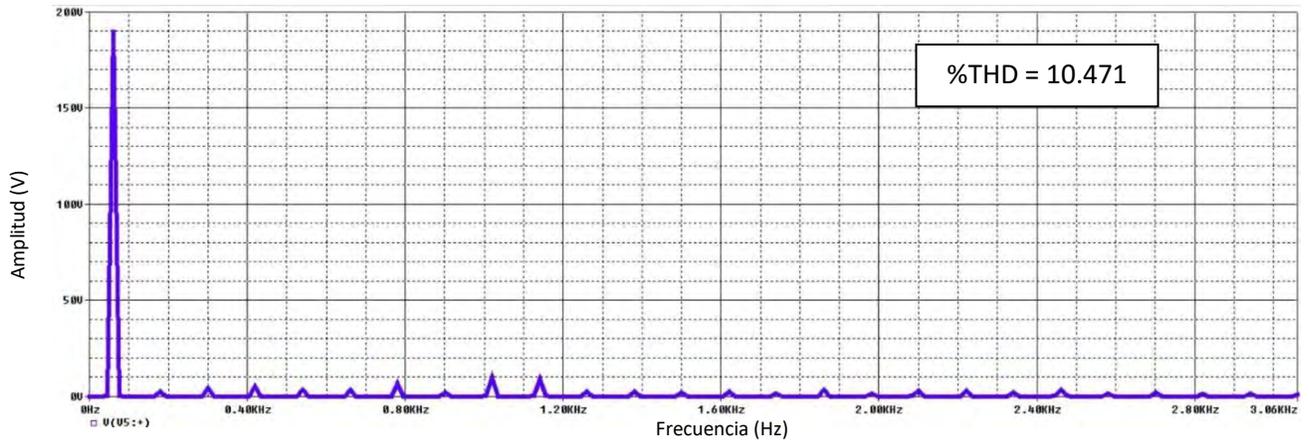


Figura 5.9 FFT con los ángulos de conmutación obtenidos con el algoritmo PSO.

En la Tabla 6, se muestra una comparativa del valor de cada uno de los armónicos que se obtuvieron mediante los cálculos teóricos de cada uno de los algoritmos.

Tabla 6 Comparación de la magnitud (cuya unidad son los Volts) de los armónicos obtenidos de manera teórica.

Armónico	TLBO	GA	DE	PSO
1	190.8013	190.9158	190.7983	190.7996
3	2.3874	0.4359	0.8887	2.6275
5	4.9582	8.8901	7.1476	4.5787
7	5.2816	4.8059	7.0876	5.0872
9	2.7207	0.1066	2.3617	3.4034
11	3.275	3.4124	0.9684	3.6031
13	6.3406	3.0558	5.1422	6.4466
15	2.2283	0.4204	1.3488	2.3324

17	10.0067	10.771	10.3616	9.8098
19	9.3331	10.425	9.7513	9.0847
21	2.272	0.4505	0.3411	2.5134
23	2.2125	2.1179	0.857	2.7462
25	2.0546	1.1746	3.12	2.0411
27	2.4178	0.1058	2.1677	2.9217
29	1.4602	1.4149	0.9948	1.8055
31	3.6211	1.1156	3.3645	3.4277
33	1.8202	0.4042	1.6608	1.6835
35	3.5564	4.9916	4.1559	3.2802
37	3.4948	5.528	4.3454	3.0482
39	1.9135	0.4642	0.2198	2.0492
41	3.1251	1.2797	0.5727	3.6415
43	1.8184	0.575	2.0608	1.9468
45	1.8712	0.1043	1.8106	2.078
47	0.9616	0.9386	1.2488	1.1848
49	2.3175	0.5934	2.8089	1.8989

En la Tabla 7, se muestra una comparativa del valor de cada uno de los armónicos obtenidos mediante el análisis de Fourier el cual es una de las herramientas del simulador Pspice, que evalúa la cantidad de armónicos que el usuario defina como se mencionó anteriormente, ese valor de definió como 49 sin embargo todos los armónicos número par fueron desestimados, de acuerdo al tipo de forma de onda y a lo definido en la sección de la función objetivo.

Tabla 7 Comparación de la magnitud (cuya unidad son los Volts) de los armónicos obtenida mediante simulación.

Armónico	TLBO	GA	DE	PSO
1	190.79	190.92	190.8	190.8
3	2.3747	0.43945	0.89097	2.6248
5	4.9594	8.9004	7.1317	4.5857
7	5.277	4.8001	7.1043	5.0867
9	2.7305	0.1103	2.3745	3.398
11	3.2749	3.4175	9.4923	3.6032
13	6.3402	3.0453	5.1629	6.4422
15	2.2123	0.42332	1.3578	2.331

17	1.0019	10.764	10.356	9.812
19	9.327	10.431	9.7393	9.089
21	2.265	4.5469	0.33477	2.5108
23	2.2113	2.1278	0.84915	2.7382
25	2.0451	1.168	3.1304	2.0397
27	2.428	0.10946	2.1761	2.9182
29	1.4565	1.4193	1.0118	1.8061
31	3.6213	1.1048	3.3856	3.4265
33	1.8037	0.40638	1.6729	1.6846
35	3.5687	4.9841	4.1454	3.2842
37	3.4933	5.5332	4.3263	3.0552
39	1.9141	0.46898	0.23508	2.0479
41	3.1253	1.2892	0.57375	3.6348
43	1.8053	0.56782	2.0626	1.9452
45	1.8817	0.1078	1.8114	2.0777
47	0.9564	0.94224	1.2596	1.1869
49	2.3176	0.58244	2.826	1.9002

En la Tabla 8, se muestra una comparación con respecto a los valores calculados en cuestión de potencia, factor de potencia, valor eficaz y THD. Esto para evaluar cuál de los algoritmos tuvo un mejor comportamiento al minimizar la función objetivo.

Tabla 8 Comparación de algunas características del inversor de forma teórica.

Concepto	TLBO	GA	DE	PSO
Potencia Activa (p)	1190.3W	1193.8W	1192.1W	1190.1W
Potencia Aparente (s)	1190.5W	1194W	1192.3W	1190.3W
Factor de Potencia	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
Valor eficaz	135.6493V _{RMS}	135.7775 V _{RMS}	135.6935 V _{RMS}	135.6478 V _{RMS}
%THD	10.466	10.6907	10.7819	10.4705

En la Tabla 9, se muestra la comparación del porcentaje de THD obtenida de manera calculada y manera simulada. Realmente en los cuatro algoritmos varía algunos decimales sin embargo la variación es mínima, por lo que existe una coherencia entre

lo realizado de manera teórica y de manera simulada con los ángulos de disparo obtenidos mediante el software Matlab.

Tabla 9 Comparación del porcentaje de THD mediante los cálculos teóricos y mediante la simulación con los ángulos de conmutación de cada uno de los algoritmos.

Algoritmo	%THD Calculada	%THD Simulada
TLBO	10.466	10.467
GA	10.6907	10.692
DE	10.7819	10.784
PSO	10.4705	10.471

Capítulo 6. Comparación y discusión de resultados

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de forma comparativa entre cada uno de los algoritmos, esto con la finalidad de brindar información gráfica que permita observar el comportamiento de cada uno de los algoritmos elegidos en la optimización del porcentaje de THD, tiempos de ejecución y armónicos de la señal de salida.

6.1 Comportamiento del porcentaje de THD y los armónicos

En la Figura 6.1, se presenta una comparación de los ángulos de disparo de los cuatro algoritmos conforme se le realizaba una variación al índice de modulación. Como se observa el ángulo 3 oscila entre los 35 y 89.99 grados, el ángulo 2 oscila entre los 20 y 85 grados, el ángulo 1 oscila entre los 5 y 25 grados. El comportamiento esperado si se cumple ya que existe una relación entre el índice de modulación y los ángulos de disparo, ya que cuando el índice de modulación es cercano a 0 los ángulos son mayores y cuando se acerca el índice de modulación al 1.27 los ángulos deben ser valores menores, en este caso el barrido del índice de modulación es de igual manera de 0.44 a 1.16 debido a la función objetivo que se estableció.

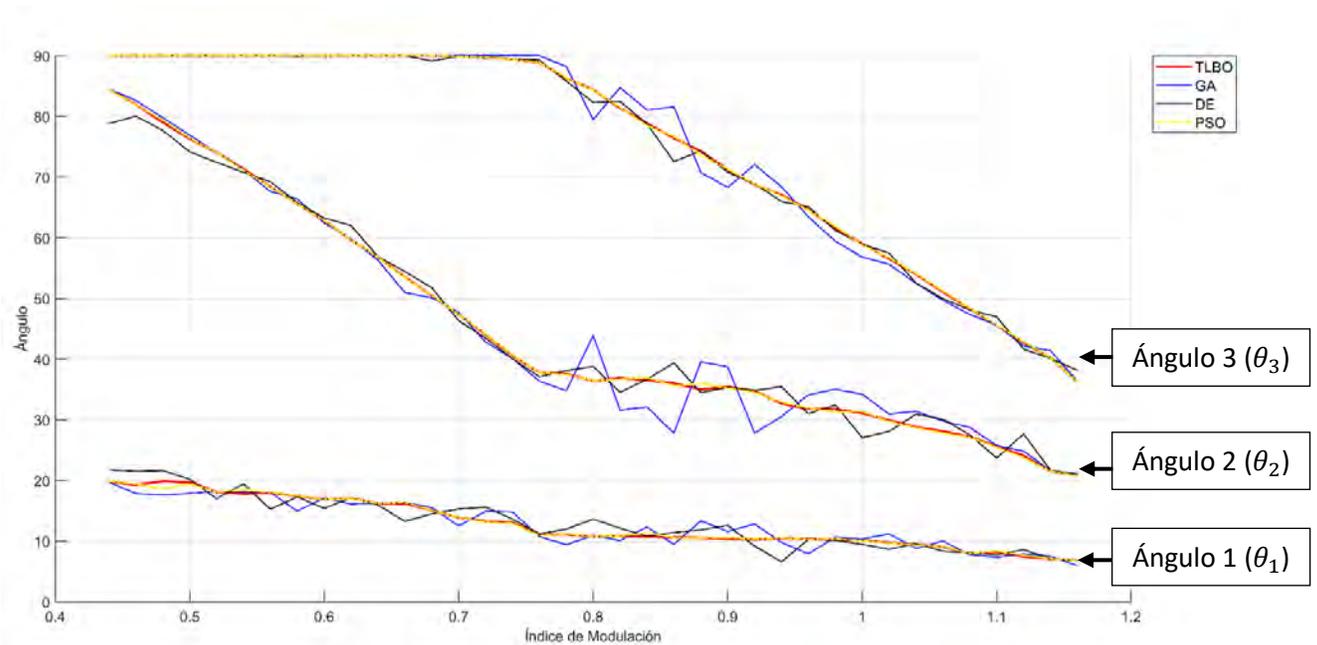


Figura 6.1 Porcentaje de THD con respecto al índice de modulación que se deseaba tener.

En la Figura 6.2, se muestra la comparación de cada uno de los armónicos, con un zoom del tercer armónico al armónico número 49, ya que al ser la fundamental un valor alto, los demás armónicos no son fáciles de observar, como se puede determinar del siguiente gráfico es que el algoritmo TLBO y PSO tuvieron valores menores gran parte de los armónicos, por lo que se puede definir que estos dos fueron los algoritmos que optimizaron la función objetivo mejor que los algoritmos GA y DE. Para obtener estos armónicos el IM se eligió de 1.06 que fue el valor donde existía un menor porcentaje de THD en la mayoría de los algoritmos.

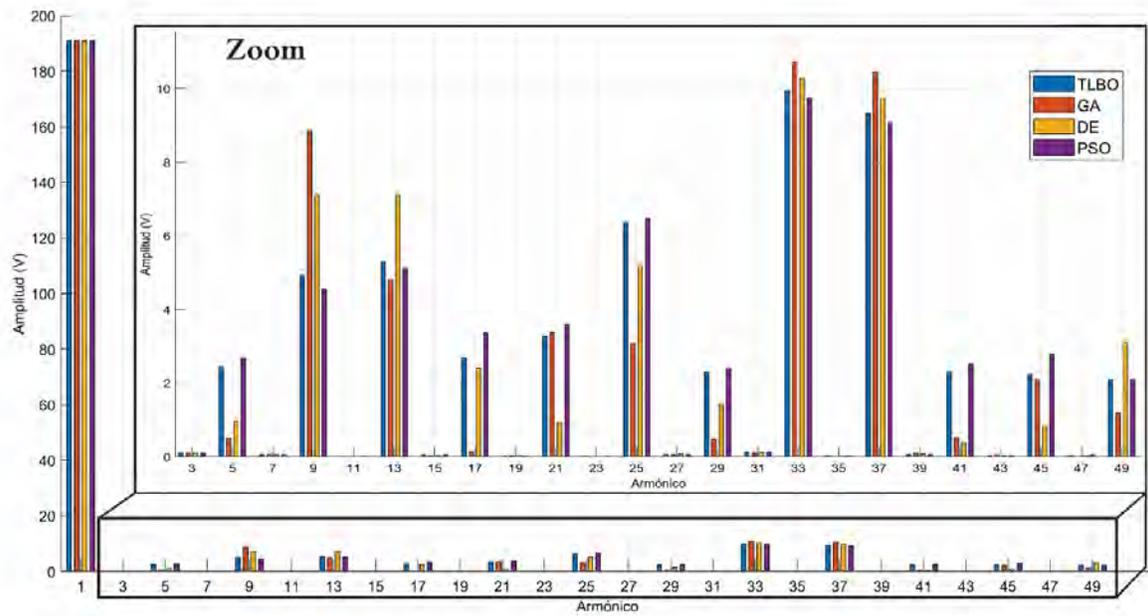


Figura 6.2 Comparación de armónicos de varios métodos metaheurísticos para un inversor multinivel de 7 niveles.

En la Figura 6.3 y 6.4, se muestra el porcentaje de THD con respecto al índice de modulación, esta fue la parte medular del trabajo ya que se buscaba minimizar el porcentaje de THD al calcular con el algoritmo TLBO los ángulos de disparo de los dispositivos integrados. También se realizó un barrido del Índice de Modulación (IM) para analizar el comportamiento de la THD cuando se incrementa o decreta el IM. En la primera figura no es muy notorio ya que se evaluó el índice de modulación de 0.44 a 1.16, con un paso de 0.02, por lo que se tienen más de 30 evaluaciones, es por esto que se presenta la segunda figura ya que en esta únicamente se comparan los puntos máximos que se obtuvieron para cada índice de modulación evaluado.

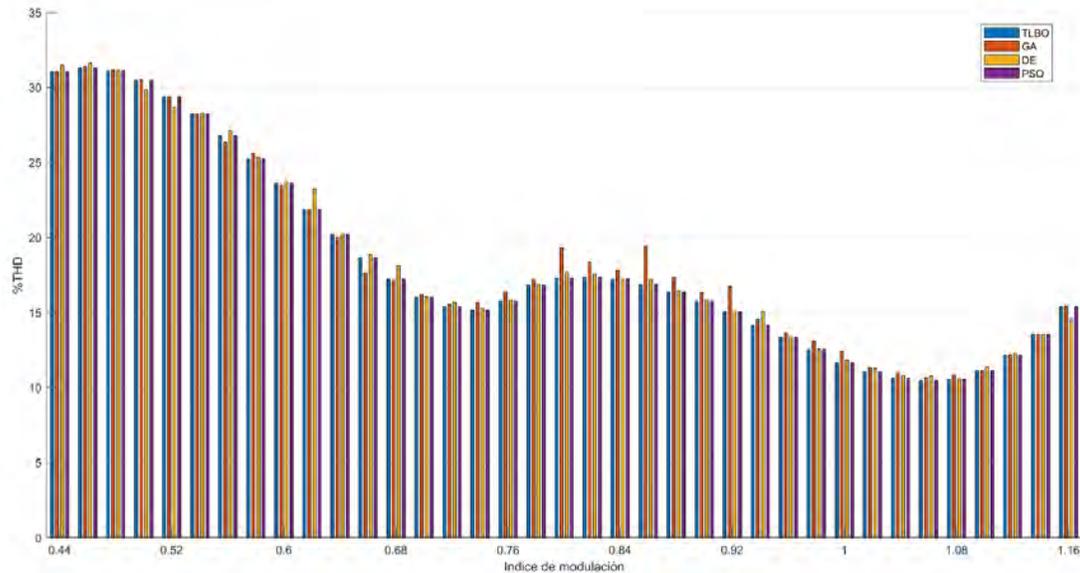


Figura 6.3 Histograma del comportamiento de cada uno de los algoritmos en la minimización de la THD con respecto al índice de modulación.

6.2 Comparación de la eficiencia de los algoritmos

En la Figura 6.4, se puede comparar de forma más clara cuál fue el algoritmo menos eficiente en la minimización de la THD, el cual fue el algoritmo GA, posteriormente el algoritmo DE y se puede observar que el algoritmo PSO y TLBO tuvieron un comportamiento muy cercano para la minimización, realmente variaban por centésimas, es por esto que se observa prácticamente la misma línea. Esto permite definir al algoritmo TLBO como un algoritmo novedoso y capaz de ser usado en este tipo de problemas de optimización ya que tiene el mismo comportamiento que un algoritmo con más literatura y aplicado por mucho tiempo en diversos campos como lo es el algoritmo PSO.

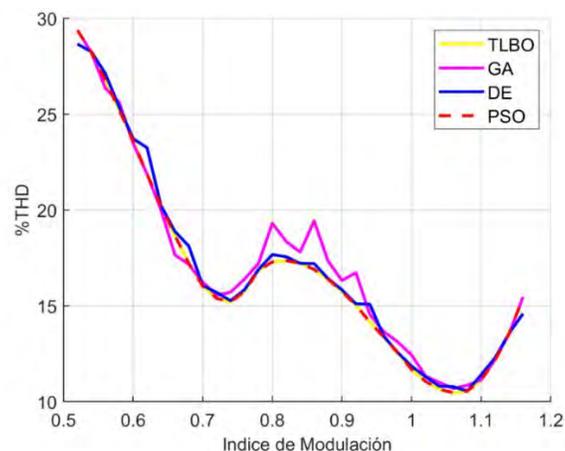


Figura 6.4 Gráfica comparativa del porcentaje de THD con respecto al índice de modulación para cada uno de los algoritmos elegidos.

Otro factor relevante a tratar es la cuestión del tiempo ya que algunas de los principales retos de los inversores multinivel es el cálculo de los ángulos de conmutación en línea que es cuando el inversor es interconectado a una red de tensión, Realmente son tiempos que no llegan al segundo de ejecución, estos tiempos de simulación se realizaron con una maquina Dell G7 con un procesador Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz, con 2 memorias RAM de 8GB con velocidad de 2667 MHz y sistema operativo Windows 11.

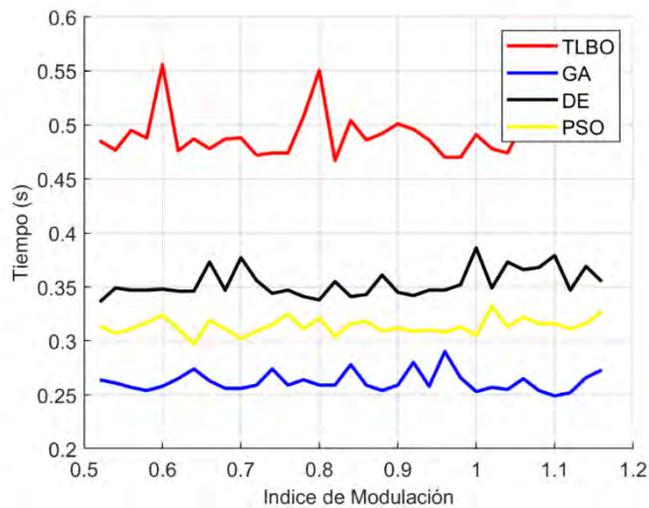


Figura 6.5 Comparación del tiempo de ejecución de los algoritmos con respecto al índice de modulación que se buscaba tener.

Gracias a la Figura 6.5, se puede determinar la Tabla 10, en la que se coloca el rango de tiempo de ejecución en el que oscila cada uno de los algoritmos probados. También se puede determinar que el algoritmo más rápido fue el GA y el más lento fue el TLBO, sin embargo, ninguno de los cuatro algoritmos puestos a prueba pasa del segundo de ejecución.

Tabla 10 Tiempo mínimo y máximo de ejecución de cada uno de los algoritmos.

Algoritmo	Tiempo mínimo (s)	Tiempo máximo (s)
TLBO	0.467	0.556
DE	0.336	0.386
PSO	0.296	0.426
GA	0.249	0.290

En la Figura 6.6, se presenta el error absoluto existente entre el índice de modulación deseado y el obtenido mediante los ángulos de conmutación calculado por cada uno de los algoritmos. Nuevamente aquellos que tuvieron un comportamiento más intermitente en el cumplimiento del índice de modulación esperado y el obtenido fue el algoritmo GA y el algoritmo DE, mientras que los algoritmos TLBO y PSO tuvieron un error absoluto muy cercano a cero., también se muestra la ecuación con la que se obtuvo el error absoluto.

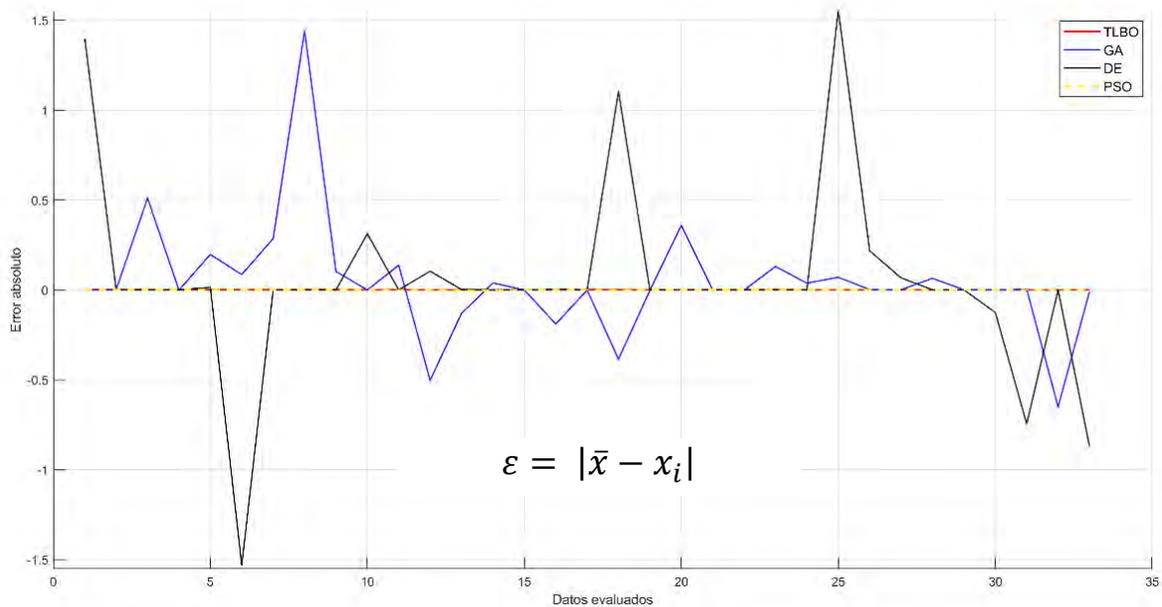


Figura 6.6 Gráfica del error absoluto de los algoritmos entre el índice de modulación deseado y el obtenido.

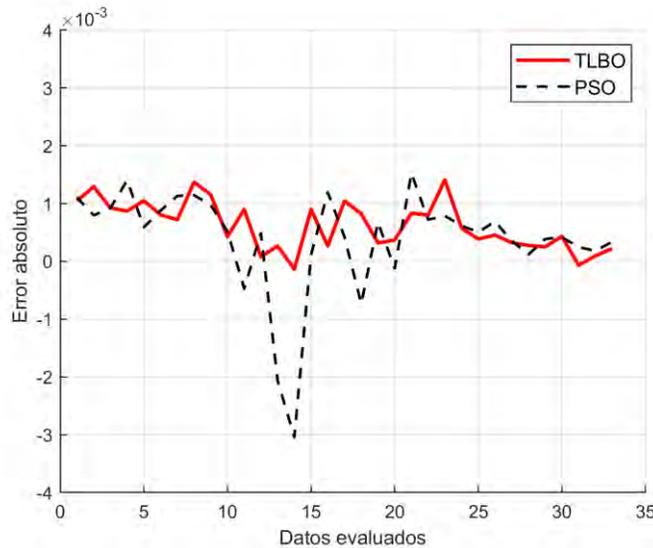


Figura 6.7 Acercamiento a la gráfica del error absoluto de los algoritmos TLBO y PSO entre el índice de modulación deseado y el obtenido.

En la Figura 6.7, se muestra un acercamiento de la Figura 4.6 para notar cuál de los dos algoritmos mencionados tuvo menor error absoluto, el cual fue el algoritmo TLBO.

Capítulo 7. Conclusión

En este capítulo se muestran las conclusiones a las que se llegaron mediante el análisis de los resultados que se obtuvieron a lo largo de este trabajo de investigación. También se muestran algunos trabajos futuros que se pueden realizar para que se amplie este interesante tema, así como los productos académicos generados durante el desarrollo de esta tesis.

7.1 Conclusión

Se cumplió con el objetivo principal que era analizar el algoritmo TLBO y optimizar el porcentaje de THD en un inversor multinivel de 7 niveles, lo cual realizó de manera satisfactoria, también la simulación y el análisis de los resultados.

Para poder comparar los resultados se decidió añadir otros algoritmos para observar el comportamiento del algoritmo de interés, así como el realizar un barrido del índice de modulación, todo esto se llevó a cabo y se obtuvieron los resultados esperados, así como un análisis de los mismos mediante gráficas y estadísticas sobre el comportamiento del algoritmo con respecto a otros.

A través de todo lo realizado se puede concluir que el algoritmo TLBO es un método metaheurístico que permite resolver problemas de optimización que podría considerarse un algoritmo reciente, ya que tiene 11 años desde su creación.

Una de las características más importantes es que no tiene parámetros, la única información que tiene que introducir el usuario son la población, las variables de diseño, el número máximo de iteraciones y la función objetivo. El análisis del algoritmo TLBO concluye que es un método de optimización eficiente, capaz de resolver y optimizar problemas de uno o varios objetivos (con una o varias funciones objetivo), con diversas restricciones o incluso sin ellas. Es un algoritmo práctico ya que no requiere ningún ajuste de los parámetros de control, lo que facilita su aplicación en diversos tipos de problemas. Sin embargo, también se demostró que es un algoritmo lento en comparación con otros, pero capaz de ser implementado incluso en tiempo real para la optimización de un problema.

7.2 Trabajos futuros

Se podría dar un enfoque práctico y también que sea un inversor conectado a línea ya que esta parte es la más compleja a implementar, ya que el tiempo es un factor muy importante para que el comportamiento sea óptimo.

Otro enfoque podría ser el adaptar el algoritmo para disminuir armónicos de bajo orden y de tal manera contribuir a la reducción del tamaño del filtro de salida, lo cual es un factor importante para la producción de los inversores multinivel comerciales.

7.3 Productos académicos

En el desarrollo de este trabajo de tesis se obtuvieron 3 productos académicos que se enlistan a continuación:

1. Artículo de congreso, aceptado y presentado en el congreso de UABC para el VIII Congreso Internacional de Investigación Tijuana llevado a cabo del 25 al 28 de abril del 2022 con el nombre: ¹ Análisis de la relación de niveles entre un inversor monofásico y uno trifásico. Cuyos autores son: Kenia Gómez Díaz, Jesus Aguayo Alquicira, Susana De León Aldaco y Rafael González Chávez.
2. Un artículo de congreso publicado por: Ing. Kenia Gómez Díaz, Dr. Jesus Aguayo Alquicira, Dra. Susana De León Aldaco e Ing. Rafael González Chávez. (2022). Análisis de la relación de niveles entre un inversor monofásico y uno trifásico. Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada. http://revistaaristas.tij.uabc.mx/index.php/revista_aristas

3. Un artículo de revista publicado por: Kenia Yadira Gómez Díaz,⁴⁹ Susana Estefany De León Aldaco, Jesus Aguayo Alquicira, Mario Ponce-Silva y Víctor Hugo Olivares Peregrino. (2022) Teaching–Learning-Based Optimization Algorithm Applied in Electronic Engineering: A Survey. Electronics.
<https://doi.org/10.3390/electronics11213451>

Referencias

- ³⁶ [1] C. K. Duffey and R. P. Stratford, "Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," vol. 25, no. 6, pp. 1025-1034, 1989.
- [2] H. Markiewicz and A. Klajn, *Voltage Disturbances (Guide, Power Quality Application)*. 2004.
- ¹ [3] M. A. Memon, S. Mekhilef, M. Mubin, and M. J. R. Aamir, "Selective harmonic elimination in inverters using bio-inspired intelligent algorithms for renewable energy conversion applications: A review," *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2235-2253, 2018.
- [4] H. Malik, *Metaheuristic and Evolutionary Computation*. Springer Nature, 2020.
- ¹ [5] K. A. Krishna and L. P. Suresh, "A brief review on multi level inverter topologies," in *2016 international conference on circuit, power and computing technologies (ICCPCT)*, 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [6] H. A. Perusquía and J. R. Sánchez, "Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en sistemas eléctricos," Tesis de maestría, ESIME-IPN, 2010.
- ¹³ [7] R. Timens, F. J. K. Buesink, V. Čuk, J. Cobben, W. Kling, and F. B. J. Leferink, "High harmonic distortion in a new building due to a multitude of electronic equipment," in *2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2011, pp. 393-398: IEEE.

- [8] J. Olamaei and ¹M. Karimi, "Total harmonic distortion minimisation in multilevel inverters using the teaching-learning-based optimisation algorithm," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 264-269, 2018.
- [9] ²³M. Alizadeh, R. Rodriguez, J. Bauman, and A. Emadi, "Optimal design of integrated heat pipe air-cooled system using TLBO algorithm for SiC MOSFET converters," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 1, pp. 103-112, 2020.
- [10] ³⁰A. Cano Ortega, F. J. Sánchez Sutil, and J. De la Casa Hernández, "Power factor compensation using teaching learning based optimization and monitoring system by cloud data logger," *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 2172, 2019.
- [11] ⁵⁸D. Rao and N. Kumar, "Comparisitional Investigation of Load Dispatch Solutions with TLBO," *International Journal of Electrical Computer Engineering*, vol. 7, no. 6, p. 3246, 2017.
- [12] ⁵⁶A. Rouhani, M. Jabbari, and S. Honarmand, "A teaching learning based optimization for optimal design of a hybrid energy system," *International Journal of Energy Power Engineering*, vol. 9, no. 8, pp. 896-903, 2015.
- [13] ²⁷B. Mohanty and S. Tripathy, "A teaching learning based optimization technique for optimal location and size of DG in distribution network," *Electrical systems information technology*, vol. 3, no. 1, pp. 33-44, 2016.
- [14] ³⁹S. Mishra, P. K. Ray, and S. K. Dash, "A TLBO optimized photovoltaic fed DSTATCOM for power quality improvement," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [15] ⁴⁵K.-H. Chao and M.-C. Wu, "Global maximum power point tracking (MPPT) of a photovoltaic module array constructed through improved teaching-learning-based optimization," *Energies*, vol. 9, no. 12, p. 986, 2016.
- [16] ¹⁰M. Jabbari, M. Moradlou, and M. Bigdeli, "A TLBO Algorithm for Design Optimization of DVRs in an Interline DVR (IDVR)," in *2019*

- International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2019, pp. 341-346: IEEE.
- [17] ²⁹ K. N. Nusair and M. I. Alomoush, "Optimal reactive power dispatch using teaching learning based optimization algorithm with consideration of FACTS device "STATCOM"," in *2017 10th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference (JIEEEEC)*, 2017, pp. 1-12: IEEE.
- ¹² [18] A. Fathy and H. Rezk, "A novel methodology for simulating maximum power point trackers using mine blast optimization and teaching learning based optimization algorithms for partially shaded photovoltaic system," *Journal of Renewable Sustainable Energy*, vol. 8, no. 2, p. 023503, 2016.
- [19] ⁵⁹ S. Li *et al.*, "Parameter extraction of photovoltaic models using an improved teaching-learning-based optimization," *Energy Conversion Management*, vol. 186, pp. 293-305, 2019.
- [20] ⁶ G. Sharma and A. Kumar, "Modified energy-efficient range-free localization using teaching-learning-based optimization for wireless sensor networks," *IETE Journal of Research*, vol. 64, no. 1, pp. 124-138, 2018.
- [21] B. S. Babu, "TLBO based Power System Optimization for AC/DC Hybrid Systems," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1916, no. 1, p. 012023: IOP Publishing.
- [22] ²⁵ M. Javad Kasaei, M. Gandomkar, and J. Nikoukar, "Optimal operational scheduling of renewable energy sources using teaching-learning based optimization algorithm by virtual power plant," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 139, no. 6, p. 062003, 2017.
- [23] ⁴⁰ S. V. Tade, V. N. Ghate, and A. A. Kalage, "Economic Operation of Pumped Hydro Storage Plant using Teaching Learning based Optimization (TLBO) Algorithm," in *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*, ⁵ 2017, pp. 864-869: IEEE.

- [24] K. C. Das and V. Sharma, "Noble-TLBO MPPT Technique and its Comparative Analysis with Conventional methods implemented on Solar Photo Voltaic System," *IOP Publishing Ltd.*
- [25] ¹⁷ D. Pasupulati, R. A. Kumar, and K. Asokan, "An effective methodology for short-term generation scheduling of hydrothermal power system using improved TLBO algorithm," in *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*, 2017, pp. 229-238: IEEE.
- [26] ⁴³ D. Kumar and V. K. Gupta, "Optimal reconfiguration of primary power distribution system using modified Teaching learning based optimization algorithm," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-5: IEEE.
- [27] ³² S. Verma, S. Saha, and V. Mukherjee, "Optimal rescheduling of real power generation for congestion management using teaching-learning-based optimization algorithm," *Journal of Electrical Systems Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 889-907, 2018.
- [28] ⁹ K. Dastanian, E. Abiri, M. R. Salehi, and A. Akbari, "A new approach based on TLBO for DC-DC converter in RFID tag," *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 1827-1833, 2015.
- [29] ⁷ A. S. Ahmed, M. A. Attia, N. M. Hamed, and A. Y. Abdelaziz, "Modern optimization algorithms for fault location estimation in power systems," *Engineering science technology, an international journal* vol. 20, no. 5, pp. 1475-1485, 2017.
- [30] ²⁸ S. Chatterjee, A. Naithani, and V. Mukherjee, "Small-signal stability analysis of DFIG based wind power system using teaching learning based optimization," *International Journal of Electrical Power Energy Systems* vol. 78, pp. 672-689, 2016.

- [31] H. Rezk and A. Pathy, "Simulation of global MPPT based on teaching-learning-based optimization technique for partially shaded PV system," *Electrical engineering*, vol. 99, no. 3, pp. 847-859, 2017.
- [32] B. Bhattacharyya and K. Babu, "Teaching Learning Based Optimization algorithm for reactive power planning," *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol. 81, pp. 248-253, 2016.
- [33] L. D. Collins and B. Ramachandran, "Power management in a microgrid using teaching learning based optimization algorithm," in *SoutheastCon 2017*, 2017, pp. 1-6: IEEE.
- [34] K. Haghdar, "Optimal DC source influence on selective harmonic elimination in multilevel inverters using teaching-learning-based optimization," vol. 67, no. 2, pp. 942-949, 2019.
- [35] V. J. Manohar and P. Jyothi, "TLBO based Selection of Optimal Switching angles in SHE Control of CMLI with Unequal DC sources," in *2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC) I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC), 2018 2nd International Conference on*, 2018, pp. 393-398: IEEE.
- [36] V. J. Manohar, M. Trinad, and K. V. Ramana, "Comparative analysis of NR and TBLO algorithms in control of cascaded MLI at low switching frequency," vol. 85, pp. 976-986, 2016.
- [37] T. L. Lakshmi, M. G. Naik, and S. R. Prasad, "TLBO Algorithm for Multi-Level Inverter-Based Multi-Terminal HVDC System in Grid-Tied Photovoltaic Power Plant," *Journal of The Institution of Engineers*, pp. 1-8, 2020.
- [38] J. Olamaei, M. Karimi, S. Khalilnasab, and S. Nikpour, "Application of Teaching-Learning-Based Optimization in Solving Selective Harmonic Elimination Problem of Multilevel Inverters," 2014.
- [39] J. Olamaei, M. Karimi, and T. Farhoudi, "SOLVING LINE VOLTAGE THD MINIMIZATION PROBLEM IN MULTILEVEL INVERTER'S WITH CONSTANT DC VOLTAGE SOURCES

- USING TEACHING-LEARNING-BASED OPTIMIZATION," *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng. Comput. Sci*, vol. 79, no. 1, 2017.
- [40] ⁶ N. Riad, W. Anis, A. Elkassas, and A. E.-W. Hassan, "Three-Phase Multilevel Inverter Using Selective Harmonic Elimination with Marine Predator Algorithm," *Electronics*, vol. 10, no. 4, p. 374, 2021.
- [41] ⁵⁰ K. Bhatt and S. Chakravorty, "A Comparative Study on Performance of Fitness Functions for Harmonic Profile Improvement using Parameter-less AI Technique in Multilevel Inverter for Electrical Drives," vol. 9, pp. 1-14, 2020.
- [42] M. Karimi, M. R. J. Oskuee, and S. N. Ravadanegh, "Optimization of Line voltage THD in Multilevel Inverter's with Alterable DC Links using TLBO," 2017.
- [43] S. S. Kumar and ⁶² C. Nagarajan, "Harmonic Analysis of Nr & Elitist Tlbo Algorithms in Control of Solar Fed Cascaded Multilevel Level Inverter," *International Journal of Education Learning Systems*, vol. 5, 2020.
- [44] ²⁴ M. M. Elkholy and A. Fathy, "Optimization of a PV fed water pumping system without storage based on teaching-learning-based optimization algorithm and artificial neural network," *Solar Energy*, vol. 139, pp. 199-212, 2016.
- [45] M. Mardaneh and F. Golestaneh, "Harmonic optimization of ⁹ diode-clamped multilevel inverter using teaching-learning-based optimization algorithm," *IETE Journal of Research*, vol. 59, no. 1, pp. 9-16, 2013.
- [46] ²⁰ Y. Xin, J. Yi, K. Zhang, C. Chen, and J. Xiong, "Offline selective harmonic elimination with $(2N+ 1)$ output voltage levels in modular multilevel converter using a differential harmony search algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121596-121610, 2020.
- [47] ⁴² P. Sharma and R. Gupta, "Tuning of PID controller for a linear BLDC motor using TLBO technique," in *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, 2014, pp. 1224-1228: IEEE.

- [48] R. G. Prabu, "Effect of Plug-in electric Vehicles on Load Frequency Control," in *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2018, pp. 1-5: IEEE.
- [49]¹⁵ D. K. Sahu, S. Pati, P. K. Mohanty, and S. Panda, "Teaching-learning based optimization algorithm based fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-area power system," *Applied Soft Computing*, vol. 27, pp. 240-249, 2015.
- [50] S. M. H. Hosseini and A.³⁷ Rezvani, "Modeling and simulation to optimize direct power control of DFIG in variable-speed pumped-storage power plant using teaching-learning-based optimization technique," *Soft Computing*, vol. 24, no. 22, pp. 16895-16915, 2020.
- [51]³⁸ A. Barisal, "Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems," *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol. 66, pp. 67-77, 2015.
- [52]¹⁸ I. S. Gorripotu, H. Samalla, C. J. M. Rao, A. T. Azar, and D. Pelusi, "TLBO algorithm optimized fractional-order PID controller for AGC of interconnected power system," in *Soft computing in data analytics*: Springer, 2019, pp. 847-855.
- [53]⁴⁶ V. Rajinikanth and S. C. Satapathy, "Design of controller for automatic voltage regulator using teaching learning based optimization," *Procedia Technology, Elsevier*, vol. 21, pp. 295-302, 2015.
- [54] A. Badis and M. H. Boujmil, "Cascade Control Based on TLBO-FOPID for Grid-Connected PV Systems," in *International conference on the Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications*, 2018, pp. 156-166: Springer.
- [55] S. A. Basit and M. Abido, "Design of STATCOM Damping Controller Using Teaching Learning Based Optimization," in *2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, 2021, pp. 1-6: IEEE.
- [56]²² M. R. Khalghani and M. H. Khooban, "A novel self-tuning control method based on regulated bi-objective emotional learning controller's structure with TLBO algorithm to control DVR compensator," *Applied Soft Computing*, vol. 24, pp. 912-922, 2014.

- [57] ¹⁴ R. K. Sahu, S. Panda, U. K. Rout, and D. K. Sahoo, "Teaching learning based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller," *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol. 77, pp. 287-301, 2016.
- [58] ²¹ R. K. Sahu, T. S. Gorripotu, and S. Panda, "Automatic generation control of multi-area power systems with diverse energy sources using teaching learning based optimization algorithm," *Engineering Science Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 113-134, 2016.
- [59] ⁵ M. M. Elkholy, "Steady state and dynamic performance of self-excited induction generator using FACTS controller and teaching learning-based optimization algorithm," *COMPEL-The international journal for computation mathematics in electrical electronic engineering*, 2018.
- [60] ⁴⁴ H. Boucekara and M. Nahas, "Optimization of electromagnetics problems using an improved teaching-learning-based-optimization technique," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J*, vol. 30, no. 12, pp. 1341-1347, 2015.
- [61] ³³ H. Radmanesh and R. Sharifi, "Elimination of sub-synchronous resonance via doubly-fed induction generator based on teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm," in *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2019, pp. 748-752: IEEE.
- [62] ⁵ B. Kheireddine, B. Zoubida, H. Tarik, and A. Imed, "Application of PSO and TLBO algorithms with neural network for optimal design of electrical machines," *COMPEL-The international journal for computation mathematics in electrical electronic engineering*, 2018.
- [63] ⁵⁵ D. Singh and J. Dhillon, "Teaching-Learning based optimization technique for the design of LP and HP digital IIR filter," *Recent Advances in Electrical Engineering Electronic Devices*, pp. 203-208, 2013.
- [64] ¹¹ M. A. Gunen, E. Besdok, P. Civicioglu, and U. H. Atasever, "Camera calibration by using weighted differential evolution algorithm: a comparative study with ABC, PSO, COBIDE, DE, CS,

- GWO, TLBO, MVMO, FOA, LSHADE, ZHANG and BOUGUET," *Neural Computing Applications*, vol. 32, no. 23, pp. 17681-17701, 2020.
- [65] D. Y. Chilamkurthi, G. C. Tirupatipati, J. Sulochanarani, and V. K. Pamula, "Design of optimal digital FIR filters using TLBO and Jaya algorithms," in *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2017, pp. 0538-0541: IEEE.
- [66] A. Karampatea, A. D. Boursianis, S. K. Goudos, and K. Siakavara, "Triple-band Inverted-F Antenna Using QR-OBL TLBO Algorithm for RF Energy Harvesting Applications," in *2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, 2020, pp. 1-4: IEEE.
- [67] Z. Cui, C. Li, W. Dai, L. Zhang, and Y. Wu, "A Hierarchical Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm for Optimal Design of Hybrid Active Power Filter," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 143530-143544, 2020.
- [68] H. Jamal, S. Albatran, and I. A. Smadi, "Optimal design of output LC filter and cooling for three-phase voltage-source inverters using teaching-learning-based optimization," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [69] R. Xue and Z. Wu, "A survey of application and classification on teaching-learning-based optimization algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 1062-1079, 2019.
- [70] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. J. C.-A. D. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," vol. 43, no. 3, pp. 303-315, 2011.
- [71] F. Zou, D. Chen, and Q. Xu, "A survey of teaching-learning-based optimization," *Neurocomputing*, vol. 335, pp. 366-383, 2018.
- [72] R. V. Rao, "Teaching-learning-based optimization algorithm," in *Teaching learning based optimization algorithm*: Springer Nature, 2016, pp. 9-39.

- [73] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimedia Tools Applications*, vol. 80, no. 5, pp. 8091-8126, 2021.
- [74] E. F. Firmansyah, O. A. Qudsi, M. N. Habibi, and N. A. Windarko, "Optimized Modified PWM based on Differential Evolution for Reducing THD on Multilevel Inverter," in *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2020, pp. 113-118: IEEE.

Anexos

Anexo A. Código TLBO [1]

```
% Create an Instance of Optimization Problem

format short

clc, clear all

tic

problem = ypea_problem();

% Set the Problem Type

problem.type = 'min';

problem.vars = [

    ypea_var('x', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)

    ypea_var('y', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)

    ypea_var('z', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)

];

f = ypea_test_function('fns2');

g = ypea_test_function('fns3');

h = ypea_test_function('fns4');

problem.obj_func = @(sol) g(sol.x,sol.y,sol.z)+f(sol.x,sol.y,sol.z)+h(sol.x,sol.y,sol.z)

alg = ypea_tlbo();

% Maximum Number of Iterations

alg.max_iter = 50;

% Population Size

alg.pop_size = 20;

best_sol = alg.solve(problem);

best_sol.solution
```

```

toc
sum = 0;
for n = 3:2:49
    H =
    (((cos(best_sol.solution.x*n*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*n*pi/180)+cos(best_sol.s
olution.z*n*pi/180))/n)^2);
    sum = sum+H;
end
THD =
100*sqrt(sum)/(cos(best_sol.solution.x*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*pi/180)+cos(
best_sol.solution.z*pi/180))
figure;
alg.semilogy('nfe', 'LineWidth', 2);
xlabel('NFE');
ylabel('Best Objective Value');
title(['Results of ' alg.full_name]);
grid on;

```

Anexo C. Código GA [1]

```
% Create an Instance of Optimization Problem

format short

clc

clear all

tic

problem = ypea_problem();

% Set the Problem Type

problem.type = 'min';

problem.vars = [

    ypea_var('x', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.999)

    ypea_var('y', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.999)

    ypea_var('z', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.999)

];

f = ypea_test_function('fns2GA');

g = ypea_test_function('fns3GA');

h = ypea_test_function('fns4GA');

problem.obj_func = @(sol) g(sol.x,sol.y,sol.z)+f(sol.x,sol.y,sol.z)+h(sol.x,sol.y,sol.z)

alg = ypea_ga();

% Maximum Number of Iterations

alg.max_iter = 50;

% Population Size

alg.pop_size = 20;

alg.crossover_prob = 0.4;

% Crossover Inflation Factor

alg.crossover_inflation = 0.4;
```

```

% Mutation Probability
alg.mutation_prob = 0.3;
% Mutation Rate
alg.mutation_rate = 0.01;
% Mutation Step Size
alg.mutation_step_size = 0.5;
% Mutation Step Size Damp
alg.mutation_step_size_damp = 0.99;
% Selection Method
alg.selection = 'roulettwheel';
% Selection Pressure
alg.selection_pressure = 5;
best_sol = alg.solve(problem);
best_sol.solution
toc
sum = 0;
for n = 3:2:49
    H =
    (((cos(best_sol.solution.x*n*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*n*pi/180)+cos(best_sol.s
olution.z*n*pi/180))/n)^2);
    sum = sum+H;
end
THD =
100*sqrt(sum)/(cos(best_sol.solution.x*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*pi/180)+cos(
best_sol.solution.z*pi/180))
figure;
alg.semilogy('nfe', 'LineWidth', 2);

```

```
xlabel('NFE');  
ylabel('Best Objective Value');  
title(['Results of ' alg.full_name]);  
grid on;
```

Anexo E. Código DE [1]

```
% Create an Instance of Optimization Problem
format short
clc
clear all
tic
problem = ypea_problem();
% Set the Problem Type
problem.type = 'min';
problem.vars = [
    ypea_var('x', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)
    ypea_var('y', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)
    ypea_var('z', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)
];
f = ypea_test_function('fns2DE');
g = ypea_test_function('fns3DE');
h = ypea_test_function('fns4DE');
problem.obj_func = @(sol) g(sol.x,sol.y,sol.z)+f(sol.x,sol.y,sol.z)+h(sol.x,sol.y,sol.z)
alg = ypea_de('DE/rand/1/bin');
% Maximum Number of Iterations
alg.max_iter = 50;
% Population Size
alg.pop_size = 20;
% Minimum Value of Acceleration Coefficient
alg.beta_min = 0.1;
% Maximum Value of Acceleration Coefficient
alg.beta_max = 0.3;
% Crossover Probability
alg.crossover_prob = 0.9;
best_sol = alg.solve(problem);
best_sol.solution
toc
```

```

sum = 0;

for n = 3:2:49
    H
    (((cos(best_sol.solution.x*n*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*n*pi/180)+cos(best_sol.s
olution.z*n*pi/180))/n)^2);
    sum = sum+H;
end
    THD
    100*sqrt(sum)/(cos(best_sol.solution.x*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*pi/180)+cos(
best_sol.solution.z*pi/180))
figure;
alg.semilogy('nfe', 'LineWidth', 2);
xlabel('NFE');
ylabel('Best Objective Value');
title(['Results of ' alg.full_name]);
grid on;

```

Anexo G. Código PSO [1]

```
% Create an Instance of Optimization Problem
format short
clc
clear all
tic
problem = ypea_problem();
% Set the Problem Type
problem.type = 'min';
problem.vars = [
    ypea_var('x', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)
    ypea_var('y', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)
    ypea_var('z', 'real', 'lower_bound', 0, 'upper_bound', 89.9999)
];
f = ypea_test_function('fns2PSO');
g = ypea_test_function('fns3PSO');
h = ypea_test_function('fns4PSO');
problem.obj_func = @(sol) g(sol.x,sol.y,sol.z)+f(sol.x,sol.y,sol.z)+h(sol.x,sol.y,sol.z)
alg = ypea_pso();
% Maximum Number of Iterations
alg.max_iter = 50;
% Population Size
alg.pop_size = 20;
% Inertia Weight
alg.w = 0.4;
% Inertia Weight Damp Rate
alg.wdamp = 0.9;
% Personal Learning (Acceleration) Coefficient
alg.c1 = 2;
% Global Learning (Acceleration) Coefficient
alg.c2 = 2;
best_sol = alg.solve(problem);
```

```

best_sol.solution
toc
sum = 0;
for n = 3:2:49
    H
    (((cos(best_sol.solution.x*n*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*n*pi/180)+cos(best_sol.s
olution.z*n*pi/180))/n)^2);
    sum = sum+H;
end
    THD
    100*sqrt(sum)/(cos(best_sol.solution.x*pi/180)+cos(best_sol.solution.y*pi/180)+cos(
best_sol.solution.z*pi/180))
figure;
alg.semilogy('nfe', 'LineWidth', 2);
xlabel('NFE');
ylabel('Best Objective Value');
title(['Results of ' alg.full_name]);
grid on;

```

Anexo I. Código Función Objetivo [1]

```
function THD = fns2PSO(x,y,z)
sum = 0;
for n = 3:2:49
    H = (((cos(x*n*pi/180)+cos(y*n*pi/180)+cos(z*n*pi/180))/n)^2);
    sum = sum+H;
end
THD = 100*sqrt((sum)/(cos(x*pi/180)+cos(y*pi/180)+cos(z*pi/180))^2);
end
```

Anexo J. Código Índice de Modulación

```
function Val = fns3PSO(x,y,z)
```

```
V1=(400/(3*pi))*((cos(x*pi/180))+cos(y*pi/180))+cos(z*pi/180));
```

```
IM=116;
```

```
Val=(abs(IM-V1));
```

```
End
```

Anexo K. Código Restricciones

```
function e1 = fns4PSO(x,y,z)
```

```
e1 = 0;
```

```
if x < y && y < z
```

```
    else e1 = e1+50;
```

```
end
```

```
end
```

Anexo L. Ejemplo Cálculos Teóricos

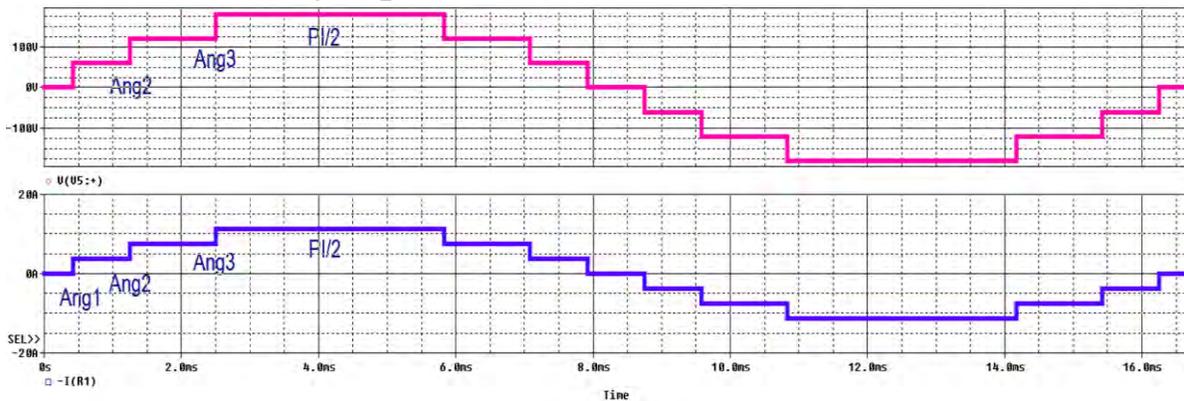


Ilustración 1 Tensión y corriente de un inversor multinivel de 7 niveles.

Ejemplo de los cálculos teóricos realizados, que para fines prácticos fueron programados en Matlab para la obtención de todos los datos de potencia, factor de potencia, valor eficaz y los armónicos de cada uno de los algoritmos.

Datos:

$$\alpha_1 = 416.66\mu s = 9^\circ \quad \alpha_2 = 1.25ms = 27^\circ \quad \alpha_3 = 2.5ms = 54^\circ \quad \frac{\pi}{2} = 4.16ms = 90^\circ$$

$$T = 2\pi = 16.66ms \quad R = 16\Omega$$

$$1. V_m = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} u(t) dt$$

$$V_m = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha_1} 0 dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} 60 dt + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} 120 dt + \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} 180 dt - \int_{\pi}^{\pi+\alpha_1} 0 dt - \int_{\pi+\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} 60 dt - \int_{\pi+\alpha_2}^{\pi+\alpha_3} 120 dt - \int_{\pi+\alpha_3}^{2\pi} 180 dt \right] = 0V$$

$$2. V_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} u^2(t) dt$$

$$V_{ef}^2 = \frac{2}{T} \left[2 \int_0^{\alpha_1} 0^2 dt + 2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} 60^2 dt + 2 \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} 120^2 dt + 2 \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} 180^2 dt \right]$$

$$V_{ef}^2 = \frac{2}{16.66ms} [2(3600(1.25ms - 416.66\mu s)) + 2(14400(2.5ms - 1.25ms)) + 2(32400(4.16ms - 2.5ms))]$$

$$V_{ef}^2 = \frac{2}{16.66ms} [6 + 36 + 107.568] = \frac{2}{16.66ms} (149.568) = 17955.34$$

$$V_{ef} = \sqrt{17955.34} = 133.9V_{RMS}$$

$$3. P = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} vi dt$$

$$P = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \left[\int_0^{\alpha_1} (0V)(0A) dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (60V)(3.75A) dt \right. \\ \left. + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} (120V)(7.5A) dt + \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} (180V)(11.75A) dt \right]$$

$$P = \frac{1}{4.16ms} [(225(1.25ms - 416.66\mu s)) + (900(2.5ms - 1.25ms)) \\ + (2115(4.16ms - 2.5ms))]$$

$$P = \frac{1}{4.16ms} [0.1875 + 1.125 + 3.5109] = \frac{1}{4.16ms} (4.8234) = 1159.471W$$

$$4. S = \left(\sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} v^2 dt} \right) \left(\sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i^2 dt} \right)$$

$$S = \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} \int_0^{\alpha_1} 0^2 dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} 60^2 dt + 2 \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} 120^2 dt + 2 \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} 180^2 dt} \right) \\ * \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} \int_0^{\alpha_1} 0^2 dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} 3.75^2 dt + 2 \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} 7.5^2 dt + 2 \int_{\alpha_3}^{\frac{\pi}{2}} 11.75^2 dt} \right)$$

S

$$= \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} [(3600(1.25ms - 416.66\mu s)) + (14400(2.5ms - 1.25ms)) + (32400(4.16ms - 2.5ms))]} \right) \\ * \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} [(14.0625(1.25ms - 416.66\mu s)) + (56.25(2.5ms - 1.25ms)) + (138.0625(4.16ms - 2.5ms))]} \right)$$

$$S = \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} [3 + 8 + 53.784]} \right) * \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} [0.01171 + 0.0703 + 0.2291]} \right)$$

$$S = \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} [74.784]} \right) * \left(\sqrt{\frac{1}{4.16ms} [0.3111]} \right) = (134.078V)(8.6477A)$$

$$= 1159.466W$$

$$5. FdP = \frac{P}{S}$$

$$FdP = \frac{1159.471W}{1159.466W} = 1.0000043 \approx 1$$

Estos cálculos se pueden comprobar mediante la señal de salida de la simulación que se presentan en las siguientes figuras:

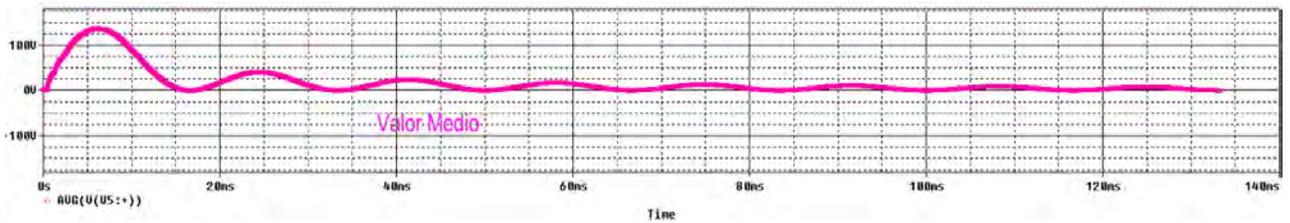


Ilustración 2 Valor medio de la tensión de salida.

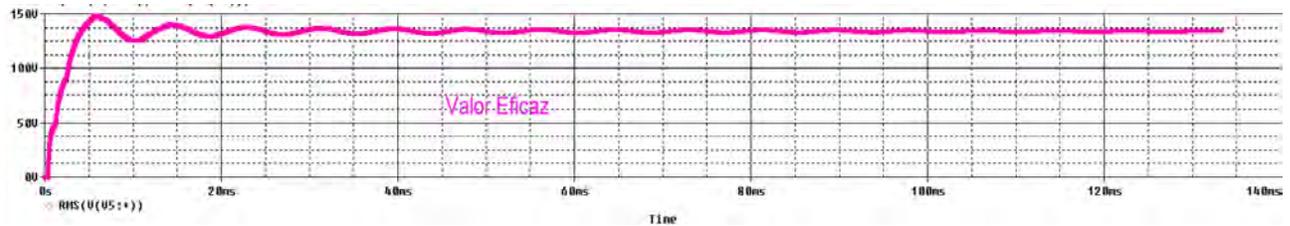


Ilustración 3 Valor RMS de la tensión de salida.

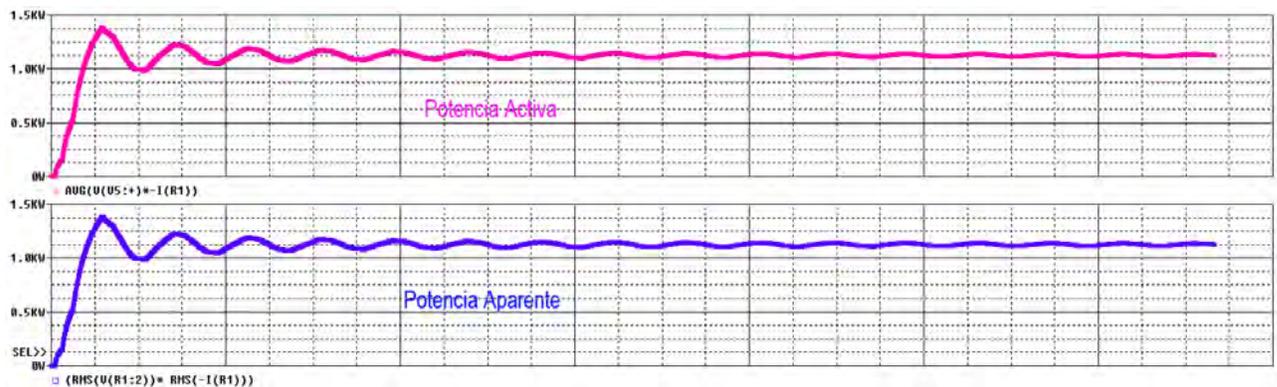


Ilustración 4 Potencia activa y aparente del circuito inversor.

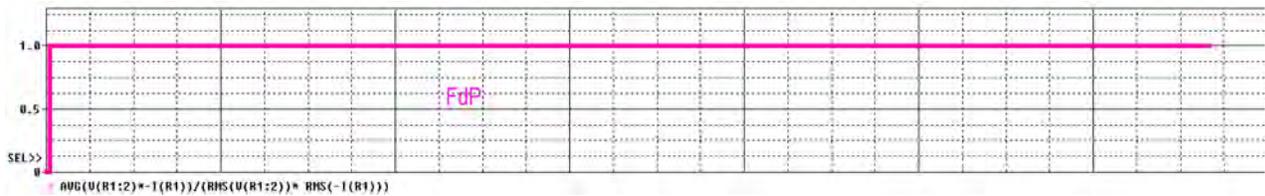


Ilustración 5 Factor de potencia de inversor.

Mediante el simulador Pspice se obtuvieron cada uno de los armónicos, para comprobarlos con los valores calculados, se sabe que este tipo de señal tiene simetría de $\frac{1}{4}$ de onda, por lo que solo tiene valores de b y además los armónicos son impares, la ecuación es la siguiente:

$$b_{imp} = \frac{4V_{dc}}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3)]$$

$$b_1 = \frac{4 * 60}{1\pi} [\cos(1 * 9^\circ) + \cos(1 * 27^\circ) + \cos(1 * 54^\circ)] = 188.42$$

$$b_3 = \frac{4 * 60}{3\pi} [\cos(3 * 9^\circ) + \cos(3 * 27^\circ) + \cos(3 * 54^\circ)] = 2.4542$$

Se repiten estas ecuaciones hasta el armónico 49, para obtener más rápido estos cálculos se realizó una tabla en Excel que permite calcular cada uno de los armónicos y posteriormente se comprueban con los armónicos que se obtienen en Pspice.

a1	a2	a3	n	$\Sigma\cos$	$4vdc/n\pi*\Sigma\cos$	Arm^2
9	27	54				
0.15707963	0.4712389	0.9424778	1	2.46648012	188.425201	
0.15707963	0.4712389	0.9424778	3	0.09638447	2.45441045	6.02413065
0.15707963	0.4712389	0.9424778	5	-7.275E-17	-1.1115E-15	1.2355E-30
0.15707963	0.4712389	0.9424778	7	0.41735868	4.55483631	20.7465338
0.15707963	0.4712389	0.9424778	9	-0.88534129	-7.51501025	56.475379
0.15707963	0.4712389	0.9424778	11	-0.29022922	-2.01562536	4.06274561
0.15707963	0.4712389	0.9424778	13	1.48475436	8.72514444	76.1281455
0.15707963	0.4712389	0.9424778	15	7.7336E-16	3.9387E-15	1.5513E-29
0.15707963	0.4712389	0.9424778	17	-1.99849751	-8.98082137	80.6551524
0.15707963	0.4712389	0.9424778	19	-1.29090961	-5.19043316	26.9405964
0.15707963	0.4712389	0.9424778	21	-1.29090961	-4.69610619	22.0534134
0.15707963	0.4712389	0.9424778	23	-1.99849751	-6.6379984	44.0630228
0.15707963	0.4712389	0.9424778	25	-3.8054E-15	-1.1629E-14	1.3522E-28
0.15707963	0.4712389	0.9424778	27	1.48475436	4.20099547	17.6483629
0.15707963	0.4712389	0.9424778	29	-0.29022922	-0.76454755	0.58453296
0.15707963	0.4712389	0.9424778	31	-0.88534129	-2.18177717	4.76015161
0.15707963	0.4712389	0.9424778	33	0.41735868	0.9661774	0.93349877
0.15707963	0.4712389	0.9424778	35	-4.8995E-16	-1.0694E-15	1.1436E-30
0.15707963	0.4712389	0.9424778	37	0.09638447	0.19900625	0.03960349
0.15707963	0.4712389	0.9424778	39	2.46648012	4.83141542	23.3425749
0.15707963	0.4712389	0.9424778	41	2.46648012	4.59573662	21.120795
0.15707963	0.4712389	0.9424778	43	0.09638447	0.17123794	0.02932243
0.15707963	0.4712389	0.9424778	45	-2.098E-15	-3.5617E-15	1.2686E-29
0.15707963	0.4712389	0.9424778	47	0.41735868	0.67837988	0.46019926

0.15707963	0.4712389	0.9424778	49	-0.88534129	-1.380308	1.90525019
$\Sigma =$						407.973411
$Raiz(\Sigma) =$						20.1983517
$Raiz(\Sigma) / Fun =$						0.1071956
$*100 =$						10.7195596

HARMONIC NC	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT						
1	6.0000E+01	1.8842E+02	20	1.2000E+03	1.6287E-05			
2	1.2000E+02	5.9922E-03	21	1.2600E+03	4.6985E+00			
3	1.8000E+02	2.4541E+00	22	1.3200E+03	1.3678E-02			
4	2.4000E+02	1.8183E-02	23	1.3800E+03	6.6394E+00			
5	3.0000E+02	1.1308E-02	24	1.4400E+03	1.1116E-02			
6	3.6000E+02	1.1823E-02	25	1.5000E+03	1.0234E-02			
7	4.2000E+02	4.5580E+00	26	1.5600E+03	2.7848E-02			
8	4.8000E+02	1.5463E-02	27	1.6200E+03	4.1961E+00			
9	5.4000E+02	7.5118E+00	28	1.6800E+03	2.1064E-02			
10	6.0000E+02	2.0344E-02	29	1.7400E+03	7.7243E-01			
11	6.6000E+02	2.0077E+00	30	1.8000E+03	2.0429E-02	41	2.4600E+03	4.5934E+00
12	7.2000E+02	2.1169E-02	31	1.8600E+03	2.1850E+00	42	2.5200E+03	5.9719E-03
13	7.8000E+02	8.7301E+00	32	1.9200E+03	1.5514E-02	43	2.5800E+03	1.7132E-01
14	8.4000E+02	2.7921E-02	33	1.9800E+03	9.6300E-01	44	2.6400E+03	1.8112E-02
15	9.0000E+02	1.0208E-02	34	2.0400E+03	1.1859E-02	45	2.7000E+03	1.1311E-02
16	9.6000E+02	1.1110E-02	35	2.1000E+03	1.1305E-02	46	2.7600E+03	1.1788E-02
17	1.0200E+03	8.9794E+00	36	2.1600E+03	1.8254E-02	47	2.8200E+03	6.8157E-01
18	1.0800E+03	1.3645E-02	37	2.2200E+03	1.9972E-01	48	2.8800E+03	1.5413E-02
19	1.1400E+03	5.1881E+00	38	2.2800E+03	6.0124E-03	49	2.9400E+03	1.3771E+00
			39	2.3400E+03	4.8337E+00	50	3.0000E+03	2.0261E-02
			40	2.4000E+03	2.8802E-02			

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.0720E+01 PERCENT

Ilustración 6 Armónicos obtenidos mediante el simulador Pspice.

Anexo M. Productos Académicos

Número Especial de la Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada. ISSN 2007-9478, Vol.8, Núm. 17. Año 2022

Análisis de la relación de niveles entre un inversor multinivel monofásico y uno trifásico

Ing. Kenia Gómez Díaz., Dr. Jesús Aguayo Alquicira., Dra. Susana De León Aldaco., Ing. Rafael González Chávez

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, m21ce033@cenidet.tecnm.mx, Cuernavaca, Morelos, México.
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, jesus.aa@cenidet.tecnm.mx, Cuernavaca, Morelos, México.
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, susana.da@cenidet.tecnm.mx, Cuernavaca, Morelos, México.
Sector Privado, rafa.9ken@gmail.com, Cuernavaca, Morelos, México.

know quickly whether a single-phase or three-phase MLI is being analyzed. PSPICE OrCAD® 17.4-2019 software was used for the simulation of the multilevel inverters, in such a way that the levels that should be presented were obtained according to the number of full bridges in the inverter and whether it is single-phase or three-phase. The relationship is defined by a mathematical equation deduced from the simulation results, which were from two levels up to nine levels in single-phase.

Keywords—Full bridge, H-bridge, Multilevel Inverter (MLI), Single-phase Inverter, Three-phase Inverter.

Ilustración 7 Artículo publicado en la Revista Aristas



Ilustración 8 Constancia de participación en el Congreso Internacional De Investigación Tijuana.



electronics

an Open Access Journal by MDPI



CERTIFICATE OF ACCEPTANCE

Certificate of acceptance for the manuscript (**electronics-1935768**) titled:
Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm Applied in Electronic Engineering: A Survey

Authored by:

Kenia Yadira Gómez Díaz; Susana Estefany De León Aldaco; Jesus Aguayo Alquicira; Mario Ponce-Silva; Víctor Hugo Olivares Peregrino

has been accepted in *Electronics* (ISSN 2079-9292) on 20 October 2022



Academic Open Access Publishing
since 1996

Basel, October 2022

Ilustración 9 Artículo publicado en la revista electronics.

Review

Teaching–Learning-Based Optimization Algorithm Applied in Electronic Engineering: A Survey

Kenia Yadira Gómez Díaz , Susana Estefany De León Aldaco , Jesús Aguayo Alquicira , Mario Ponce-Silva 
and Víctor Hugo Olivares Peregrino

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca 62490, Mexico

* Correspondence: susana.da@cetidet.cicm.mx

Abstract: This paper presents a survey of the articles published in the period 2013–2021 related to the application of the teaching–learning-based optimization (TLBO), which reproduces the dynamics that occur in a classroom with the teacher and the student. This paper uses the algorithm to optimize some objective functions related to the design in the electronics field. A total of 62 papers were reviewed and some graphs were generated to summarize the most relevant of these articles. These have been classified into five categories based on the areas of electronic engineering, such as power electronics, control, electromagnetism, digital electronics, and analogue electronics. Electronic engineering has been becoming increasingly relevant in world technological development, for example, in electric vehicles or generating electricity from renewable energy sources to counteract the environmental impact that non-renewable sources generate. The TLBO algorithm has attracted the interest of a large number of researchers due to its efficiency, speed, and low initialization parameter requirements. This article is composed of two stages, the first is a summary of the information on electronics, in general, encompassing all its areas, and the second focuses on the algorithm applied to multilevel inverters; for each stage, graphs and tables are shown.

Keywords: bio-inspired computing; multilevel inverter; optimization; TLBO algorithm; power converter; power electronics



Citation: Gómez Díaz, K.Y.; De León Aldaco, S.E.; Aguayo Alquicira, J.; Ponce-Silva, M.; Olivares Peregrino, V.H. Teaching–Learning-Based Optimization Algorithm Applied in Electronic Engineering: A Survey. *Electronics* **2022**, *11*, 3451. <https://doi.org/10.3390/electronics11213451>

Academic Editor:
Ahmed Abu-Statia

Received: 9 September 2022

Accepted: 20 October 2022

Published: 25 October 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Optimization can be defined as the search for the solution to a problem in which it is necessary to maximize or minimize a single-objective function (single-objective) or a set of them (multi-objective) within a domain containing the values of acceptable variables (decision variables), while some constraints must be satisfied [1]. Its main task is to find the best possible solution to a specific problem. Optimization of a product or process is the determination of the conditions that result in its optimal performance, based on the optimization parameters introduced in the mathematical formulation of the actual model [2]. Optimization can be implemented in many areas, such as engineering, design, control, and economics, among others. However, the fact that it can be optimized in all these areas does not imply that it is an easy task to solve, as some engineering problems are very complicated.

In 1939, the first linear programming algorithm was developed and used in the area of economics by L. Kantorovich, who formulated the optimal planning production problem and efficient methods for finding solutions using linear programming. For this work, he shared the noble prize with T. Koopmans in 1975 [3].

To optimize, an objective function is required, which is the mathematical equation that describes the problem; it must also be defined whether it is intended to minimize or maximize the problem, the decision variables, and their respective constraints, based on which parameters or limits to the algorithm will make decisions. It should be added that the algorithms must be programmed using a programming language.

● 17% de similitud general

Principales fuentes encontradas en las siguientes bases de datos:

- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 12% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

FUENTES PRINCIPALES

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	revistaaristas.tij.uabc.mx	Internet	2%
2	tesis.ipn.mx	Internet	<1%
3	cenidet.edu.mx	Internet	<1%
4	Kenia Yadira Gómez Díaz, Susana Estefany De León Aldaco, Jesus Agu...	Crossref	<1%
5	mdpi-res.com	Internet	<1%
6	hindawi.com	Internet	<1%
7	praiseworthyprize.org	Internet	<1%
8	marketingonline.gratis	Internet	<1%
9	sid.ir	Internet	<1%

10	Murat Toren, Hakki Mollahasanoglu. "Determination of Optimum Stator...	<1%
	Crossref	
11	Zuoming Fu, Ziyi Jin, Chongan Zhang, Zhongyu He, Zhenzhou Zha, Chu...	<1%
	Crossref	
12	bfemu.journals.ekb.eg	<1%
	Internet	
13	pure.tue.nl	<1%
	Internet	
14	sciepub.com	<1%
	Internet	
15	ijeee.iust.ac.ir	<1%
	Internet	
16	shura.shu.ac.uk	<1%
	Internet	
17	Muhammad Salman Fakhar, Sheroze Liaquat, Syed Abdul Rahman Kas...	<1%
	Crossref	
18	Mehrdad Ahmadi Kamarposhti, Hassan Shokouhandeh, Meghdad Alipu...	<1%
	Crossref	
19	ijpeds.iaescore.com	<1%
	Internet	
20	researchportal.northumbria.ac.uk	<1%
	Internet	
21	colibri.udelar.edu.uy	<1%
	Internet	

22	ijcaonline.org	Internet	<1%
23	scholarworks.uark.edu	Internet	<1%
24	Amirhossein Jahanfar, M. Tariq Iqbal. "A Comparative Study of Solar W...	Crossref	<1%
25	Tahira Yaqoob, Malika Rani, R. Neffati, Naveed Kausar Janjua, Safia Kh...	Crossref	<1%
26	dspace.uclv.edu.cu	Internet	<1%
27	inass.org	Internet	<1%
28	Hale Bakir, Adel Merabet, Rupak Kanti Dhar, Ahmet Afsin Kulaksiz. "Ex...	Crossref	<1%
29	open.uct.ac.za	Internet	<1%
30	pdfs.semanticscholar.org	Internet	<1%
31	just.edu.jo	Internet	<1%
32	Luca Orru, Giuseppe Lisciandrello, Stefano Gliozzi, Marco De Ieso, Ant...	Crossref	<1%
33	Robin Noel Damas, Yongju Son, Myungseok Yoon, Sung-Yul Kim, Sung...	Crossref	<1%

34	journal.ugm.ac.id	Internet	<1%
35	Mohamed I. Abdelwanis, F. Selim. "Optimal Operation of Synchronous ...	Crossref	<1%
36	ijeat.org	Internet	<1%
37	ijew.io	Internet	<1%
38	iotpe.com	Internet	<1%
39	nitrkl.ac.in	Internet	<1%
40	Sarika V. Tade, Vilas N. Ghate, Aishwarya V. Khedkar, Manohar N. Kalg...	Crossref	<1%
41	researchr.org	Internet	<1%
42	Nurul Nadia Mohammad, Ahmad Aftas Azman, Mohd Hezri Marzaki, R...	Crossref	<1%
43	Ru Xue, Zongsheng Wu. "A Survey of Application and Classification on ...	Crossref	<1%
44	journals.riverpublishers.com	Internet	<1%
45	rivieresdusud.uasz.sn	Internet	<1%

46	Jeffy Elson, Jency Precilla, P. Reshma, N. Sri Madhavaraja. "Automate...	<1%
	Crossref	
47	ciateq.repositorioinstitucional.mx	<1%
	Internet	
48	upcommons.upc.edu	<1%
	Internet	
49	mdpi.com	<1%
	Internet	
50	Jayrajsinh B. Solanki, Kalpeshkumar J. Chudasama. "Concepts, Config...	<1%
	Crossref	
51	lucris.lub.lu.se	<1%
	Internet	
52	acikbilim.yok.gov.tr	<1%
	Internet	
53	assets.researchsquare.com	<1%
	Internet	
54	jultika.oulu.fi	<1%
	Internet	
55	link.springer.com	<1%
	Internet	
56	Jose Maurilio Raya-Armenta, Najmeh Bazmohammadi, Juan Gabriel A...	<1%
	Crossref	
57	ijeecs.iaescore.com	<1%
	Internet	

58	ph02.tci-thaijo.org Internet	<1%
59	researchgate.net Internet	<1%
60	Sunita S. Biswal, Dipak Ranjan Swain, Pravat Kumar Rout. "VSC based ... Crossref	<1%
61	docplayer.es Internet	<1%
62	iaras.org Internet	<1%
63	hdl.handle.net Internet	<1%
64	repositorio.unp.edu.pe Internet	<1%
65	sea.iau.ir Internet	<1%