

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE IRAPUATO



**INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE IRAPUATO**

**ESTUDIOS CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ OFICIAL
NÚMERO 11-00065**

**ESTUDIO DEL MÉTODO TAGUCHI EN METAHEURÍSTICA
PARA LA REDUCCIÓN DE LA THD EN INVERSORES
MULTINIVEL**

OPCIÓN I: TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

ING. JOSÉ CRISTIAN SÁMANO GONZÁLEZ

ASESORES:

DR. ADOLFO RAFAEL LÓPEZ NÚÑEZ

DRA. SUSANA ESTEFANY DE LEÓN ALDACO

IRAPUATO, GTO

SEPTIEMBRE 2024



Irapuato, Guanajuato, **23/agosto/2024**
Solicitud de autorización de impresión de tesis

M. C. ISAI GONZALEZ GAONA
DIRECCIÓN ACADÉMICA
PRESENTE

A través de la presente reciba un cordial saludo y con base en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, vigentes, el comité tutorial del estudiante de la Maestría en Ingeniería Electrónica, José Cristian Sámano González (MIP22110004), cuya tesis lleva por título "Estudio del método Taguchi en metaheurística para la reducción de la THD en inversores multinivel", solicita atentamente la autorización de impresión de la tesis una vez que ha revisado y aprobado dicho documento de tesis.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Espíritu de Excelencia en Desarrollo Tecnológico

DR. ADOLFO RAFAEL LÓPEZ NÚÑEZ
DIRECTOR DE TESIS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TECNM/ITS de IRAPUATO

DR. GILBERTO MUÑOZ MORENO
SINODAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TECNM/ITS de IRAPUATO

DR. JOSÉ MIGUEL SOSA ZÚÑIGA
SINODAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TECNM/ITS de IRAPUATO

ccp. Encargado de la Maestría en Ingeniería Electrónica





INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE IRAPUATO

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

La tesis **Estudio del método Taguchi en metaheurística para la reducción de la THD en inversores multinivel** presentada para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería Electrónica con la opción en Electrónica de Potencia fue elaborada por el **Ing. José Cristian Sámano González** y aprobada el **13 de Agosto de 2024** por los suscritos, designados por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Irapuato.

Dr. Adolfo Rafael López Núñez
(Director de la tesis)

Dra. Susana Estefany de León Aldaco
(Codirectora de la tesis)

Dr. Gilberto Muñoz Moreno
(Sinodal)

Dr. José Miguel Sosa Zúñiga
(Sinodal)



INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE IRAPUATO

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Maestría en Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Irapuato, bajo la dirección del Dr. Adolfo Rafael López Núñez y en codirección de la Dra. Susana Estefany de León Aldaco adscrita al TECNM/CENIDET.

Agradezco también al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca asignada durante el periodo de la maestría, gracias porque fue posible culminar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero reconocer de manera especial al TecNM campus Irapuato (Instituto Tecnológico Superior de Irapuato - ITESI) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por proporcionar las bases estructurales y recursos materiales esenciales para mi formación. La financiación y los recursos que me fueron otorgados mediante las becas han sido fundamentales para sostener mi vida académica y personal durante estos dos años, permitiéndome centrarme plenamente en mi educación sin preocupaciones económicas adicionales. Agradezco también al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por la oportunidad de realizar una estancia de investigación en su institución. La cordialidad y atención de los docentes del área de tecnología electrónica han marcado profundamente mi experiencia, tanto académica como personalmente.

La idea de que mi crecimiento personal y profesional ha sido moldeado con la ayuda de otros es fundamental para reconocer a quienes han sido pilares en este proceso. Los fuertes, en mi experiencia, son aquellos que no solo se protegen a sí mismos, sino que extienden su fortaleza para cuidar de otros. En este sentido, mi gratitud es inmensa hacia aquellos que han sido mi soporte.

Quiero expresar mi especial agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Adolfo Rafael López Núñez, por ser un excepcional guía durante esta etapa. Su conocimiento, paciencia y empatía han sido fundamentales, siempre disponible para resolver mis dudas y brindarme su apoyo constante. Mi gran estima hacia él no solo se debe a su impecable profesionalismo, sino también a su genuina preocupación por mi desarrollo académico y personal, y su capacidad de proporcionar orientación en momentos clave lo que ha enriquecido profundamente nuestra interacción. Estoy inmensamente agradecido por la manera en que su apoyo se ha extendido más allá de los límites convencionales, lo que ha dejado una huella indeleble en mi formación.

Igualmente, estoy profundamente agradecido con mi codirectora, la Dra. Susana Estefany De León Aldaco, por su valiosa atención y cuyos valiosos consejos y paciencia han sido esenciales para el desarrollo de mi tema de tesis.

Agradezco también a mis sinodales, el Dr. Gilberto Muñoz Moreno y el Dr. José Miguel Sosa Zúñiga, por dedicar su tiempo al estudio detallado de mi proyecto y proporcionar observaciones perspicaces que enriquecieron mi trabajo.

Agradezco a los profesores por su paciencia y exigencia cuyos métodos me fortalecieron personal y académicamente.

Un reconocimiento especial a todos mis compañeros, cuyo apoyo fue indispensable no solo en las clases, sino también en los momentos de alegría y ánimo que compartimos.

Mis padres, José Sámano Reyes y Miriam Ivonne González Mondragón, merecen un agradecimiento especial por todos los sacrificios que han hecho para que yo pudiera alcanzar

esta meta. Su amor y motivación han sido mi refugio en los momentos más desafiantes, enseñándome a ser quien soy hoy. Gracias por ser mis mayores ejemplos a seguir.

A mis amigos, un especial agradecimiento a Ángel de Jesús Amézquita Hernández, Luis Aaron Alonso Arellano, José Gabriel Centeno Zavala, Carlos Antonio Muñoz Malpica, Jennifer Ortega, Jesús Francisco Pérez Rodríguez, Cristian Jesús Robles Aguilar, Christopher Jesús Rodríguez Cortés, y Miguel Ángel Salas Reyes, por sus consejos y gran apoyo, con quienes he compartido discusiones tanto académicas como personales que han enriquecido enormemente esta etapa. Quizá nuestros caminos estén separados, pero nuestra amistad permanece.

A todos, los reconozco como los más fuertes, aquellos cuyo ejemplo me inspira a aspirar a ser también uno de esos más fuertes, extendiendo mi capacidad para apoyar y cuidar a otros en el futuro. Mi profundo agradecimiento a cada uno por su invaluable ayuda y por las oportunidades estructurales y materiales que me han brindado.

GRACIAS A TODOS

“La actividad más importante que un ser humano puede lograr es aprender para entender, porque entender es ser libre.”

Baruch Spinoza

Tabla de contenido

Resumen	xiv
Abstract.....	xv
1. Introducción	1
1.1 Inversores.....	4
1.2 Inversores multinivel	5
1.3 Efectos de los armónicos en la red eléctrica.....	10
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 Objetivo general	16
1.4.2 Objetivos específicos.....	16
1.5 Justificación	16
2. Estado del arte	18
2.1 Eliminación selectiva de armónicos (SHE)	19
2.2 Minimización Óptima de la THD (OMTHD).....	20
2.3 Aplicaciones del algoritmo DE y GA	22
2.4 Conclusión del Estado del Arte.....	28
3. Marco teórico	30
3.1 Estocástico.	31
3.2 Algoritmos metaheurísticos	32
3.2.1 Algoritmos evolutivos.	33
3.2.2 Algoritmos basados en comportamiento de enjambre.	34
3.2.3 Algoritmos Genéticos (GA).	34
3.2.4 Algoritmo Evolutivo Diferencial (DE).....	38
3.3 Método Taguchi	42
3.3.1 Introducción al método Taguchi.....	42
3.3.2 Fases del Método Taguchi.....	42
4. Caso de estudio.....	46
4.1 Método Taguchi-DE.....	47
4.2 Método Taguchi-GA	56
5. Resultados experimentales	64
5.1 Introducción de implementación	65
5.2 Resultados con Taguchi-DE.....	70
5.3 Resultados con Taguchi-GA	72

6. Conclusiones y trabajos a futuros.....	75
6.1 Conclusiones.....	76
6.2 Trabajos a Futuro	77
6.3 Productos académicos.....	77
Referencias	78
Anexos	89
Anexo I. Código en FPGA con Taguchi-DE para el inversor CHBMLI de 5 niveles.	89
Anexo II. Código en FPGA con Taguchi-DE para el inversor CHBMLI de 7 niveles.	93
Anexo III. Código de MATLAB para obtener los valores enteros del FPGA para el inversor CHBMLI de 5 niveles.....	97
Anexo IV. Código de MATLAB para obtener los valores enteros del FPGA para el inversor CHBMLI de 7 niveles.....	99
Anexo V. Código de MATLAB para obtener los ángulos de conmutación para el inversor CHBMLI de 5 niveles.....	101
Anexo VI. Código de MATLAB para obtener los ángulos de conmutación para el inversor CHBMLI de 7 niveles.....	104
Anexo VII. Código en PIC (16F887) con Taguchi-GA para el inversor CHBMLI de 5 niveles.	107
Anexo VIII. Código en PIC (16F887) con Taguchi-GA para el inversor CHBMLI de 7 niveles.	110
Anexo IX. Configuración de Minitab en el Análisis de Datos.	114

Índice de Figuras.

Figura 1 Clasificación de las Topologías de Inversores [16].	5
Figura 2 Diagrama de un inversor DCMLI.	6
Figura 3 Diagrama de un inversor FCMLI.	7
Figura 4 Diagrama de un inversor CHBMLI.	8
Figura 5. FFT de los componentes armónicos relativas a la componente fundamental de una señal.	13
Figura 6. Voltaje de salida de un inversor CHBMLI [51].	20
Figura 7. Clasificación de métodos de optimización metaheurísticos [53].	33
Figura 8 Diagrama de flujo del Algoritmo Genético.	35
Figura 9. Diagrama de flujo del Algoritmo Evolutivo Diferencial.	39
Figura 10. Fases de aplicación para Taguchi.	43
Figura 11 Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.	51
Figura 12. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en cascada de 5 niveles con Taguchi-DE.	53
Figura 13. Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.	53
Figura 14. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en cascada de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab	55
Figura 15. Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	59
Figura 16. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en casca de 5 niveles con Taguchi-GA.	61
Figura 17. Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	62
Figura 18. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en cascada de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	63
Figura 19 Configuración del laboratorio.	65
Figura 20 Diagrama esquemático del inversor multinivel CHBMLI de 7 niveles.	66
Figura 21 Diagrama de puertas de comparación.	70
Figura 22 Señales de conmutación obtenidas en el FPGA para el inversor de 5 niveles.	70
Figura 23 Lectura en osciloscopio para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE.	71
Figura 24 Lectura en el FLUKE 435 - II para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE.	71
Figura 25 Lectura en osciloscopio para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE.	72
Figura 26 Lectura en el FLUKE 435 - II para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE.	72
Figura 27 Lectura en osciloscopio para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA.	73
Figura 28 Lectura en el FLUKE - II para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA.	73
Figura 29 Lectura en osciloscopio para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA	74
Figura 30 Lectura en el FLUKE 435 - II para el inversor de 7 niveles.	74

Índice de Tablas.

Tabla 1 Comparativa de configuraciones de MLI.	9
Tabla 2 Limite de distorsión de voltaje para la norma IEEE 519.	14
Tabla 3 Limite de distorsión de voltaje para la norma CFE L0000-45.	14
Tabla 4. Comparación de los valores asignados a los parámetros de DE en distintos trabajos.	23
Tabla 5. Selecciones reportadas para las generaciones de DE.	23
Tabla 6. DOE de Taguchi de los parámetros del solucionador de Matlab (YPEA) y sus niveles experimentales para el algoritmo evolutivo diferencial (DE).	48
Tabla 7. Diseño de experimentos (DOE) generada con Minitab para DE con Taguchi-DE.	49
Tabla 8. Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE.	50
Tabla 9. Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE.	50
Tabla 10. Tabla de análisis de varianza para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.	52
Tabla 11. Configuración de los factores para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.	52
Tabla 12. Tabla de análisis de varianza para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.	54
Tabla 13. Configuración de los factores para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.	54
Tabla 14. Configuración de los factores para el inversor H en cascada de 5 niveles ajustados con Taguchi-DE empleando Minitab.	55
Tabla 15. Configuración de los factores para el inversor H en cascada de 7 niveles ajustados con Taguchi-DE empleando Minitab.	56
Tabla 16. Parámetros del solucionador de MATLAB y sus niveles experimentales para GA.	57
Tabla 17. Diseño de experimentos generada con MiniTab para el solucionador de MATLAB para GA.	57
Tabla 18 Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA.	58
Tabla 19 Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA.	59
Tabla 20. Configuración de los factores para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	60
Tabla 21. Configuración de los factores para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	61
Tabla 22. Análisis de varianza para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	62

Tabla 23. Configuración de los factores para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.	63
Tabla 24 Características de modulo inversor puente H.	65
Tabla 25 Combinaciones posibles para generar los niveles del inversor de 5 niveles.	67
Tabla 26 Combinaciones posibles para generar los niveles del inversor de 7 niveles.	67
Tabla 27 Combinaciones para generar los intervalos de tiempo del inversor de 5 niveles. .	68
Tabla 28 Combinaciones para generar los intervalos de tiempo del inversor de 7 niveles. .	68
Tabla 29. Intervalos para el inversor de 5 niveles.	69
Tabla 30. Intervalos para el inversor de 7 niveles.	70
Tabla 31 Comparación de resultados finales obtenidos con el método Taguchi	76

Notación.

Acrónimos

DC	Corriente Continua.
AC	Corriente Alterna.
MLI	Inversores multinivel.
THD	Distorsión Armónica Total.
GA	Algoritmo Genético.
DE	Evolutivo Diferencial.
SPWM	Modulación de Ancho de Pulso Sinusoidal.
SVPWM	Modulación de Ancho de Pulso por Vectores Espaciales.
SHE	Eliminación Selectiva de Armónicos.
OMTHD	Minimización Óptima de la Distorsión Armónica Total.
OHSW	Forma de Onda Escalonada Armónica Optimizada.
DCMLI	Inversor Multinivel de Diodos Enclavados.
NPC	Inversor Multinivel con Punto Neutro.
FCMLI	Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes.
CHBMLI	Inverso Puente H en Cascada Multinivel.
SCR	Rectificador Controlado de Silicio.
FFT	Transformada Rápida de Fourier.
UPS	Sistema de alimentación ininterrumpida.
PLC	Controladores Lógicos Programables.
PWM	Modulación por Ancho de Pulsos.
EMI	Interferencia Electromagnética.
EA	Algoritmos Evolutivos.
PSO	Optimización por Enjambre de Partículas.
SPC	Control de Proceso Estadístico.
SED	Diseño de Experimentos Estadísticos.
OPF	Flujo de Potencia Óptimo.
LP	Programación Lineal.
RSM	Metodología de Superficie de Respuesta.
DOE	Diseño de Experimentos.
SLP	Programación Lineal Secuencial.
ANOVA	Análisis de Varianza.
SPC	Control Estadístico de Procesos.
SB	Menor es Mejor.
NB	Nominal es Mejor.
LB	Mayor es Mejor.
YPEA	Yarpiz Evolutionary Algorithms.
S/N	Señal a Ruido.
SQP	Programación Cuadrática Sucesiva.
IPM	Método de Puntos Interiores.

NRBO	Optimización Basada en Newton Raphson.
NR	Newton Raphson.
TAO	Operador de Evitación de Trampas.
MILP	Programación Lineal Mixta.
PV	Fotovoltaico.
SWO	Spider Wasp Optimizer.
MSA	Mantis Search Algorithm.
SAPF	Filtro activo de potencia en derivación.
MPPT	Seguimiento del punto de máxima potencia.
SEIG	Generador de inducción auto excitado.
CS	Cuckoo Search Algorithm.
MG	Engranaje magnético.
RMCSM-MG	Engranajes magnéticos radiales montados en superficies concéntricas.
PM	Magnético permanente.
SHE-PWM	Modulación de Ancho de Pulso con Eliminación Selectiva de Armónicos.

Resumen

Los inversores convierten el voltaje de corriente continua (DC) en alterna (AC). Pueden ser de dos niveles o multinivel. Los inversores multinivel (MLI) generan la tensión alterna a partir de múltiples niveles de voltaje continua, creando una onda escalonada cuyas características dependen de varios factores, como los ángulos de conmutación. En la actualidad, para el cálculo de estos ángulos en inversores multinivel se emplean métodos metaheurísticos que permiten reducir la distorsión armónica total (THD). Estos métodos ofrecen resultados rápidos y eficientes, demostrando ser particularmente eficaces en la reducción del THD, lo que ha llevado a su implementación en diversos trabajos de investigación. Este trabajo se enfoca en el análisis comparativo de los algoritmos genéticos (GA) y la evolución diferencial (DE) para optimizar los ángulos de conmutación y reducir la THD. Ambos algoritmos se ajustan utilizando el método Taguchi para identificar los mejores parámetros, logrando así una optimización precisa y efectiva para obtener ángulos de conmutación que reduzcan al mínimo la THD. Los ángulos de conmutación se implementaron en un inversor multinivel disponible en el laboratorio, mientras que los algoritmos se programaron en MATLAB.

Finalmente, el método Taguchi permitió identificar las configuraciones óptimas para los algoritmos GA y DE, minimizando la THD.

Abstract

Inverters convert direct current (DC) voltage into alternating current (AC). They can be either two-level or multilevel. Multilevel inverters (MLI) generate alternating voltage from multiple levels of DC voltage, creating a stepped waveform whose characteristics depend on various factors, such as switching angles. Currently, metaheuristic methods are employed to calculate these angles in multilevel inverters, which effectively reduce the total harmonic distortion (THD). These methods provide quick and efficient results, proving to be particularly effective in reducing THD, leading to their implementation in various research works. This work focuses on the comparative analysis of genetic algorithms (GA) and differential evolution (DE) to optimize the switching angles and reduce THD. Both algorithms are tuned using the Taguchi method to identify the best parameters, achieving precise and effective optimization for obtaining switching angles that minimize THD. The switching angles were implemented in a multilevel inverter available in the laboratory, while the algorithms were programmed in MATLAB. Finally, the Taguchi method allowed for the identification of optimal configurations for the GA and DE algorithms, minimizing the THD.

Capítulo

1. Introducción

La electrónica de potencia es un campo de la ingeniería enfocado al estudio, diseño y aplicación de sistemas para la conversión y distribución de energía eléctrica. Un inversor es un dispositivo que convierte corriente DC en AC. Este proceso se emplea en numerosas aplicaciones, ya que muchos equipos y sistemas eléctricos operan con corriente alterna, mientras que las fuentes de energía como las baterías o paneles solares suministran corriente continua. Los inversores se emplean en una variedad de contextos, desde pequeños dispositivos electrónicos hasta grandes instalaciones industriales. Se utilizan para alimentar sistemas de energía renovable, en la gestión de energía en vehículos eléctricos, en la transmisión y distribución de energía, y en sistemas de respaldo de energía como los sistemas de alimentación ininterrumpida. La atracción hacia las tecnologías de inversores multinivel radica en su capacidad para mitigar el impacto ambiental y, simultáneamente, satisfacer la demanda de mayores capacidades en el sector industrial. Desempeñan un papel importante en la gestión de diversas cargas, tales como motores y sistemas informáticos, así como en la contribución a la estabilidad de la red eléctrica. Por lo tanto, garantizar una distribución de energía de alta calidad se convierte en un aspecto esencial para una integración eficiente y confiable en la infraestructura eléctrica existente. Las configuraciones y estrategias de gestión en los dispositivos conductores, como los transistores IGBT y MOSFET, han experimentado una significativa evolución, enriquecidas por el empleo de un diverso conjunto de técnicas desde sus inicios en los albores de la década de 1980. Esta transformación ha permitido optimizar su funcionamiento y eficacia, reflejando los avances en la comprensión y aplicación de nuevas metodologías [1].

La capacidad de un inversor para proporcionar una señal de salida de calidad y eficiencia energética para la estabilidad y rendimiento de los sistemas eléctricos a los que sirve, como sistemas de energía renovable, vehículos eléctricos, sistemas de transmisión y distribución de energía, y sistemas de respaldo de energía. Este es un punto de gran enfoque de estudio porque su mejora permite optimizar el funcionamiento y la eficiencia energética de los sistemas eléctricos, contribuyendo a un mejor rendimiento en diversas aplicaciones [2].

Los inversores multinivel (MLI, siglas en inglés de Multi Level Inverter) se clasifican en inversores con diodos enclavados, capacitores flotantes y en cascada puente H, destacándose este último por su modularidad [3], [4]. La evolución en las técnicas de conmutación y control ha permitido minimizar la THD efectivamente, implementando métodos de modulación para una calidad superior de la señal de salida. Estos inversores son apreciados por producir señales de salida de alta calidad y por sus respuestas dinámicas, este conjunto de características los hace valiosos en aplicaciones que demandan un control preciso de la energía eléctrica, compatibilidad con energías renovables, entre otros. Se han implementado distintas estrategias de conmutación para optimizar el desempeño de estos inversores y reducir la distorsión armónica total (THD, siglas en inglés de Total Harmonic Distortion). Entre las estrategias de modulación se han propuesto múltiples técnicas, incluyendo la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM, Sinusoidal Pulse Width Modulation) y la modulación por ancho de pulso basada en vectores espaciales (SVPWM, sigla en inglés de Space Vector Pulse Width Modulation), eliminación selectiva de armónicos (SHE, siglas en inglés de Selective Harmonic Elimination) [5].

La THD puede inducir un desempeño deficiente en los dispositivos de potencia y deformar la señal en la red eléctrica, ocasionando pérdidas de energía y disminuyendo la eficiencia de los sistemas. En los conductores, los armónicos incrementan el flujo de corriente, lo que resulta en el calentamiento de los cables y en pérdidas energéticas por disipación de calor, esto puede aumentar la amplitud de los armónicos, provocando calentamiento y deterioro acelerado de estos componentes [6].

Diversos estudios han propuesto enfoques basados en métodos de optimización y algoritmos para abordar este inconveniente. No obstante, se requiere una investigación para determinar la estrategia más eficaz [7]

Reducir la THD no solo previene el sobrecalentamiento y el desgaste prematuro en motores y componentes electrónicos sino también mejora la eficiencia y la fiabilidad del sistema eléctrico en su conjunto. Para mitigar la presencia de armónicos superiores, es viable implementar filtros en la salida de los inversores. Por otro lado, los armónicos de orden inferior requieren enfoques alternativos de optimización para abordar las ecuaciones trascendentales no lineales originadas por las series de Fourier. Resolver estas ecuaciones constituye un desafío en la búsqueda de ángulos de conmutación óptimos que permitan reducir la THD de manera efectiva [8].

Dentro de la Ingeniería Electrónica, la determinación de ángulos de conmutación óptimos para MLI se ha abordado a través de la optimización de la THD mediante técnicas OMTHD (siglas en inglés de Optimal Minimization of the Total Harmonic Distortion) [9].

En la literatura, diferentes técnicas de modulación han sido reportadas para los MLI en la categoría de baja frecuencia para obtener la forma de onda de voltaje que se obtiene de la denominada forma de onda armónica escalonada optimizada (OHSW siglas en inglés de Optimized Harmonic Stepped Waveform) el cual puede ser dividida en SHE y OMTHD [9], [10].

El método OMTHD se utiliza para disminuir el valor de la THD en la señal de salida de voltaje, garantizando el cumplimiento de las normativas IEEE-519 [11]. Por otro lado, el método SHE se dedica a reducir la presencia de armónicos de orden inferior, como el tercero, quinto, séptimo, noveno, etc., manteniendo la componente fundamental dentro de los parámetros deseados para lograr una significativa reducción de los armónicos impares de bajo orden. Para alcanzar este objetivo, es necesario resolver simultáneamente un conjunto de ecuaciones trascendentales no lineales, transformando el cálculo de los ángulos de conmutación en un problema de optimización, donde la meta es minimizar la THD, siendo los ángulos de conmutación las variables de decisión.

Para atenuar la THD, se han aplicado tradicionalmente métodos convencionales, no obstante, en la última década, la atención se ha desplazado hacia la exploración y adopción de técnicas de optimización metaheurísticas para resolver ecuaciones trascendentales no lineales [12].

Las técnicas como las metaheurísticas representan un conjunto de algoritmos diseñados para inspeccionar el espacio de soluciones de manera efectiva, empleando diversas tácticas, estas

técnicas buscan aproximar la solución óptima, logrando un equilibrio entre la exactitud y tiempo requerido para obtener los resultados [9]. Este enfoque permite una solución pragmática al compensar la precisión por la agilidad en el cálculo. Estos métodos, que trascienden las heurísticas tradicionales, facilitan una exploración del espacio de soluciones, acercándose a la solución óptima con una notable reducción en el tiempo de cálculo, gracias a su fundamentación en procesos estocásticos. Reducir la incertidumbre del proceso estocástico es necesario para obtener el valor óptimo [13].

El término "estocástico" se emplea para describir fenómenos que exhiben aleatoriedad o probabilidad inherente, este concepto se utiliza en una variedad de disciplinas, incluyendo la estadística, la física, la economía, la ingeniería y más. En el ámbito matemático y estadístico, un proceso estocástico consiste en un conjunto de variables aleatorias en constante evolución, cuyo desenlace futuro no puede preverse con absoluta certeza, sino que sigue una distribución de probabilidad específica [12], [13], [14]. En consecuencia, un proceso estocástico se caracteriza por su imprevisibilidad, siendo su comportamiento influenciado por diversos factores aleatorios.

Se debe realizar el diseño y análisis de los procesos de los algoritmos como las metaheurísticas, que deban funcionar de manera confiable bajo condiciones inciertas. En el contexto de las metaheurísticas, estas condiciones inciertas se refieren a la dificultad de configurar adecuadamente los parámetros del algoritmo debido a la naturaleza aleatoria y dinámica del entorno en el que operan. Esta configuración se ha basado en la experiencia, lo que a menudo carece de precisión sistemática. Sin embargo, el método Taguchi ofrece un enfoque más estructurado y sistemático para la configuración de los parámetros, permitiendo que el algoritmo metaheurístico cumpla con los requisitos de rendimiento esperados, incluso cuando enfrenta acontecimientos aleatorios que introducen incertidumbre.

El método Taguchi representa una técnica de diseño experimental que posibilita la reducción del número de experimentos necesarios para optimizar un proceso o sistema, su aplicabilidad en la afinación de parámetros ha demostrado ser efectiva por lo que podrá reducir la incertidumbre, provocado por el proceso estocástico de las metaheurísticas. Las metaheurísticas constituyen técnicas de optimización inspiradas en la naturaleza capaces de resolver problemas de optimización complejos, y han sido aplicadas en distintos campos de la ingeniería [15]. Mitigar la incertidumbre de las metaheurísticas con el método Taguchi, es el objetivo de este trabajo.

1.1 Inversores

La función principal de los inversores es la de transformar una entrada DC en una salida de AC adecuada para diversas aplicaciones industriales y tecnológicas, estos se basan en el uso de interruptores de potencia. Entre estas aplicaciones se encuentran los sistemas de accionamientos de velocidad variable, fuentes de alimentación ininterrumpida, compensadores de reactivos estáticos, filtros activos, sistemas de transmisión de corriente alterna flexibles, y dispositivos de compensación de voltaje. Para generar una salida de AC que sea sinusoidal, se puede optar por ajustar la magnitud, la frecuencia y la fase de la onda

[2]. Dependiendo de la naturaleza de la salida de AC deseada, estos sistemas se clasifican típicamente en dos categorías principales: inversores de fuente de voltaje e inversores de fuente de corriente como se muestra en la Figura 1.

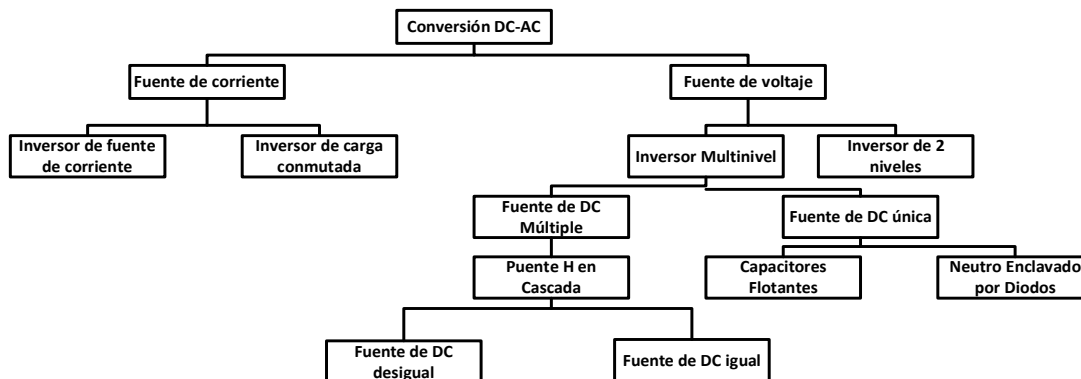


Figura 1 Clasificación de las Topologías de Inversores [16].

Para el análisis del inversor, se identifica el tipo específico de inversor utilizado y requiere el uso de tablas de activación, que detallan el estado de los interruptores en función del ciclo de conmutación, estas tablas proporcionan el control del inversor y la generación de la forma de onda de salida deseada.

1.2 Inversores multinivel

Los inversores multinivel se emplean en una variedad de aplicaciones, desde fuentes de energía renovable hasta grandes instalaciones industriales, su característica es que pueden producir un voltaje de salida que se acerque a una onda sinusoidal, trabajan con fuentes de voltaje DC y sus niveles de voltaje de salida se alternan en una secuencia que puede llegar a reducir la THD.

La primera patente de las topologías multinivel se registró en 1975, siendo una creación de Baker y Bannister que patentaron el diseño de un inversor multinivel en cascada. Por lo que el concepto ya existía, pero fue por los trabajos presentados de Nabae, Takahashi y Akagi en 1980 que es considerado el punto de partida de los MLI actuales [17].

Unos años más tarde la evolución de este diseño dio paso al inversor multinivel Diode-Clamped (DCMLI), también referido como Neutral-Point-Clamped (NPC), en 1980, por el mismo dúo de Baker y Bannister [18]. Con una innovación con el MLI que incorporaba diodos de enclavamiento, esta vez permitiendo el uso de una única fuente de voltaje para el funcionamiento del inversor, esta innovación, que permitía duplicar el nivel de voltaje de salida, se convirtió en la preferida durante los años 80. Aunque la tecnología en cascada se había desarrollado previamente, no fue hasta mediados de los 90 que encontró aplicaciones exitosas que fue impulsada por la creciente necesidad de inversores de media tensión y alta potencia, lo que generó un renovado interés.

La evolución de estos dispositivos continuó, y entre 1997 y 1998 se presentó una nueva variante conocida como el inversor multinivel con capacitores flotantes (FCMLI), obra de Meynard, Foch y Lavielk [19].

Estas tres variantes representan las topologías fundamentales en el ámbito de los MLI. Desde esos desarrollos iniciales, se ha observado un aumento significativo en las patentes relacionadas con MLI adaptados a diversas aplicaciones. En la actualidad, los MLI superan en muchos aspectos a los inversores convencionales de dos niveles, siendo ampliamente utilizados en aplicaciones de alta potencia [20].

Los inversores multinivel se categorizan en tres grupos principales:

- Inversores multinivel con diodos enclavados.
- Inversores multinivel con capacitores flotantes.
- Inversores multinivel cascada de tipo puente H (CHBMLI por sus siglas en inglés de Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter).

En el inversor multinivel con diodos enclavados (DCMLI) ilustrado en la Figura 2, tiene el problema inherente de los diodos que tienen pérdidas de conducción, provocando pérdidas en la conmutación. Por lo que pueden enfrentar limitaciones debido a la cantidad de diodos necesarios para cada nivel de voltaje y las pérdidas asociadas con estos diodos [21].

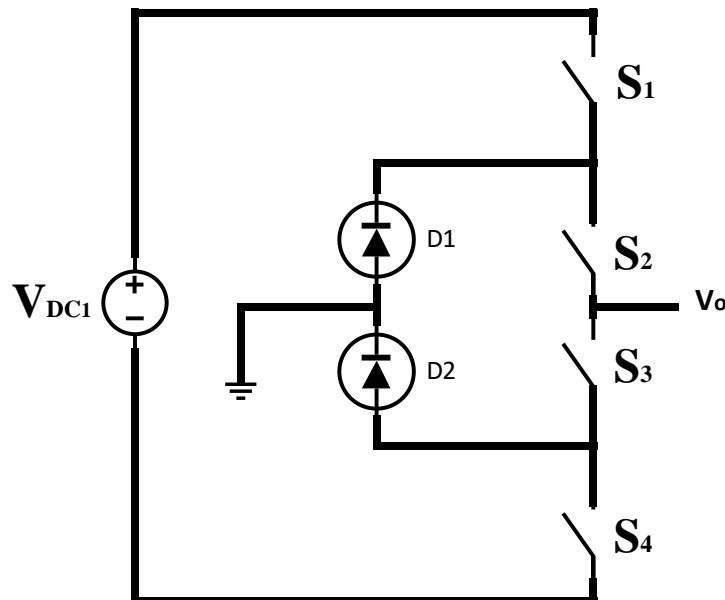


Figura 2 Diagrama de un inversor DCMLI.

En FCMLI ilustrado en la Figura 3, la eficiencia depende significativamente de la capacidad para mantener los capacitores flotantes correctamente cargados. Esto se debe al funcionamiento de este tipo de inversor que se basa en la capacidad de los capacitores para almacenar y liberar energía, permitiendo así la generación de los diferentes niveles de voltaje requeridos para la salida del inversor. Mantener los capacitores cargados implica mantener el balance del voltaje entre los capacitores flotantes, por lo que puede requerir de un control

complejo para regular el proceso de carga y descarga de los capacitores, lo que puede evocar a ajustes continuos de los interruptores; si los capacitores no están adecuadamente cargados puede provocarse un desequilibrio en los niveles de voltaje que pueden generar distorsiones armónicas significativas. También existe el riesgo de que se dañen la vida útil del inversor por estos desbalances. Esto hace necesario anticipar el uso de sistemas de control integrado y dinámico dentro del inversor que se encargue de ajustar activamente el funcionamiento de los interruptores para regular el proceso de carga y descarga de los capacitores flotantes [21].

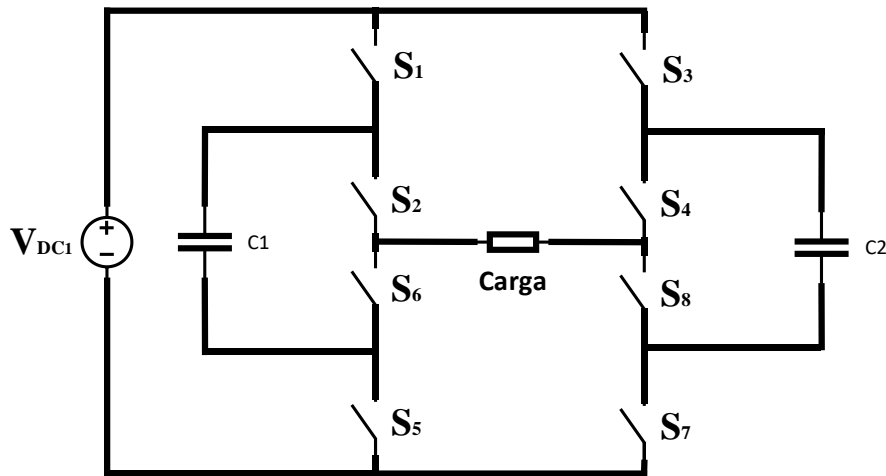


Figura 3 Diagrama de un inversor FCMLI.

En el CHBMLI ilustrado en la Figura 4, están compuestos por módulos de puente H individuales conectados en serie o en cascada esto permite aumentar el número de niveles de voltaje a la salida. Esta modularidad facilita la escalabilidad del sistema, permitiendo ajustar fácilmente el inversor a diferentes requerimientos de potencia y tensiones de salida. Cada módulo de puente H opera de manera relativamente independiente, lo que simplifica la gestión de la energía a través del inversor.

El CHBMLI se ha diseñado con el propósito de generar una señal de tensión de forma sinusoidal a través de la implementación de múltiples escalones de voltaje. Esta configuración requiere de una serie de módulos de puente H ensamblados secuencialmente como se muestra en la Figura 4, el cual sirve para alcanzar un amplio espectro de niveles de voltaje. Su función principal es la de recrear un voltaje específico utilizando diversas fuentes de DC representados en la Figura 4 como V_{DC} , tales como baterías, generadores de hidrógeno o paneles fotovoltaicos [22].

Los CHBMLI, al ser más sencillos en su control en comparación con FCMLI, tienden a ser más eficientes en aplicaciones que requieren múltiples niveles de voltaje y por no depender de diodos como los DCML. Esto hace que los CHBMLI sean la opción más viable para este trabajo, debido a su combinación de modularidad, escalabilidad y la capacidad de generar una salida de alta calidad con menor cantidad de THD. Enfatizando que especialmente su habilidad de generar múltiples niveles es un factor distintivo importante que la diferencia de las otras configuraciones de inversores multinivel [23].

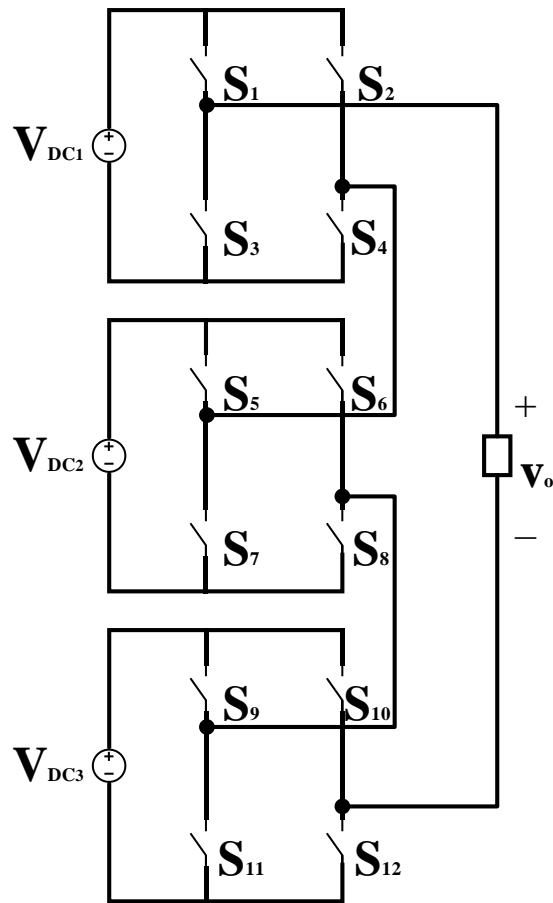


Figura 4 Diagrama de un inversor CHBMLI.

Los inversores multinivel enfrentan desafíos notables, particularmente su capacidad restringida para administrar un número extenso de niveles de salida; esta restricción requiere incorporar una cantidad significativa de componentes semiconductores representados en la figura como S_n , lo cual a su vez, eleva el coste y la complejidad del sistema, además de aumentar sus dimensiones. Cada uno de estos componentes semiconductores necesita de manera indispensable un circuito de control dedicado, así como un mecanismo de protección y un dispositivo para la disipación eficiente del calor, incrementando así la complejidad y el coste total del sistema. Frente a estos obstáculos, se ha observado un impulso en el desarrollo tecnológico y en la investigación dirigido a reducir la cantidad de componentes semiconductores requeridos. Finalmente, del esfuerzo de la aparición de estas topologías han solucionado distintas problemáticas con sus ventajas y desventajas, las cuales se analizan en la Tabla 1, proporcionando una visión comparativa a las configuraciones tradicionales de los inversores multinivel:

Tabla 1 Comparativa de configuraciones de MLI.

Criterio	DCMLI (Diode Clamped)	FCMLI (Flying Capacitors)	CHBMLI (Cascaded H-Bridge)
Complejidad del Diseño	Moderada, debido al uso de diodos enclavados para lograr los diferentes niveles de voltaje [21].	Alta, ya que requiere un control complejo para mantener los voltajes de los capacitores flotantes [24].	Relativamente baja, consiste en la conexión en serie de varios puentes H simples [25].
Eficiencia	Alta, pero puede verse afectada por la pérdida en los diodos [18], [25].	Moderada, depende de la habilidad para mantener cargados los capacitores [24].	Alta, especialmente en configuraciones con múltiples niveles [17].
Costos Asociados	Moderado, por el uso de numerosos diodos [26], [27].	Alta, debido al número elevado de capacidades, lo que implica un mayor volumen y coste [24].	Variable, pero puede ser más económico en términos de componentes activos para un alto número de niveles [21].
Escalabilidad	Limitada por el estrés del voltaje máximo soportado por los diodos [26], [28].	Moderada, por la gestión de los capacitores que puede volverse compleja con muchos niveles debido a la corriente de carga que deben soportar [29].	Alta, fácil de escalar añadiendo más módulos de puentes H [30].
Ventajas	Los voltajes a través de los interruptores son solo la mitad del voltaje de enlace de DC [25], [26].	Capacidad para soportar sobretensiones temporales. Flexibilidad en el control de voltaje ya que se puede gestionar de manera independiente para cada rama [31].	Simplicidad en el diseño y control. Escalabilidad y modularidad. Adecuado para aplicaciones de alta potencia [25], [30].
Desventajas	Número limitado de niveles debido a la complejidad y costos. Las inductancias parásitas y el coste generado por los diodos requeridos. Estrés desigual en los diodos [25], [26].	Necesidad de un control complejo y ajuste preciso. Costo y tamaño de los capacitores. Existe el riesgo de resonancia debido a las capacidades del sistema [24].	Requiere múltiples fuentes de alimentación o transformadores de acoplamiento para niveles altos. Posible desequilibrio en la utilización de los módulos [23], [25], [32].

Las aplicaciones prácticas de un inversor multinivel CHBMLI incluyen sistemas de energía renovable como paneles solares y parques eólicos, transporte eléctrico como trenes y vehículos eléctricos, UPS para centros de datos y hospitales, convertidores de frecuencia para el control de motores industriales, y sistemas de distribución de energía en subestaciones eléctricas [1].

1.3 Efectos de los armónicos en la red eléctrica

Dentro de los criterios de calidad de energía, la Distorsión Armónica Total (THD) emerge como un factor importante. La THD mide la discrepancia entre la forma de onda sinusoidal ideal de voltaje o corriente y la forma de onda real, que incluye todas las distorsiones causadas por los armónicos presentes en la señal. Los armónicos son componentes de la señal con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. La THD es un parámetro que indica cuánta distorsión en señales eléctricas es causada por armónicos en la señal, su evaluación contribuye a mejorar la calidad del suministro energético y a garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos conectados a la red [22].

La ecuación (1) calcula el porcentaje de la THD en cualquier forma de onda escalonada que posea simetría de cuarto de onda:

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

Donde:

a_1 Es la amplitud del componente fundamental.

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

Los armónicos pueden inducir diversos efectos adversos tanto en los equipos como en las instalaciones eléctricas, incluyendo [33]:

- La reducción de la eficiencia global en equipos e instalaciones eléctricas.
- La generación de resonancias no anticipadas que pueden comprometer la estabilidad del sistema.
- Perturbaciones en dispositivos electrónicos que pueden resultar en fallos operativos o errores lógicos en circuitos digitales sensibles.
- La necesidad de sobredimensionar transformadores y cableado, o enfrentar sobrecargas no deseadas en estos componentes.
- Falla en bancos de capacitores y/o transformadores.
- Incremento de las pérdidas energéticas debido al efecto Joule, representado por la fórmula $J = I^2R$.
- Efecto pelicular, el cual es un fenómeno magnético que concentra la corriente en la superficie exterior de los conductores, aumentando con la frecuencia de la corriente alterna. Esto reduce el área efectiva para la conducción, generando mayores pérdidas

resistivas que son proporcionales a la frecuencia. Por ello, los armónicos de alta frecuencia pueden requerir conductores de mayor tamaño para mitigar estas pérdidas adicionales.

- El deterioro en el funcionamiento de motores y generadores, afectando su rendimiento y confiabilidad.
- Activaciones inesperadas de dispositivos de protección como disyuntores o la fusión de fusibles, lo que puede poner en riesgo la integridad de la instalación.

La mitigación efectiva de los armónicos puede ofrecer numerosas ventajas, particularmente para procesos industriales, sistemas de computación, y centros de datos. Entre estos beneficios se encuentran la optimización de los costos totales asociados a la infraestructura eléctrica, la disminución del gasto energético, y una mejora en la protección frente a interrupciones y daños en los equipos. Esta concienciación y acción proactiva respecto a la calidad del suministro eléctrico no solo favorece la sostenibilidad y la eficiencia, sino que también promueve la continuidad y la fiabilidad operativa en entornos industriales y tecnológicos [33].

Cuando se identifica que la forma de onda de la corriente o del voltaje en un punto específico del sistema eléctrico está alterada y no corresponde a la onda sinusoidal que se esperaría en condiciones ideales, se identifica como una onda afectada por componentes armónicos. La THD cuantifica el nivel de estas distorsiones armónicas presentes en la señal. Para que una señal sea clasificada como afectada por armónicos, debe satisfacer ciertos criterios específicos [33]:

- La señal debe poseer valores bien definidos dentro de su intervalo, lo que significa que la energía contenida es finita. Esto evita interpretaciones erróneas causadas por picos de energía infinitos.
- La señal debe ser periódica, repitiéndose exactamente en cada ciclo de corriente o voltaje. La periodicidad asegura que el patrón de distorsión sea constante y no un evento aleatorio o aislado.
- La distorsión armónica debe ser permanente, apareciendo consistentemente en cualquier momento observado. Esto elimina las alteraciones temporales o transitorias causadas por eventos momentáneos o fluctuaciones pasajeras en el sistema eléctrico.

La THD se origina en el teorema de Fourier, el cual establece que, bajo ciertas condiciones matemáticas específicas, es posible descomponer una función periódica en una serie de funciones senoidales. Esta descomposición incluye un componente constante si existe asimetría con respecto al eje horizontal. La primera de estas funciones senoidales, conocida como la señal fundamental, tiene el mismo período y frecuencia que la función original, mientras que las frecuencias de las funciones subsiguientes son múltiplos enteros de la fundamental, a estas se les llama armónicos de la función periódica [33].

La serie de Fourier permite descomponer cualquier función periódica en una suma de funciones sinusoidales (senos y cosenos) con diferentes frecuencias, amplitudes y fases, puede expresarse de la siguiente forma:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_o t) + b_n \sin(n\omega_o t)] \quad (2)$$

Donde $\omega_o = \frac{2\pi}{T}$ se denomina frecuencia angular fundamental en radianes por segundo. El coeficiente a_0 es el componente de CD o el valor promedio de $f(t)$. Las constantes a_n y b_n son coeficientes de Fourier que representan las amplitudes de las componentes cosenoidal y senoide, respectivamente, del n -ésimo armónico.

Los coeficientes de Fourier se calculan como:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_o t) dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_o t) dt \quad (5)$$

La generación de armónicos es principalmente atribuida a lo que se conoce como cargas "no lineales". Por lo tanto, se debe distinguir entre una carga "lineal" y una carga "no lineal" [34].

Una carga se considera lineal si su relación entre tensión y corriente es directa y constante, es decir, cualquier cambio en la tensión resultará en un cambio proporcional en la corriente, manteniendo la forma de onda de la señal (la corriente es proporcional al voltaje aplicado). Esto significa que su impedancia se mantiene inalterada durante todo el ciclo de la corriente alterna. Las cargas lineales se pueden identificar en diversas categorías, como resistivas (ejemplos comunes incluyen calentadores eléctricos y bombillas incandescentes), capacitivas (por ejemplo, condensadores integrados en sistemas o dispositivos), inductivas (como transformadores y motores), o incluso una combinación de éstas [35].

Por otro lado, una carga se considera no lineal cuando presenta una variación en su impedancia en respuesta a la tensión instantánea aplicada, lo cual resulta en un flujo de corriente que no sigue un patrón sinusoidal, incluso cuando la tensión aplicada sí lo es (la corriente no es proporcional al voltaje aplicado, lo que genera distorsión en la forma de onda). Estas cargas no lineales son comunes en dispositivos electrónicos modernos, como fuentes de alimentación conmutadas, variadores de velocidad para motores, y otros equipos que modifican la forma de onda de la corriente eléctrica para su funcionamiento [35].

Al realizar mediciones de las señales eléctricas en busca de armónicos, se emplean analizadores especializados que utilizan la técnica de la Transformada Rápida de Fourier

(FFT, por sus siglas en inglés). Esta metodología matemática desglosa las señales eléctricas en sus componentes de frecuencia, permitiendo calcular una serie de coeficientes armónicos (A_h). Estos coeficientes, cuando se comparan con la amplitud (A_1) de la componente fundamental, conforman el espectro de las señales eléctricas de los armónicos relativo a la señal medida, un ejemplo de espectro de frecuencia de una señal con componentes armónicas se muestra en Figura 5 [21], [33].

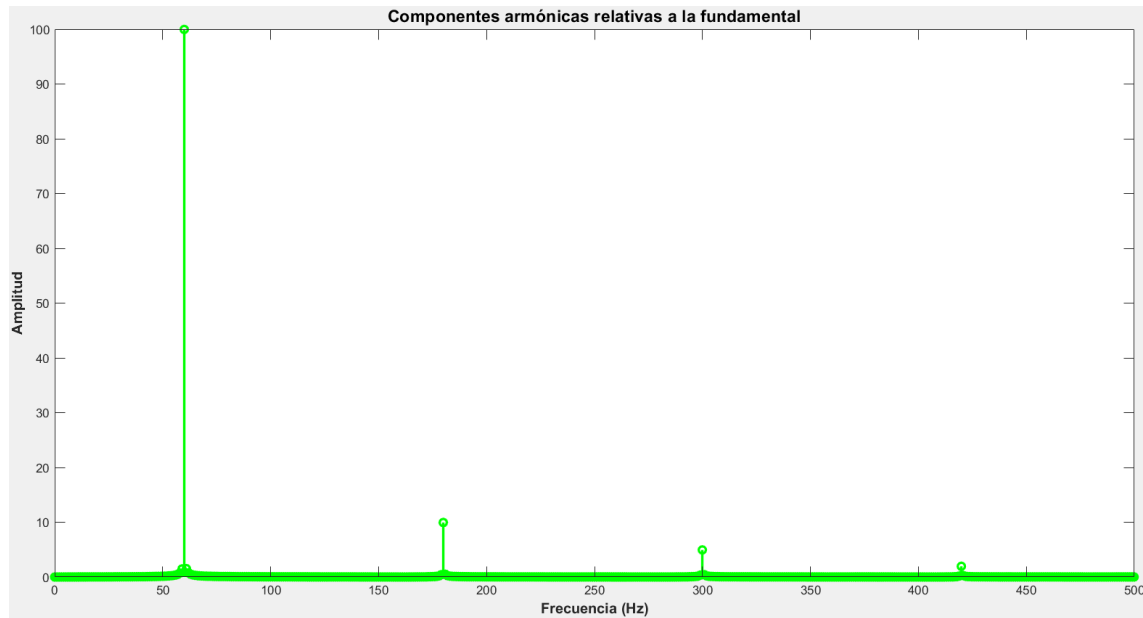


Figura 5. FFT de los componentes armónicos relativos a la componente fundamental de una señal.

Para preservar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico, se implementan restricciones sobre los límites aceptables de distorsión, aplicables tanto a consumidores como a proveedores de energía. La interacción entre consumidores y compañías proveedoras es particularmente sensible. Por un lado, las empresas pueden requerir que los consumidores reduzcan la contaminación armónica en la red de transmisión y distribución, mientras que por otro lado, los consumidores tienen el derecho a exigir una energía de la más alta calidad y con la mínima contaminación armónica posible [11].

En México, la normativa CFE L0000-45 titulada "Perturbaciones admisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro eléctrico", aborda la cuestión de la distorsión armónica permitida. Mientras tanto, en los Estados Unidos, la norma IEEE 519, denominada "Prácticas recomendadas y requisitos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia", establece los límites máximos de distorsión armónica aceptable. El documento define los estándares de calidad energética requeridos en el Punto de Conexión Compartido, representa una estrategia colaborativa entre proveedores de energía y consumidores, enfocada en mitigar la producción de armónicos y sugerir medidas de prevención. La meta para los proveedores de energía es implementar un esquema de tarifas que incluya cargos específicos a los consumidores por la emisión de armónicos en su consumo eléctrico.

Estas regulaciones están concebidas para limitar las corrientes armónicas generadas por cada consumidor, asegurando que los niveles de distorsión de voltaje en el sistema eléctrico global se mantengan dentro de límites aceptables. Esta responsabilidad recae tanto en los proveedores como en los usuarios, subrayando la importancia de un esfuerzo colaborativo para el mantenimiento de un suministro de energía eléctrica estable y de calidad [33].

La normativa IEEE 519 clasifica las fuentes de armónicos en tres grupos distintos:

1. Dispositivos de electrónica de potencia.
2. Generadores de arcos eléctricos.
3. Componentes ferromagnéticos.

Dentro de estas categorías se encuentran varios equipos y procesos, entre los cuales se incluyen:

- Motores de corriente continua operados por tiristores.
- Inversores de frecuencia.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).
- Ordenadores.
- Aparatos electrónicos.
- Hornos de arco eléctrico.
- Hornos de inducción.
- Equipos de soldadura eléctrica.
- Transformadores funcionando en condiciones de sobreexcitación.

Los límites de THD para cada normativa se muestran los valores de THD permitidos para la norma IEEE 519 en la Tabla 2 y para la norma en la Tabla 3 para la norma CFE L0000-45.

Tabla 2 Limite de distorsión de voltaje para la norma IEEE 519.

Bus de voltaje	THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0
$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	2.5
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1.5

Tabla 3 Limite de distorsión de voltaje para la norma CFE L0000-45.

Bus de voltaje	THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	8.0
$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	5.0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 138 \text{ kV}$	2.5
$V > 138 \text{ kV}$	1.5

Una mala gestión de THD en los generadores por ejemplo, puede afectar su rendimiento debido a su alta impedancia, lo que puede causar pérdidas de eficiencia o sobrecalentamiento, esta misma impedancia puede transformar la distorsión armónica de corriente en distorsión

de tensión, afectando otras cargas conectadas a la fuente. Aunque los motores se consideran cargas dentro del sistema eléctrico, los efectos de los armónicos sobre motores y generadores son similares, incluyendo un aumento en las pérdidas del núcleo debido a corrientes de Foucault que son corrientes eléctricas inducidas en conductores por un campo magnético cambiante, lo que causa pérdidas energéticas en forma de calor y la histéresis, que es la demora en la magnetización o desmagnetización de un material ferromagnético en respuesta a un campo magnético cambiante, debido a el magnetismo de un material ferromagnético, como el hierro, no sigue inmediatamente a un campo magnético externo aplicado [35], [36].

Al aumentar el campo magnético, el material se magnetiza, pero cuando el campo se reduce, el material no se desmagnetiza completamente de inmediato. Esto crea un retraso o bucle de histéresis en la interacción entre el campo magnético aplicado y la magnetización del material lo que también resulta en pérdidas energéticas. Y en el cobre, exacerbado por el efecto pelicular que hace que la corriente alterna fluya más por la superficie de un conductor que por su centro, y este efecto se intensifica con el aumento de la frecuencia aunado a la proporcionalidad al cuadrado de la frecuencia lo que se traduce que las pérdidas energéticas debido a este efecto y las corrientes de Foucault crecen exponencialmente con la frecuencia; es decir, si la frecuencia se duplica, las pérdidas aumentan cuatro veces. Este incremento en las pérdidas conduce a un mayor calentamiento y reduce la eficiencia en sistemas eléctricos a altas frecuencias, afectando el funcionamiento de dispositivos como motores causando vibraciones y que pueden experimentar sobrecalentamiento y por tanto necesitar reducir su carga operativa [36], [37].

Para calcular la magnitud de las corrientes de Foucault en un material se debe considerar que no hay una ecuación única y simple para este cálculo, ya que depende de la geometría del conductor, las propiedades del material y el tipo de cambio en el campo magnético. Sin embargo, la densidad de corriente J inducida puede aproximarse para un conductor plano expuesto a un campo magnético que cambia linealmente a lo largo de una dirección utilizando la fórmula:

$$J = \left(\frac{dB}{dt} \right) (\sigma)(d) \quad (6)$$

Donde $\frac{dB}{dt}$ es la tasa de cambio del campo magnético, σ es la conductividad del material, y d es la profundidad del material donde se genera la corriente de Foucault.

En cuanto a los dispositivos electrónicos sensibles, una THD no favorable puede distorsionar las tensiones en los puntos de alimentación, interrumpiendo el funcionamiento de equipos sensibles como los Controladores Lógicos Programables (PLC) y otros dispositivos de control cuyo rendimiento depende de la correcta sincronización de las señales de tensión. La pureza de la fuente de alimentación es crítica para el desempeño óptimo de estos equipos [37], [38].

Como acción correctiva se implementan filtros, reactancias, transformadores, filtros sintonizados o desintonizados, entre otros recursos para mitigar esta distorsión, buscando

acercar la señal eléctrica a su ideal forma sinusoidal. Estas acciones de la atenuación de los componentes armónicos conlleva una serie de ventajas significativas, entre las que destacan un incremento en el factor de potencia, una reducción en el consumo de energía reactiva en las redes eléctricas, la disminución de las pérdidas por efecto Joule, el alargamiento de la vida útil de los equipos electrónicos, una menor incidencia de sobrecalentamientos en el sistema de cableado, reducción de pérdidas en transformadores, y una mejora general en la eficiencia y durabilidad de los motores [33], [35].

La modulación del inversor es importante en la reducción del THD. Tradicionalmente, se han utilizado métodos de modulación como el PWM (Modulación por Ancho de Pulsos) y el PWM de vector espacial para el control de la modulación en inversores multinivel. Sin embargo, estos métodos suelen generar pérdidas adicionales generadas por las altas frecuencias de conmutación, que se traducen en una eficiencia reducida al disipar parte de la energía en forma de calor debido a la rápida conmutación de los transistores. Una técnica para lograr esto es la optimización de los ángulos de conmutación en MLI. Mediante la adecuada selección de estos ángulos, es posible minimizar armónicos no deseados [37].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Obtención de una baja THD en un inversor monofásico multinivel mediante la aplicación del método Taguchi en algoritmos metaheurísticos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar y comprender el método Taguchi para su aplicación en algoritmos metaheurísticos.
- Aplicar el método Taguchi en la reducción de la THD en inversores multinivel.
- Analizar los resultados obtenidos, identificando la combinación más efectiva para la reducción de la THD en inversores multinivel para cada algoritmo metaheurístico utilizado.

1.5 Justificación

La THD en inversores multinivel puede inducir un desempeño deficiente, diversos trabajos han propuesto enfoques basados en métodos de optimización y algoritmos para abordar este inconveniente. No obstante, se requiere una investigación para determinar la estrategia más eficaz [7]. Las metaheurísticas constituyen técnicas de optimización inspiradas en la naturaleza capaces de resolver problemas de optimización complejos, y han sido exitosamente aplicadas en diversos campos de la ingeniería [15], [39]. Por otra parte, el método Taguchi representa una técnica de diseño experimental que posibilita la reducción del número de experimentos necesarios para optimizar un proceso o sistema. Se ha evidenciado su eficacia en la optimización de parámetros en varios trabajos [40], [41], [42].

Esta tesis tiene como objetivo investigar la aplicación conjunta del método Taguchi y metaheurísticas para mitigar la THD en inversores multinivel. Este enfoque posee el potencial de reducir el tiempo asociado a la optimización, asimismo, el análisis de diversas

metaheurísticas permitirá identificar la técnica más eficiente para abordar la problemática de la THD en inversores multinivel. Por lo que se considera de importancia el estudio del algoritmo genético y el algoritmo evolutivo diferencial.

El propósito de este trabajo de tesis es contribuir al conocimiento en cuanto a la aplicación del método Taguchi en combinación con metaheurísticas para reducir la THD en inversores multinivel. Los resultados obtenidos ampliarán la comprensión de las soluciones posibles y mejorarán la calidad de los sistemas, generando un impacto positivo en el entorno.

Capítulo

2. Estado del arte

Una de las maneras para operar el inversor multinivel CHBMLI mostrado anteriormente en la Figura 4 en el subcapítulo 1.2 del Capítulo 1, es mediante el cálculo de ángulos de conmutación que permiten obtener distintos niveles de voltaje a la salida. Los ángulos de conmutación representan los puntos específicos dentro de un ciclo de la señal de salida en los que los transistores u otros dispositivos de conmutación se activan o desactivan, cambiando así los niveles de voltaje a la salida del inversor multinivel CHBMLI. Para lograr los niveles de voltaje a la salida requeridos, se utiliza la técnica de modulación por conmutación de frecuencia fundamental [43] capaz de garantizar la exactitud y coordinación de los pulsos necesarios para la generación de los distintos niveles de voltaje mediante la asignación de ángulos de conmutación del inversor multinivel [44]. Estos niveles de voltaje son definidos de acuerdo con los niveles del inversor multinivel. Aunque los ángulos de conmutación se expresan en grados, es importante entender que estos ángulos corresponden a instantes específicos en el tiempo dentro del ciclo de la señal de salida. La relación entre el ángulo en grados y el tiempo depende de la frecuencia de operación de la señal, que comúnmente por ejemplo un ángulo de 180° en una señal de 50 Hz ocurre a los 10 ms, mientras que en una señal de 60 Hz ocurre a los 8.33 ms. Los ángulos de conmutación se deberían entender entonces como un punto en la circunferencia que avanza respecto al tiempo. Este punto específico en la circunferencia indica el momento exacto en el que un dispositivo de conmutación debe activarse. La correcta definición de estos ángulos sirve para configurar la forma y las características de la onda de voltaje.

2.1 Eliminación selectiva de armónicos (SHE)

Dentro del estudio de la modulación de eliminación selectiva de armónicos (SHE), se reconoce los trabajos pioneros realizados por Patel y Hoft [45], [46]. Estos trabajos sientan las bases teóricas para determinar los ángulos de conmutación, a través del análisis detallado de las señales generadas por inversores tanto de medio puente como de puente completo.

El método se basa en descomponer la señal de salida en su serie de Fourier, permitiendo una representación matemática. Se busca definir los ángulos de conmutación, los cuales se determinan mediante cálculos previos (off-line), basados en los armónicos que se pretenden eliminar de la señal de salida del inversor identificando las frecuencias fundamentales, aprovechando la simetría para simplificar el análisis. La solución de estas ecuaciones proporciona los ángulos de conmutación y se describen de la siguiente manera [47]:

$$V_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{DC}}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k) \right] \sin(n\omega t) \quad (7)$$

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_k) = M \quad (8)$$

$$\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \dots + \cos(5\theta_k) = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ \cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_k) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Donde:

V_o es el voltaje de salida del inversor.

V_{DC} es el voltaje de entrada de DC.

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

s es el número de etapas del inversor.

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

θ_k es el k -ésimo ángulo de disparo.

M es el índice de modulación.

2.2 Minimización Óptima de la THD (OMTHD)

Para la comprensión de la modulación de OMTHD, se reconocen las contribuciones de Sahali y Fella [48], [49], [50] que han sido fundamentales para consolidar el concepto de OMTHD. El trabajo documentado en [10] marca un hecho significativo, donde se logró confirmar la viabilidad de la OMTHD.

El método OMTHD se enfoca en optimizar la calidad de la forma de onda de voltaje de salida del inversor multinivel, con el objetivo de reducir el valor de la THD dentro de los límites aceptables establecidos por normativas internacionales como la IEEE-519 [8]. Sin embargo, no se centra específicamente en la eliminación de armónicos de bajo orden (3,5,7,9, 11... para el sistema monofásico y 5, 7, 11, 13, 17 para el sistema trifásico) que no son deseables para cargas tales como motores eléctricos [9], [48].

Considerando el voltaje de salida que se muestra en la Figura 6 de la forma de onda escalonada donde V_{DC} son distintos valores de voltaje.

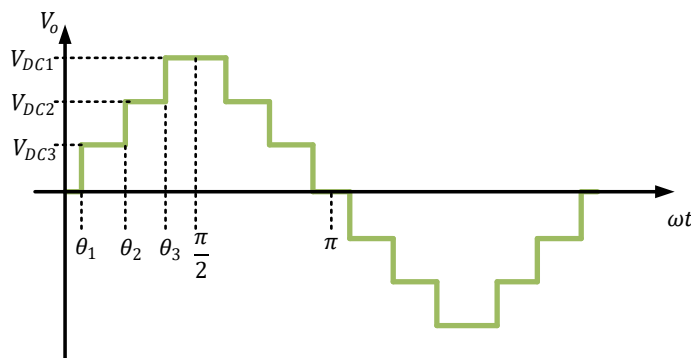


Figura 6. Voltaje de salida de un inversor CHBMLI [51].

Se puede expresar como:

$$V_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{DC}}{n\pi} \left[\sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k) \right] \sin(n\omega t) \quad (11)$$

Donde

V_o es el voltaje de salida.

V_{DC} es el voltaje de entrada de DC.

ωt es la fase de la señal en un instante de tiempo específico.

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

s es el número de etapas del inversor.

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

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

$$\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_s < \pi/2 \quad (12)$$

Basado en lo anterior, se puede expresar la magnitud de las componentes armónicas impares, incluida la componente fundamental dentro de ellas, de la siguiente manera:

$$a_n = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \sum_{k=1}^s \cos(n\theta_k) \quad (13)$$

Haciendo una expresión de la ecuación anterior se obtiene:

$$a_n = \frac{4V_{DC}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s)] \quad (14)$$

Los valores de los ángulos de conmutación $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_s\}$ se seleccionan de manera que puedan asegurar una THD resultante con un valor mínimo.

La ecuación (15) expresa el porcentaje del valor de THD de cualquier forma de onda escalonada, con simetría de cuarto de onda:

$$THD(\%) = \left[\left(\frac{1}{a_1^2} \right) \sum_{n=3}^{\infty} (a_n^2) \right]^{\frac{1}{2}} \times 100\% \quad (15)$$

Donde:

a_1 Es la amplitud del componente fundamental.

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

Dado que la simetría de cuarto de onda simplifica el análisis y los distintos niveles de voltaje se generan antes de este punto, no es necesario considerar otros ángulos de conmutación. Esto se refleja en las restricciones impuestas en (16), que emplea una simetría de cuarto de onda.

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_s < \pi/2 \quad (16)$$

El método OMTD ajusta los armónicos sin la necesidad de conservar o eliminar armónicos específicos, incluida la componente fundamental. Como consecuencia de emplear el método SHE que sirve para controlar el contenido armónico, del cual se logra una reducción en la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia. Esto conduce a disminuciones en las pérdidas por conmutación y en la interferencia electromagnética (EMI), así como es capaz de suprimir el armónico dominante de orden inferior, lo que permite disminuir el tamaño del filtro necesario en la salida del inversor [52].

En [53], el método OMTD se aplicó utilizando el método metaheurístico Optimización por Enjambre de Partículas (PSO, por sus siglas en inglés), una metaheurística que simula el comportamiento de los enjambres para encontrar soluciones óptimas. PSO funciona mediante la colaboración de partículas que representan soluciones, las cuales se mueven en el espacio de búsqueda, guiadas por su experiencia y la de sus vecinas, buscando minimizar la THD. En el estudio, PSO presentó los mejores resultados en la reducción del valor de THD en comparación con GA y Newton Raphson (NR).

En [54], el estudio se basa en un inversor multinivel de siete niveles, utilizando GA para minimizar la THD. Se implementó un prototipo basado en un microcontrolador ATMEGA32 AVR para verificar los resultados obtenidos en la simulación.

2.3 Aplicaciones del algoritmo DE y GA

Con el fin de entender los parámetros de DE, una metaheurística que optimiza problemas mediante la iteración de soluciones potenciales usando vectores que son modificados por operadores de mutación y recombinación, y para gestionar el Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) del estudio de Taguchi, una técnica que reduce el número de experimentos necesarios para optimizar parámetros y mitigar la incertidumbre generada por el proceso estocástico de la metaheurística, se realizó una investigación acerca de los parámetros y las implicaciones del comportamiento de DE en distintos problemas con valores específicos determinados por varios autores, los cuales se presentan a continuación en la Tabla 4.

Donde los parámetros del algoritmo DE se definen de la siguiente manera:

- N_p es el tamaño de la población, es decir, el número de soluciones en cada generación.
- F es el factor de mutación, que controla la diferencia entre dos individuos.

- Cr es la tasa de recombinación, que determina la probabilidad de que un componente de la solución sea recombinado.

En el algoritmo DE, en algunos trabajos, no se especifica el número de generaciones que se implementa en DE, por lo que se investiga acerca de algunas propuestas específicas para este valor y explorar sus propuestas, para determinar sus características de parada previamente expuesto en este trabajo. En la Tabla 5 se presenta los valores encontrados reportados en algunos trabajos.

Tabla 4. Comparación de los valores asignados a los parámetros de DE en distintos trabajos.

Referencia	Parámetros DE		
	Np	F	Cr
[55]	30	0.9	0.9
[37]	20	0.8	1
[56]	30	0.8	0.9
[57]	80	0 - 1	0.95
	50	0.3	0.9
[58]	50	0.9	0.5
[59]	100	0.5	0.9

Sin embargo, en trabajos como [37] y [57] reportan tener un valor óptimo de la función objetivo en pocas generaciones (50 generaciones) los cuales en estos trabajos la función objetivo es idéntica a la de este trabajo. En comparación de estos trabajos a los expuestos en la Tabla 5 que se reportan otros valores para las generaciones.

Tabla 5. Selecciones reportadas para las generaciones de DE.

Referencia	Generaciones
[56]	40
[58]	200
[59]	5,000
[60]	30,000

En [59], por ejemplo, se considera un valor inicial de 5,000 generaciones para DE. Sin embargo, en promedio, para varias funciones objetivo, se establece un rango de 50 a 500 generaciones, con un promedio de éxito en la obtención del óptimo global de 250 generaciones. En el trabajo se estudian varias funciones objetivo, conocidas como “Numerical Benchmark Problems”, propuestas por Agoston Eiben y Thomas Bäck descritas en [61], estas funciones se utilizan para evaluar y comparar el rendimiento de los algoritmos de optimización. Esto para cumplir con el teorema de “No Free Lunch”, la cual se describe en [62], que establece que ninguna metaheurística es superior a otra. En cambio, la eficacia de una metaheurística depende de la función objetivo específica y su dificultad de resolución. Por lo tanto, se debe evaluar el rendimiento de varias metaheurísticas para caracterizar los tipos de problemas para los cuales cada algoritmo es más adecuado.

En [63], estudian el uso de GA para el problema de eliminación de armónicos en inversores multinivel con fuentes de DC no iguales. Ajustan el parámetro de población (que es el conjunto de soluciones candidatas) con valores aleatorios, en el parámetro de selección (que es el proceso de elegir las mejores soluciones para reproducirse) optan por el método “rouleete”, en el parámetro de cruzamiento (que es el proceso de combinar dos soluciones parentales para crear una nueva solución) eligen el método “arithmetic crossover”.

En [64], usan la herramienta de MATLAB de optimización con el algoritmo GA con un inversor de dos niveles. Ajustan el tipo de población como “Double vector” y el tamaño de población con un valor de 120. La función de generación y la función de mutación se ajustan como “Constraint dependent”. Finalmente configuran la función híbrida como “fmincon-Constrained nonlinear minimization”.

En [65], se busca mejorar un inversor de 11 niveles, pero no mencionan como configuran GA. En [66], estudia la optimización de un inversor multinivel de 7 niveles asimétrico, pero no especifican la configuración para GA. En [52], [67] también estudian GA, pero no especifican como ajustan cada parámetro.

Se encontraron algunos artículos que consideraban la misma función objetivo con el algoritmo GA, pero el rango del espectro armónico difería del presente estudio. Por ejemplo, en [68], se considera hasta el armónico 40, mientras que en la referencia [54], se extendía hasta el armónico 100. En [69] se trabaja con una frecuencia en la fundamental de 50Hz distinta a la de este trabajo, la diferencia en la frecuencia fundamental afecta significativamente el análisis del diseño y la optimización de los inversores, ya que los componentes armónicos y la respuesta del sistema varían con la frecuencia, además, usan un inversor de 9 niveles trifásico. Debido a esto, dichos artículos no fueron tomados en cuenta, ya que sería imposible realizar una comparación adecuada con este trabajo.

Otro enfoque para comparar es revisando con métodos clásicos como el método de Newton Raphson (NR). En [52] mencionan la comparativa entre las metaheurísticas PSO y GA en conjunto con el método NR, el estudio describe el problema de SHE que se basa en la resolución de un conjunto de ecuaciones trascendentales. Las técnicas iterativas como NR pueden implementarse fácilmente, aunque requieren una buena estimación inicial de los ángulos de conmutación, lo que influye significativamente en el rendimiento del método. Sin embargo, NR puede no converger en algunos puntos dentro del rango de índice de modulación (M_i) y se complica más a medida que aumenta el número de niveles del inversor, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones que requieren un rango completo de M_i .

Por otro lado, GA y PSO transforman el problema SHE en un problema de optimización, estos métodos no requieren una estimación inicial y son capaces de encontrar soluciones al problema SHE sobre el rango completo de M_i . En el estudio se encontró que GA era el mejor método en términos de perfil armónico y reducción de THD. Sin embargo, en términos de eliminación de los armónicos 5 y 7, PSO fue el peor, mostrando la mayor amplitud para estos armónicos que se necesitan eliminar.

La conclusión del estudio es que algoritmos evolutivos como GA y PSO son muy efectivos para resolver el problema SHE, resultando en una reducción considerable del THD en comparación con técnicas iterativas. En particular, GA se mostró superior, especialmente en valores bajos de M_i .

En [9], se usa el método de OMTD para la mejora de la THD y destacan que, al incrementar el número de niveles, permite obtener valores más bajos de THD, ya que se pueden mejorar los ángulos de conmutación. Se emplea un inversor CHBMLI con fuentes de CD independientes, y se analizaron tres escenarios: de 5, 7 y 9 niveles comparando los resultados entre la OMTD y la Modulación de Ancho de Pulso con Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE-PWM). Se utilizó el software MATLAB para resolver los sistemas de ecuaciones no lineales trascendentales y obtener los ángulos óptimos mediante los métodos NR, GA y PSO. Además, realizaron simulaciones de cada caso en el software Psim para comparar los valores de THD obtenidos en un entorno de simulación de circuitos, validando así los resultados teóricos y optimizados previamente calculados en MATLAB.

Utilizando la técnica OMTD, se observaron los resultados más favorables en la disminución del THD al aplicar el algoritmo PSO. En contraparte, el enfoque tradicional de optimización NR mostró niveles de THD superiores en todas las instancias. Al evaluar los datos obtenidos mediante el método SHE, se evidenció una mejora significativa en la reducción del THD en la mayoría de los casos analizados al emplear el algoritmo PSO.

En [65], se obtiene una THD de 4.39% con GA mientras que con DE se obtiene una THD de 5.23% pero los resultados se basan en un inversor de 11 niveles y a 120V con frecuencia de 50Hz en la salida en un sistema trifásico.

En [66], se obtiene una THD de 10.88% usando GA y una THD de 8.07% usando DE mientras usan un inversor de 7 niveles en un sistema trifásico.

En [63], se describen resultados con GA y DE obteniendo una THD de 2.4137% y de 2.4035% respectivamente, usando un inversor de 11 niveles.

En [70], se obtiene una THD de 7.7% usando DE en un inversor de 11 niveles.

En [71], se realiza una comparación entre los métodos metaheurísticos, como GA y PSO, para resolver problemas de flujo de potencia óptimo (OPF). Aunque el estudio se centra en estos dos métodos, también se menciona y se hace una breve comparación con técnicas matemáticas clásicas, como el método de NR. Las técnicas matemáticas, conocidas también como métodos deterministas, aprovechan las propiedades analíticas del problema para generar una secuencia de puntos que converge hacia una solución óptima global. Entre las técnicas más utilizadas en la literatura del OPF se encuentran el método de gradiente, el método de Newton, la Programación Lineal (LP), la Programación Lineal Secuencial (SLP), la Programación Cuadrática Sucesiva (SQP) y el Método de Puntos Interiores (IPM). Aunque estos métodos son reconocidos por su eficiencia, precisión y robustez, presentan algunas limitaciones significativas. En primer lugar, no pueden garantizar la optimalidad global en problemas no convexos, como es el caso del OPF. Además, tienen dificultades para manejar

variables discretas y no son adecuados para problemas de optimización multiobjetivo, ya que no pueden gestionar fácilmente frentes de Pareto discontinuos o no convexos. Los métodos deterministas, incluido el método de NR, son conocidos por su rápida convergencia en muchos casos, pero su rendimiento puede disminuir considerablemente al enfrentarse a problemas no convexos y multimodales, donde suelen quedar atrapados en óptimos locales, lo que limita su capacidad para encontrar la solución global óptima. Los métodos deterministas, que buscan soluciones siguiendo un gradiente o una secuencia lógica, pueden quedar atrapados en uno de esos óptimos locales en lugar de encontrar el óptimo global, lo que ocurre tanto en problemas multimodales. Para la función OPF, se menciona que estos problemas son no convexos y multimodales, lo que refuerza las limitaciones de los métodos clásicos en estas situaciones. Para superar estas limitaciones, se han aplicado técnicas metaheurísticas al problema del OPF. Inspiradas en procesos naturales observados en la física, biología o sociología, las metaheurísticas como GA y PSO son capaces de escapar de los óptimos locales y converger hacia el óptimo global, además de manejar variables discretas y frentes de Pareto discontinuos o no convexos. No obstante, estas técnicas también presentan desventajas. Son más demandantes computacionalmente debido al gran número de iteraciones necesarias para alcanzar una solución aceptable, y requieren un ajuste cuidadoso de los hiper parámetros para asegurar un buen rendimiento en aplicaciones específicas.

En [72], desarrolla un algoritmo metaheurístico llamado Optimización Basada en Newton-Raphson (NRBO). Inspirado en el enfoque de NR, el NRBO en conjunto con el Operador de Evitación de Trampas (TAO) para evitar caer en óptimos locales. El rendimiento del NRBO fue evaluado utilizando 64 funciones de referencia numéricas y problemas de optimización del mundo real, comparándolo con siete algoritmos. Los resultados mostraron que el NRBO tiene un balance efectivo entre exploración y explotación, alta tasa de convergencia y capacidad para evitar óptimos locales, lo que se propone como una mejora al método NR para evitar caer en óptimos locales.

En [73], compara métodos de optimización matemática, como la programación lineal mixta y la programación cónica de segundo orden, con técnicas metaheurísticas, en el contexto de la reconfiguración de sistemas de distribución de energía. Se concluye que los métodos matemáticos son efectivos para encontrar soluciones, pero en sistemas de tamaño pequeño y mediano (óptimos locales), pero requieren un mayor esfuerzo computacional en comparación con las metaheurísticas cuando se trata especialmente de la exploración en sistemas de gran tamaño. Por otro lado, las metaheurísticas, aunque tampoco garantizan la optimalidad, son más eficientes computacionalmente y manejan mejor los problemas de gran escala de exploración. Por ejemplo, el estudio destaca que la efectividad depende del tamaño del sistema. Para sistemas pequeños y medianos, los métodos matemáticos, como la programación lineal mixta (MILP), son mejores en términos de calidad de la solución, pero las metaheurísticas son más eficientes en términos de esfuerzo computacional, especialmente en sistemas grandes. El artículo menciona que, en algunos casos, como en la implementación de los métodos como NR pueden ser más costosos computacionalmente y no siempre garantizan la convergencia a soluciones factibles, especialmente en sistemas de mayor tamaño.

En [74], se describe el desafío de estimar con precisión los parámetros desconocidos de los modelos fotovoltaicos (PV) a partir de datos medidos de corriente y voltaje, debido a su alta no linealidad y multimodalidad. Existen tres modelos PV: de un diodo, de dos diodos y de tres diodos, con cinco, siete y nueve parámetros desconocidos, respectivamente. Aunque se han utilizado varios algoritmos deterministas y metaheurísticos para resolver este problema, los métodos deterministas, como el de NR, pueden ser efectivos para resolver ecuaciones específicas de la curva I-V, pero no logran soluciones precisas cuando se enfrentan a la alta no linealidad y multimodalidad del problema completo. Por otro lado, los metaheurísticos son más adecuados para explorar espacios de búsqueda complejos y no convexos, aunque requieren mejoras para evitar caer en óptimos locales y acelerar la convergencia. El artículo evalúa 19 algoritmos metaheurísticos recientes y concluye que, si bien muchos tienen un rendimiento deficiente en este problema, las metaheurísticas Spider Wasp Optimizer (SWO) y Mantis Search Algorithm (MSA) se destacaron por su eficiencia y efectividad en la mayoría de los modelos y módulos PV estudiados. En el artículo señalan que el método de NR es altamente eficiente para resolver las ecuaciones de la curva I-V en estos modelos, especialmente cuando se utiliza en combinación con algoritmos metaheurísticos.

En el artículo, se concluye que, aunque el método de NR es más eficiente y preciso para resolver ecuaciones específicas como las de la curva I-V en modelos fotovoltaicos, las metaheurísticas fueron más destacables para abordar el problema general de la optimización de parámetros en estos modelos debido a su capacidad para explorar espacios de búsqueda complejos y no lineales. Por lo tanto, en la práctica, a menudo se usa una combinación de ambos enfoques, donde NR se emplea para refinar soluciones encontradas por metaheurísticas, mejorando así tanto la precisión como la eficiencia en la solución del problema.

En [75], aborda la mejora de la disipación de calor en laptops utilizando el método Taguchi para optimizar los parámetros de los ventiladores a través de ajustes en el firmware, sin necesidad de modificaciones de hardware. El estudio se enfoca en resolver problemas de sobrecalentamiento de la CPU, lo que puede causar una disminución en el rendimiento del procesador. A través del análisis experimental, se identificaron tres factores de control clave: la velocidad del ventilador, el consumo de energía del sistema, y el tiempo de retardo (debounce time). Los resultados mostraron que la optimización de estos factores llevó a una mejora del 5% en el rendimiento de la CPU, a pesar de un pequeño aumento del 0.35% en el consumo de energía. La investigación destaca que la velocidad del ventilador tiene el mayor impacto en la disipación de calor, seguida por el tiempo de retardo y el consumo de energía del sistema, y concluye que esta metodología es una solución factible y rentable para mejorar la disipación térmica en laptops.

En [76], implementa el método de optimización Taguchi para optimizar los parámetros de diseño del filtro activo en derivación (SAPF) integrado con energía fotovoltaica. Se estudia el impacto de estos parámetros en el rendimiento del SAPF y se destaca la superioridad del método Taguchi sobre el algoritmo de PSO. El SAPF es un dispositivo para mejorar la calidad de energía mediante la compensación de armónicos. En el estudio, se utiliza la técnica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) basada en conductancia incremental para

extraer la máxima energía del panel solar. Los parámetros de diseño del SAPF, como las ganancias del controlador PI, la impedancia de acoplamiento y el capacitor del enlace DC, se optimizan utilizando tanto el método Taguchi como el PSO, y los resultados se analizan y verifican con simulaciones en Matlab/Simulink y un experimento de laboratorio.

En [77], propone un nuevo algoritmo de optimización global basado en el método Taguchi para analizar los parámetros de rendimiento de un generador de inducción auto excitado (SEIG) impulsado por viento de velocidad variable. El enfoque se centra en resolver las ecuaciones no lineales derivadas del circuito equivalente por fase del generador de inducción, utilizando el método Taguchi para encontrar los valores óptimos de la frecuencia y la reactancia de magnetización, para el rendimiento del SEIG. Se comparan los resultados con métodos de optimización recientes, mostrando que el método Taguchi ofrece una mayor precisión y es más fácil de implementar. Además, se validan experimentalmente algunos resultados obtenidos, confirmando los beneficios del método propuesto en términos de precisión, tiempo de convergencia y simplicidad de implementación. El artículo compara el algoritmo de optimización basado en el método Taguchi con otros métodos, como el método directo, la función `fsolve` de MATLAB y el algoritmo de búsqueda del cuco (Cuckoo Search Algorithm). El estudio concluye que el método Taguchi ofrece una mayor precisión, requiere menos tiempo de convergencia y es más fácil de implementar, con menos necesidad de ajuste de parámetros en comparación con los otros métodos evaluados.

En [78], explora la optimización de patrones de engranajes magnéticos (MG) utilizando una combinación del método Taguchi y GA. Se enfoca en mejorar la densidad de torque en engranajes magnéticos radiales montados en superficies concéntricas (RMCSM-MG), que son utilizados debido a su alta densidad de torque y baja pérdida por fricción. El estudio propone un diseño de patrón general que cubre la mayoría de los tipos comunes de MG, permitiendo una optimización eficiente en lugar de optimizar individualmente cada tipo. El método Taguchi se emplea para realizar un análisis de sensibilidad, ajustando los rangos de valores de los parámetros antes de aplicar el algoritmo genético, lo que ayuda a evitar la convergencia prematura y mejora la eficiencia del proceso de optimización. Los resultados muestran un aumento significativo en la densidad de torque tras la optimización, logrando un incremento del 38% en el torque promedio por unidad de volumen de material magnético permanente (PM) y un 47% en el torque promedio general, lo que demuestra la efectividad del enfoque combinado de Taguchi y GA.

2.4 Conclusión del Estado del Arte

El método NR es rápido y eficiente para problemas que son convexos y cuando se tiene una buena estimación inicial. Es altamente preciso para resolver sistemas de ecuaciones específicas, como en ciertos problemas de optimización simples.

NR tiene dificultades en problemas no convexos y multimodales, donde puede quedarse atrapado en óptimos locales. Además, su éxito depende en gran medida de la elección de los puntos iniciales, y puede no converger si esos puntos no están bien elegidos. NR no garantiza

encontrar el óptimo global debido a su tendencia a converger hacia un óptimo local y su dependencia de las condiciones iniciales.

GA es robusto y puede explorar un amplio espacio de soluciones, lo que le permite encontrar soluciones cercanas al óptimo global, incluso en problemas complejos y multimodales. No requiere una estimación inicial precisa y es menos propenso a quedarse atrapado en óptimos locales.

Es más lento que NR y puede requerir un gran número de iteraciones para converger a una solución aceptable. Aunque GA puede encontrar soluciones cercanas al óptimo global, no hay garantía absoluta de que haya encontrado el mejor resultado posible. DE es similar a GA en términos de robustez y capacidad para explorar el espacio de soluciones. A menudo se considera más eficiente que GA en ciertos problemas, con una convergencia más rápida en algunos casos, y puede manejar problemas multimodales de manera efectiva. Al igual que GA, DE su rendimiento puede variar dependiendo de la configuración de los parámetros y del problema específico que se esté resolviendo.

Ninguna de las técnicas mencionadas (NR, GA, DE) garantiza de manera absoluta encontrar el óptimo global como en problemas de naturaleza no convexa y multimodal. NR puede ser útil para refinamientos locales, pero es inadecuado para explorar el espacio completo de soluciones en problemas no convexos y multimodales. Por otro lado, tanto GA como DE son más adecuados para problemas complejos y multimodales.

El método de Taguchi ha demostrado ser eficaz para optimizar parámetros en una amplia variedad de aplicaciones técnicas, especialmente cuando se busca mejorar el rendimiento sin necesidad de realizar cambios complejos o costosos en el hardware o en el diseño físico. En cada caso, el método Taguchi se destaca por su capacidad para identificar los factores de control más influyentes y ajustar sus valores de manera que se mejore el rendimiento del sistema. Además, el método es comparativamente más sencillo de implementar, ofrece una mayor precisión que otros métodos de optimización, como los algoritmos metaheurísticos o los enfoques deterministas tradicionales. Además, combinar el método Taguchi con algoritmos metaheurísticos puede potenciar aún más los resultados. Esta combinación permite aprovechar la capacidad exploratoria de las metaheurísticas para buscar en amplios espacios de soluciones y, simultáneamente, utilizar el método Taguchi para afinar los parámetros de las metaheurísticas, mejorando así la efectividad del proceso de optimización. Tal enfoque híbrido no solo optimiza el rendimiento del sistema, sino que también mitiga las limitaciones de cada método individual, ofreciendo una solución robusta y de alto rendimiento para problemas de optimización complejos.

Capítulo

3. Marco teórico

Este capítulo proporciona una revisión teórica de los principales elementos involucrados en el estudio y mejora de los inversores multinivel, así como de las metodologías de optimización utilizadas para mejorar su rendimiento.

Se introduce el concepto de estocasticidad en los sistemas de optimización, explicando cómo la incertidumbre y la variabilidad pueden influir en el rendimiento de los procesos. A continuación, se presenta un análisis de las metaheurísticas, técnicas de optimización que imitan procesos naturales y son capaces de resolver problemas complejos mediante la exploración del espacio de soluciones. Se destacan dos metaheurísticas GA y DE, estos algoritmos son ampliamente utilizados para la optimización de sistemas debido a su capacidad para encontrar soluciones óptimas. Finalmente, el método Taguchi, una técnica de diseño experimental que permite reducir la cantidad de experimentos necesarios para optimizar un proceso o sistema, mejorando la robustez y reduciendo la variabilidad. La integración del método Taguchi con metaheurísticas como GA y DE proporciona un enfoque para mitigar la incertidumbre y mejorar la calidad de los resultados.

3.1 Estocástico.

El concepto estocástico, se puede encontrar en las primeras descripciones de las metaheurísticas, es la forma en como los algoritmos incorporan elementos aleatorios o probabilísticos en su proceso de búsqueda y optimización. Por lo que no siguen un camino determinista fijo, sino que utilizan la aleatoriedad para explorar el espacio de soluciones, lo que les permite evitar quedar atrapados en óptimos locales y tener una mayor probabilidad de encontrar soluciones globales óptimas o cercanas al óptimo en problemas complejos [79].

El concepto de estocasticidad es fundamental en la optimización, especialmente en el ámbito de las metaheurísticas, que son métodos aproximados utilizados para encontrar soluciones satisfactorias a problemas complejos y difíciles de resolver mediante técnicas exactas. Las metaheurísticas se clasifican generalmente en dos categorías principales: basadas en trayectorias y basadas en población, cada una incorporando elementos estocásticos en distintos grados para mejorar la exploración del espacio de soluciones [53].

Las metaheurísticas basadas en trayectorias operan mediante la evolución de una única solución inicial, modificándola iterativamente para explorar el espacio de búsqueda. Aunque algunos métodos como la búsqueda local pueden ser inicialmente deterministas, se integran componentes estocásticos para seleccionar movimientos o decisiones, permitiendo así escapar de óptimos locales y explorar áreas nuevas del espacio de soluciones. Ejemplos destacados incluyen el recocido simulado (“simulated annealing” o SA en sus siglas en inglés), que acepta soluciones subóptimas con una probabilidad que disminuye con el tiempo, y la búsqueda tabú, que puede introducir aleatoriedad en la selección de soluciones candidatas [80].

Por otro lado, las metaheurísticas basadas en población operan con múltiples soluciones simultáneamente, lo que naturalmente introduce una mayor estocasticidad. Estos métodos utilizan operadores estocásticos como la selección aleatoria, el cruzamiento y la mutación para generar y modificar soluciones dentro de la población. Los algoritmos genéticos y la

optimización por enjambre de partículas son ejemplos comunes de este enfoque, donde la diversidad genética y la variedad de respuestas a condiciones simuladas ayudan a evitar convergencias prematuras y fomentan una búsqueda exhaustiva [47], [52].

En conjunto, la estocasticidad en las metaheurísticas es primordial para balancear la exploración (búsqueda global) y la explotación (búsqueda local), dos elementos necesarios para el éxito en la resolución de problemas de optimización [81]. Mientras que la exploración se refiere a la capacidad de investigar ampliamente el espacio de soluciones, la explotación implica el uso de la información recopilada para refinar las soluciones hacia óptimos locales o globales. La introducción de componentes estocásticos permite a estas técnicas navegar por el espacio de búsqueda, adaptándose a la complejidad y variabilidad de los problemas sin quedar atrapadas en soluciones subóptimas. Las funciones unimodales, que presentan una única solución mínima, se emplean para evaluar la capacidad de un algoritmo para explorar el espacio de búsqueda y lograr la convergencia. En contraste, las funciones multimodales, caracterizadas por múltiples soluciones óptimas, se utilizan para analizar la habilidad de los algoritmos en evitar óptimos locales y encontrar una de las mejores soluciones globales [82].

Así, aunque varía el grado y la naturaleza de la estocasticidad según el tipo y diseño específico de la metaheurística, en esencia, estas técnicas son estocásticas en menor o mayor medida. Este carácter les permite ser herramientas versátiles y efectivas en el campo de la optimización, capaces de enfrentar desafíos que los métodos convencionales no pueden resolver de manera eficiente [12], [14], [79], [83], [84].

La función de THD tiene varias propiedades matemáticas y características específicas que son importantes tanto para la optimización como para la comprensión de su comportamiento estocástico, dado que presentan múltiples óptimos locales, se clasifica como una función multimodal, lo que también indica que no es convexa [85], [86], [87].

3.2 Algoritmos metaheurísticos

Se inspiran en la naturaleza, especialmente en la selección natural y adaptación social, imitando disciplinas como la etología, biología o física, y han sido descritas por varios autores [88]. Se caracterizan por ser abstractos y aplicables a diversos problemas, variando desde búsquedas locales simples hasta aprendizajes complejos. A diferencia de los algoritmos clásicos convencionales, que se diseñan para resolver problemas específicos, los algoritmos metaheurísticos son más generales, esta característica les permite abordar una variedad de desafíos en diferentes ámbitos [89]. Se utilizan para encontrar una solución óptima aproximada para problemas de optimización difíciles, para los cuales no existe un método determinístico que los resuelva en un tiempo razonable, ofreciendo soluciones cercanas al óptimo [12]. Utilizan heurísticas específicas del dominio, guiadas por estrategias superiores para explorar eficientemente el espacio de búsqueda, pueden evitar quedarse atrapados en puntos específicos del espacio de búsqueda y aprovechar experiencias previas para mejorar la búsqueda actual. Sin embargo, elegir el más adecuado para un problema específico puede ser un desafío y requiere un conocimiento profundo del problema. Además, su rendimiento puede verse afectado por la elección de los parámetros y la configuración de este, lo que

requiere una selección y configuración adecuada [44], [53]. En general, las características principales de las metaheurísticas se pueden resumir como [13]:

- No están diseñados para un problema en particular.
- Suelen ser métodos aproximados.
- Exploran el espacio de búsqueda para encontrar una solución "suficientemente buena".
- Pueden describirse esencialmente por su nivel de abstracción.
- Generalmente permiten una implementación paralela fácil.
- Abarcan desde la búsqueda local básica hasta técnicas avanzadas de aprendizaje.
- Pueden incorporar varios mecanismos para evitar la convergencia prematura.
- Las metaheurísticas utilizan una memoria de orientación que preserva la experiencia de búsqueda.
- Las heurísticas pueden ser empleadas por una metaheurística como conocimiento específico del dominio que es dominado por la estrategia de nivel superior.

En la Figura 7 se muestra un panorama de cómo se clasifican los diferentes métodos metaheurísticos.

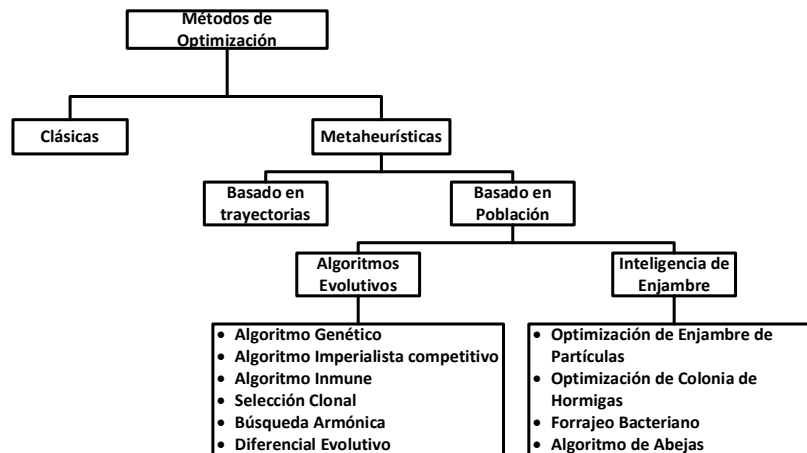


Figura 7. Clasificación de métodos de optimización metaheurísticos [53].

3.2.1 Algoritmos evolutivos.

Los algoritmos evolutivos (EA, por sus siglas en inglés) son estocásticos, esto implica que se pueden utilizar en estadísticas, matemáticas y otros campos para describir un proceso o fenómeno que tiene un elemento de aleatoriedad o incertidumbre. Por lo que contendrán procesos estocásticos que no sigue un patrón determinista fijo, sino que están influenciados por factores aleatorios y que por lo mismo son probabilísticos [84], [90]. El principio en el que se fundamentan los algoritmos evolutivos es que son una analogía a la teoría de la evolución de Charles Darwin, el cual es expuesta en [91].

Según el autor D. Goldberg en su libro "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning" (1989), define un algoritmo genético como una estrategia de búsqueda que se basa en los principios de la selección natural y la genética. Este enfoque combina la

supervivencia de los individuos más aptos con la manipulación de estructuras de datos mediante un intercambio controlado pero aleatorio de información. De esta manera, se logra crear un algoritmo de búsqueda que incorpora una dosis de intuición humana en cada generación, generando un nuevo conjunto de entidades artificiales mediante la combinación de fragmentos óptimos y la introducción ocasional de nuevas características para mantener un equilibrio adecuado. Aunque estos procesos incluyen elementos de azar, los algoritmos genéticos no son solo simples ejecuciones aleatorias; en realidad, aprovechan la información histórica para orientar su búsqueda hacia puntos que se espera que mejoren el rendimiento [92]. Mientras que “algoritmos genéticos” se centra específicamente en esta técnica, “algoritmos evolutivos” es un término más amplio que engloba diversas técnicas de optimización evolutiva para algunos autores [93].

Sin embargo, al poner en práctica los EA, los usuarios se enfrentan a la necesidad de no solo determinar los esquemas de codificación apropiados y los operadores evolutivos, sino también seleccionar las configuraciones de parámetros adecuadas para garantizar el éxito del algoritmo. Esto puede resultar en costos computacionales significativos, ya que el proceso de ajuste de parámetros y operadores es largo y requiere ensayo y error. Para abordar este desafío, los investigadores han estado investigando activamente la adaptación de parámetros y operadores en los EA en general [55], [94], [95], [96]. En ese sentido para reconocer como adaptar y decidir como proponer los valores para cada parámetro de los EA, por lo que es necesario entender cómo se representan sus soluciones y entender sus operadores, los cuales se describen en los capítulos para GA y DE.

3.2.2 Algoritmos basados en comportamiento de enjambre.

La optimización PSO es un método inspirado en el comportamiento social y el vuelo sincronizado de las aves. Este algoritmo ha demostrado ser efectivo para resolver problemas de optimización de funciones matemáticas no lineales continuas. El proceso de PSO comienza con un grupo de soluciones generadas de forma aleatoria, a las cuales se les asigna velocidades iniciales también aleatorias. Estas soluciones, denominadas partículas, se mueven dentro del espacio de búsqueda con el objetivo de encontrar la solución óptima. La actualización de la velocidad de cada partícula se realiza en cada iteración, guiándolas hacia las mejores posiciones encontradas tanto individualmente como por el enjambre en su conjunto. Este método se basa en la evaluación de las partículas mediante una función de aptitud (fitness), identificando así las soluciones óptimas locales y la óptima global. La efectividad de PSO depende significativamente de cómo se ajusten y se manejen estas velocidades y la función de aptitud durante el proceso de búsqueda [97].

3.2.3 Algoritmos Genéticos (GA).

Estos algoritmos son usados para encontrar soluciones siguiendo el modelo del proceso de evolución y selección natural, donde cambios heredables en las poblaciones se dan a lo largo del tiempo, ciertas características son favorecidas por el ambiente, influyendo en la supervivencia y reproducción de los individuos. En resumen, sus etapas comienzan por proponer las posibles soluciones (Inicialización) donde se crean poblaciones de soluciones potenciales, representadas como cromosomas compuestos de genes que codifican las

características de cada solución, luego el proceso evolutivo inicia con una población inicial, mediante una función, se aplica a cada cromosoma (Evaluación o fitness), y mediante la selección de los más aptos (Selección) y el uso de operadores genéticos como la selección, recombinación y mutación (Cruce), se generan nuevas soluciones (Resultados) [53] como se muestra en la Figura 8.

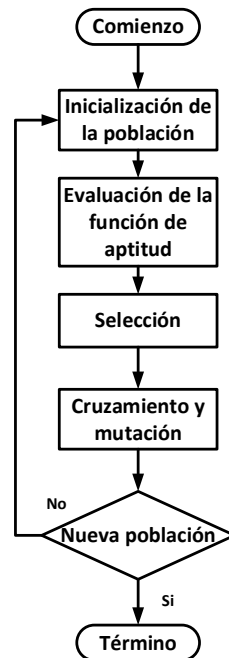


Figura 8 Diagrama de flujo del Algoritmo Genético.

Las representaciones para GA constan de varios métodos y se explican a detalle a continuación:

Representación de las Soluciones:

GA representa soluciones utilizando estructuras de datos llamadas cromosomas, que típicamente son cadenas de bits, aunque también pueden ser listas de números o caracteres dependiendo del problema específico. Estos cromosomas, que encierran la información genética de las soluciones potenciales a un problema, se manipulan y evalúan a lo largo del proceso evolutivo. La forma en cómo se manipulan los cromosomas inicia con una propuesta de población de un número de individuos aleatorio. Cada individuo generado representa un cromosoma. Después es evaluar la función objetivo o "fitness" para cada individuo en la población actual de esta generación. Cuando termina el proceso de evaluación se crea una nueva población que pasara por el mecanismo de selección [98].

Mecanismos de Selección:

El mecanismo de selección sirve para determinar qué individuos pasan sus genes a la siguiente generación. Comúnmente se utilizan varias técnicas donde los individuos son seleccionados con una probabilidad proporcional a su aptitud. Estos métodos aseguran que

las soluciones más aptas tengan mayor influencia en la población futura. Algunas de estas técnicas pueden ser [99]:

- Selección por Torneo: Esta es posiblemente la técnica de selección más común en GA debido a su facilidad de implementación. Consiste en seleccionar individuos de manera aleatoria y hacerlos competir para determinar cuál tiene el mayor valor de aptitud, que será usado para generar la nueva población. Esta técnica promueve la diversidad al dar a todos los individuos la misma oportunidad de ser elegidos, aunque puede reducir la velocidad de convergencia.
- Selección por Ruleta Proporcional: También conocida como proporcional al fitness. Los valores de aptitud son utilizados para elegir a los padres, donde el mejor cromosoma tiene mayores probabilidades de ser seleccionado.
- Selección por Rango: La selección de padres se realiza usando un rango, donde el valor de aptitud es usado para clasificar a los individuos en la población, con el mejor en el rango más alto y el peor en el más bajo. Cada cromosoma tiene un rango dependiendo de su valor esperado.

Operadores de Cruzamiento y Mutación:

El proceso de selección en GA determina qué padres se utilizarán para el cruzamiento, con el objetivo de generar nueva descendencia. Durante este proceso, se establece un valor de probabilidad que determina la posibilidad de que un individuo sea elegido y el número de veces que puede ocurrir en una generación. Esta probabilidad asegura que los individuos tengan más oportunidades de transmitir sus genes a la siguiente generación, aunque también permite cierta variabilidad al dar oportunidades a individuos con menor aptitud. El cruzamiento se lleva a cabo seleccionando un punto aleatorio en el cromosoma, donde se intercambian partes específicas de los cromosomas de los padres, resultando en nueva descendencia basada en el punto de intercambio seleccionado. Este proceso se complementa con la mutación, que introduce variabilidad al modificar aleatoriamente uno o más genes de los cromosomas de los individuos en la población y la probabilidad de la mutación determina cuantos cromosomas deberían ser mutados [98]. Por ejemplo, en una codificación binaria, la mutación puede cambiar un bit de 0 a 1 o viceversa.

La utilización del operador de cruzamiento puede llevar a que el algoritmo genético se estanque en óptimos locales. Por esta razón, la mutación agrega valor al cruzamiento, ya que al modificar aleatoriamente los genes después del cruzamiento, se generan nuevas soluciones adaptativas que ayudan a evitar estos óptimos locales. Además, la mutación y el cruzamiento no solo incrementan la diversidad genética y permiten una exploración del espacio de soluciones, sino que también facilitan la explotación de áreas prometedoras del espacio de búsqueda. Esto se logra mediante la mejora y refinamiento de soluciones ya descubiertas al pasar de las generaciones, lo cual sirve para optimizar la búsqueda hacia el alcance de soluciones óptimas globales [9], [98].

Criterio de Parada:

Los GA generalmente emplean varios criterios de parada, como alcanzar un número máximo de generaciones, lograr un nivel de aptitud deseado, cuando la diversidad genética de la población cae por debajo de un umbral crítico, indicando una posible convergencia o cuando no hay mejoras en la función objetivo. Estos criterios ayudan a finalizar la ejecución del algoritmo una vez que se han cumplido las condiciones de terminación evitando el uso innecesario de recursos computacionales y cada una puede ser usada o establecida a criterios del usuario [98].

MATLAB cuenta con una herramienta de optimización que cuenta con el algoritmo GA, dentro de su interfaz se aprecian sus parámetros y en una sección especializada de la interfaz, se describe cada parámetro:

Migration Direction (Dirección de Migración)

Determina la dirección en la que los individuos migran entre subpoblaciones. Este parámetro ayuda a mantener la diversidad genética entre subpoblaciones y evita la convergencia prematura.

Population Size (Tamaño de la Población)

Define cuántos individuos hay en cada generación, un tamaño de población grande permite una búsqueda más amplia en el espacio de soluciones, pero también aumenta el tiempo de cómputo.

Fitness Scaling Function (Función de Escalado de Aptitud)

Ajusta los valores de aptitud para controlar la selección. Mejora la diversidad de la población y previene que los individuos con alta aptitud dominen el proceso de selección.

Selection Function (Función de Selección)

Determina cómo se seleccionan los padres para la reproducción. Ajusta a los individuos una probabilidad específica de ser seleccionados para reproducirse.

Elite Count (Conteo de Élite)

Especifica el número de individuos con mejor aptitud que se pasan directamente a la próxima generación sin cambios. Este parámetro puede aumentar la eficiencia de la búsqueda manteniendo las mejores soluciones encontradas hasta el momento.

Crossover Fraction (Fracción de Cruce)

Define la proporción de la próxima generación que se produce mediante el cruce de padres. Controla el balance entre exploración (cruce) y explotación (mutación) del espacio de soluciones.

Mutation Function (Función de Mutación)

Realiza pequeños cambios aleatorios en los individuos para crear diversidad. Previene la convergencia prematura y ayuda a explorar nuevas áreas del espacio de soluciones.

Crossover Function (Función de Cruce)

Combina partes de dos padres para crear nuevos individuos. Aumenta la diversidad genética combinando características de diferentes individuos.

Hybrid Function (Función Híbrida)

Integra otros métodos de optimización para mejorar las soluciones encontradas por el algoritmo genético. Utilizado para refinar las soluciones finales y mejorar la precisión del resultado.

3.2.4 Algoritmo Evolutivo Diferencial (DE).

El Algoritmo Evolutivo Diferencial (DE) es una técnica metaheurística que se basa en poblaciones de vectores numéricos. El proceso de abordar un problema de optimización con DE se distingue por su iteración a través de una población de vectores, permitiendo la evolución de soluciones candidatas en función de una métrica de aptitud conocida como "fitness". Para una comprensión visual más clara, se proporciona el diagrama esquemático del algoritmo DE en la Figura 9, destacando sus tres operaciones fundamentales: mutación, cruzamiento y selección. En la etapa de mutación, los vectores de la población experimentan perturbaciones aleatorias, controlando así la diversidad mediante el proceso de cruce. Simultáneamente, el proceso de selección identifica los vectores que contienen las soluciones más aptas [100].

Entre los beneficios inherentes al enfoque DE, se destacan su aplicabilidad sencilla, rápida capacidad de convergencia y su propensión a alcanzar la solución óptima global sin quedar atrapado en soluciones locales.

Sin embargo, al poner en práctica los EA como los DE, los usuarios se enfrentan a la necesidad de no solo determinar los esquemas de codificación apropiados y los operadores evolutivos, sino también seleccionar las configuraciones de parámetros adecuadas para garantizar el éxito del algoritmo. Esto puede resultar en costos computacionales significativos, ya que el proceso de ajuste de parámetros y operadores es largo y requiere ensayo y error. Para abordar este desafío, los investigadores han estado investigando activamente la adaptación de parámetros y operadores en los EA en general [55], [94], [95], [96].

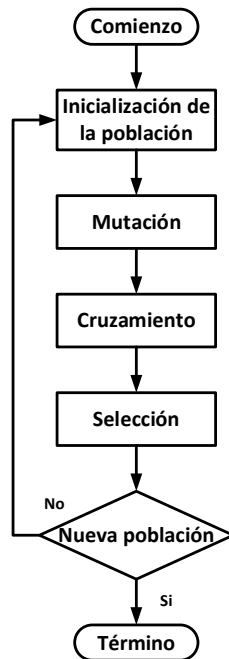


Figura 9. Diagrama de flujo del Algoritmo Evolutivo Diferencial.

En ese sentido para reconocer como adaptar y decidir como proponer los valores para cada parámetro del algoritmo evolutivo diferencial, es necesario entender cómo se representan sus soluciones y entender sus operadores, los cuales se detallan a continuación:

Representación de las Soluciones:

DE representa soluciones como vectores o arreglos de valores reales, sin utilizar codificaciones binarias los cuales son expresadas en N vectores como población $x_i, G; i = 0 \dots N - 1$. En cada generación G , teniendo en cuenta que el número asignado para N es el mismo en todo el proceso de minimización [59].

La idea de este método se centra en la creación de un esquema para generar vectores. Este procedimiento se inicia al agregar la diferencia de ponderaciones entre dos vectores que forman parte de la población a un tercer vector miembro. En este punto, se lleva a cabo una evaluación de la aptitud del vector resultante. En el caso de que este sea superior (o menor en el caso de minimización), se procede a reemplazar al vector con el que se comparó. El vector de mayor calidad en cada generación (iteración) se preserva para mantener la integridad del proceso en las generaciones posteriores.

Operadores de Mutación y Cruzamiento:

El DE se centran principalmente en operadores de mutación, con su operador central siendo la "mutación del vector diferencial", una forma en la que DE puede encontrar la solución óptima es en que genera nuevas soluciones perturbando la diferencia entre los vectores de población a partir de 3 vectores generados al azar, de los cuales, un par de vectores se restan para definir una dirección de búsqueda, esta dirección se multiplica por el factor escala F (el cual varía de 0 a 1) que controla la magnitud o el tamaño de la perturbación aplicada a la

dirección de búsqueda durante la operación de mutación. Esta ecuación se muestra en (17), el cual representa la descripción anterior.

$$\vec{v} = \overrightarrow{X_{r_1,G}} + F(\overrightarrow{X_{r_2,G}} - \overrightarrow{X_{r_3,G}}) \quad (17)$$

Donde \vec{v} es el vector generado a través del proceso de mutación que será usado para el cruzamiento y que puede ser usado para la selección, los vectores $\overrightarrow{X_{r_l,G}}$ de población en la generación G , r_n son los valores generados de forma aleatoria para cada vector, y F es el “factor de escala” que permite modificar la diferencia entre $\overrightarrow{X_{r_2,G}}$ y $\overrightarrow{X_{r_3,G}}$ (aumentando o disminuyendo la magnitud de la diferencia vectorial).

El parámetro F es el más importante para el funcionamiento de DE, ya que determina cuán lejos o cerca de la dirección de búsqueda original se moverá el candidato de la solución mutada, es un parámetro de gran importancia pues es la que controla la velocidad y la robustez de la búsqueda [59], se mantiene constante durante todo el proceso de optimización. El valor de este parámetro puede influir significativamente en la convergencia y el rendimiento del algoritmo. Un valor más grande de F dará como resultado mutaciones más grandes, lo que puede aumentar la exploración en el espacio de búsqueda, pero también puede hacer que el algoritmo sea menos estable. Por otro lado, un valor más pequeño de F generará mutaciones más pequeñas, lo que puede ser beneficioso para la exploración local y la convergencia, pero podría hacer que el algoritmo sea menos capaz de escapar de óptimos locales, dicho factor establece el rango de diferencia entre los individuos, usualmente denotados como $x_{r_2,G}$ y $x_{r_3,G}$ con r_1, r_2, r_3 diferentes entre sí, enteros y tomados aleatoriamente en el intervalo $[0, N - 1]$, F es un factor real y constante por lo que siempre $F > 0$ con el fin de evitar el estancamiento en el proceso de búsqueda; al final se obtiene el “vector padre” o el vector de mutación, por lo tanto, el factor F es un valor que se debe ser cuidadoso ya que un valor pequeño puede atascarse en un óptimo local en la búsqueda como se reporta en [55], [96], [101].

Por otro lado, en la parte de cruzamiento para DE, se genera un nuevo vector llamado “vector de prueba” o “vector niño”, el cual hace uso del factor Cr con valores que van del 0 al 1 y el valor definirá que tan parecido será al “vector padre” o vector de mutación, es el factor que controla la probabilidad de cruzamiento entre el vector de prueba (vector niño) y el vector de mutación (vector padre). Un valor cercano a 1, significa que se verá bastante influenciada por el vector de mutación, es decir, se dará una gran importancia de las diferencias entre el vector de prueba y el vector de mutación para la generación de nuevas soluciones, entonces será bastante parecido al vector de mutación original; mientras que si es cercano a 0 el vector de prueba será parecido al vector de prueba (vector niño) [59], [102], por lo que un valor cercano a 1 dará lugar a una exploración más intensiva de nuevas soluciones, mientras que un valor cercano a 0 conducirá a una exploración más limitada y conservadora.

El cruzamiento constituye una parte importante del algoritmo DE, pues es uno de los factores que da comienzo al algoritmo de empezar a buscar las soluciones posibles. Las estrategias

aplicables en DE varían en función del tipo de problema al que se aplique. Estas estrategias se fundamentan en diversos aspectos, como la elección del vector a perturbar (que puede ser el mejor vector de la generación previa o cualquier vector seleccionado de manera aleatoria), la cantidad de vectores distintos considerados para la perturbación y el tipo de cruce que se empleará. En este último aspecto, se distinguen dos modalidades de cruce: la exponencial y la binomial [101].

D es un parámetro que indica cuántas variables (o dimensiones) de la solución mutante se tomarán de la solución original durante la operación de cruce binomial, determina la estrategia de cruce binomial, donde para cada variable de la solución mutante generada, se decide independientemente si se tomará de la solución mutante (con probabilidad Cr).

En el cruce exponencial, el proceso de cruce se interrumpe tan pronto como un número aleatorio generado entre 0 y 1 excede el valor de Cr. En este caso, si el número aleatorio supera Cr, se detiene el proceso de cruce y las variables que aún no han sido modificadas permanecen sin alteración. Esto implica que no todas las variables se modifican necesariamente durante cada operación de cruce, y la decisión de continuar o detenerse se basa en una sola evaluación aleatoria (Se detiene tan pronto como el número aleatorio es mayor que Cr). Por otro lado, en el cruce binomial, la operación de cruce se realiza en cada una de las "D" variables (o dimensiones) de la solución mutante si el número aleatorio generado de entre 0 y 1 es menor que el valor de Cr (para cada dimensión o para cada variable de la solución, se genera un número aleatorio entre 0 y 1, si este número es menor que Cr, entonces se realiza la operación de cruce en esa dimensión específica). Esto significa que, para cada dimensión de la solución, se decide de manera independiente si se aplicará una mutación cruzada basada en la probabilidad Cr (Se aplica a cada variable si el número aleatorio es menor que Cr) [103].

La cruce binomial es un tipo específico de operador utilizado en DE, que significa que para cada dimensión o variable en las soluciones (vectores en el espacio de búsqueda), se decide de forma aleatoria si se aplicará una combinación con otras soluciones de la población. El parámetro "D" controla cuántas variables del vector $\overrightarrow{X_{r,G}}$ se reemplazan por las variables correspondientes de \vec{v}

Mecanismos de selección:

Los DE no tienen una técnica de selección como tal pero su mecanismo se basa en utilizar un proceso donde las nuevas soluciones candidatas reemplazan a las existentes en función de su aptitud el cual siempre se basan en los operadores de variación propios del algoritmo DE como lo son el factor de escalamiento F y la probabilidad de cruzamiento Cr, de los cuales se obtienen el vector hijo que seguirá siendo afectado por estas variaciones.

Criterio de parada:

Los algoritmos DE utilizan criterios de parada como un número máximo de generaciones, un valor de aptitud umbral o una medida de convergencia basada en la diversidad de la población. Los algoritmos DE son menos estocásticos, ya que se basan principalmente en la

mutación. Si bien el proceso de mutación introduce cierta aleatoriedad, el algoritmo en sí tiende a ser más determinista.

Los DE tienen menos parámetros para ajustar, centrándose en los parámetros relacionados con la mutación pues aquí se encuentra el valor más importante "F" [60]. Los algoritmos DE pueden contar con otro parámetro durante el proceso de mutación y cruce de vectores, denominado "j". Este parámetro garantiza que, al menos, uno de los valores del vector resultante provenga del vector de cruce, lo cual es de gran importancia. Este ajuste es esencial, ya que evita que la aleatoriedad tome todos los valores del vector generado aleatoriamente (vector de cruce). Del vector resultante con la participación de "j" se obtendrá el vector que se considerará en el mecanismo de reemplazo de la nueva población.

3.3 Método Taguchi

3.3.1 Introducción al método Taguchi

El método Taguchi es una técnica de diseño experimental que sirve para planificar experimentos, busca optimizar los parámetros del proceso y reducir la variabilidad, mejorando así la calidad y la robustez del sistema o proceso, esto permite establecer el menor número de experimentos necesarios para alcanzar la mejora deseada.

El método Taguchi se enfoca en la identificación y control de factores que influyen en la variabilidad, buscando minimizar el impacto de las fuentes de variación. Este método se sustenta en tres pilares fundamentales: la función de pérdida, que cuantifica la desviación entre el desempeño real y el deseado de una característica de calidad; la matriz ortogonal de Taguchi, que organiza los experimentos para evaluar diferentes niveles de factores; y el análisis ANOVA, que permite determinar los factores críticos y sus efectos sobre el sistema. Tiene la capacidad de mantener un desempeño constante frente a variaciones, a través de la selección de niveles óptimos de factores que reducen la variabilidad en la calidad [15].

3.3.2 Fases del Método Taguchi

Basándonos en las fases que conforman la aplicación de la DOE para el método Taguchi [104], ilustrada en el diagrama esquemático de la Figura 10, existen 5 fases:

I - Planificación

Esta etapa corresponde a la sesión de planificación del experimento. Todas las decisiones relacionadas con el proyecto, como los objetivos, el método de medición y los factores que podrían afectar los resultados, son tomadas consideradas y planificadas [105].

En el caso de los algoritmos metaheurísticos, es necesario definir que el objetivo es encontrar los ángulos de conmutación que satisfagan una menor THD, en el cual se busca definir sus parámetros que establezcan un ajuste que logre encontrar el resultado óptimo.

II - Diseño

Las sesiones de planificación culminan con todos los datos requeridos para la estrategia experimental. Basándose en los factores y niveles identificados, se diseña un experimento

que defina con claridad el número de experimentos y el método de ejecución para cada uno de los experimentos y se identifican varios componentes:

- Se determina el sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancia. Donde el enfoque ideal es identificar los factores y sus parámetros (las opciones disponibles para controlar el sistema y como es que se controla cada una) y como estos influcian al sistema. Los factores de señal son los controlados por el usuario, los factores de control por el diseñador, y los factores de ruido representan variaciones no controlables. La salida es la respuesta deseada.
- Identificar los factores de ruido, contemplando que pueden ser externos, internos y de deterioro [41]. Por ejemplo, en la selección de una herramienta para una CNC [42] donde un factor externo puede ser la influencia de una determinada herramienta al afectarse con la expansión térmica de la pieza de trabajo o herramienta. En un factor interno se podría ver en la calidad final de las piezas, aunque todas sigan las mismas especificaciones de diseño, pueden existir diferencias menores en las características debido a fluctuaciones en el proceso de fabricación o las variaciones intrínsecas en los materiales. En cuanto factor de deterioro se puede referir por ejemplo al deterioro que existe de una herramienta al desgastarse por la velocidad o la forma de operación para realizar una pieza.

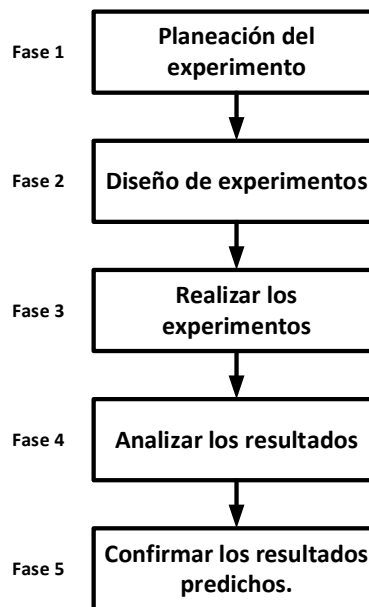


Figura 10. Fases de aplicación para Taguchi.

El método de Taguchi consiste en obtener un diseño de experimentos que permita llevar a cabo una serie de experimentos y predecir el óptimo de un sistema con un objetivo y desarrollo definidos [15].

III - Ejecución

Una vez diseñados los experimentos, se llevan a cabo siguiendo la combinación de diseño, dependiendo de los factores y niveles se crea un arreglo el cual debe seguirse la DOE que

minimizan el número de experimentos, permitiendo identificar factores que influyen en la respuesta con la menor cantidad de pruebas [106].

IV - Análisis

En esta etapa se analizan los resultados recopilados de los experimentos, el objetivo principal del análisis es obtener información acerca de la nueva condición de diseño y una estimación de la mejora esperada del sistema, en nuestro caso la mejora de la THD [40]. La relación señal/ruido (S/N) es una medida de la característica de calidad del proceso o del sistema (la THD) donde se busca alcanzar un valor determinado (nominal, mínimo o máximo) por lo que existen principalmente 3 ecuaciones para encontrar, según convenga, el óptimo del sistema [107]:

$$S/N_{SB} = -10 \log \left[\frac{\sum \gamma_i^2}{n} \right] \quad (18)$$

$$S/N_{LB} = -10 \log \left[\frac{\sum \frac{1}{\gamma_i^2}}{n} \right] \quad (19)$$

$$S/N_{NB} = 10 \log \left[\frac{\sum \overline{\gamma^2}}{\sigma^2} \right] \quad (20)$$

Donde:

γ_i Datos de salida medidos del i-ésimo experimento.

σ varianza.

n es el número de pruebas.

Optimizar esta relación implica minimizar la pérdida de calidad después de ajustes y aumentar la robustez del producto frente a factores de ruido.

Cada una tiene su uso para un interés en específico, por ejemplo; SB expresado en (18) se puede aplicar en el estudio de las emisiones del dióxido de carbono, LB expresada en (19) se puede aplicar en agricultura, y finalmente NB expresado en (20) se puede aplicar en estudiar una pieza de unión en un ensamblaje.

En este trabajo se analizan los datos obtenidos por la DOE con la función de “menor es mejor” (SB – Small Better), bajo el mismo criterio de selección expuesta en [108], el cual es expresada en (18). La selección de esta ecuación implica que son variables que deben cumplir con un límite máximo y, idealmente, cuanto menor sea su valor entonces mejor será para el sistema.

La robustez del sistema se logra cuando cuenta con el desempeño que se está buscando (menor THD) donde se puedan minimizar los factores no controlables, logrando encontrar la combinación óptima de niveles de los factores controlables y no controlables (factores ruido)

que afecten a menor o mayor medida, es decir, que tan sensibles son los factores o que tanta influencia existe).

La gráfica de efectos principales sirve para determinar los niveles óptimos para cada factor el cual muestra la representación gráfica S/N de los niveles considerados durante el análisis de Taguchi. En la que se analiza cada nivel con el objetivo de comprender su influencia en el rendimiento del sistema y se logran identificar los niveles que contribuyen de manera más significativa al rendimiento deseado [109].

Estas gráficas sirven para visualizar cuales efectos pueden ser más significativos, de ahí se determina cuales factores optimizan el sistema, entre más se aleje un punto de la línea punteada en horizontal (línea de referencia), mas importante será el correspondiente efecto y mientras más inclinada sea la línea más sensible será, la sensibilidad de un factor es la capacidad que tiene ese factor en influir en los resultados finales del sistema mediante ajustes en sus niveles. Los que no son significativos tenderán a formar una línea horizontal, mientras que los puntos menos importantes aparecerán alejados de la línea de referencia. Todo punto alejado de la línea de normalidad sugiere un efecto positivo. Aquellos puntos que estén por debajo de la línea de referencia indican un efecto negativo y los que se encuentren cerca de la línea de normalidad indican que no tienen un impacto significativo en el resultado [110], [111], [112], [113], [114].

V - Confirmación

Para verificar la viabilidad real de la mejora o para evaluar qué tan precisa es la estimación en comparación con el rendimiento real, se prueban diversas muestras elaboradas de acuerdo con las especificaciones del nuevo diseño, es decir, mediante los niveles sugeridos por la gráfica de efectos principales, se seleccionan los niveles adecuados para cada factor, a veces, los factores se pueden ver afectados por su sensibilidad o por el criterio del experimentador [115].

Capítulo

4. Caso de estudio

La función objetivo, utilizada en los algoritmos GA y DE en conjunto con el método de Taguchi, es detallada y descrita en [8], [9], y se expresa en (13) y (14). En esta función objetivo se aplicarán las metaheurísticas junto con el método Taguchi, utilizando la función "Small is Better" expresada en (18) para optimizar los parámetros y mejorar la THD. La función objetivo se basa en la ecuación (14), que se utiliza para encontrar los ángulos de conmutación, y la ecuación (15) que calcula la THD. Se reconoce que la función objetivo es univaluada porque hay un único resultado de THD dado un conjunto de variables específicos. La función objetivo es multimodal, lo que implica que puede tener múltiples óptimos locales debido a la presencia de estas múltiples soluciones subóptimas (óptimos locales) que son características del problema, esto se debe a la compleja interacción entre los armónicos y los ángulos de conmutación, que permite que varias configuraciones diferentes resulten en valores bajos de THD, sin que todas ellas sean necesariamente el mínimo absoluto, es decir, que a diferentes configuraciones de ángulos de conmutación se pueden producir varios valores bajos de THD. La función objetivo es no convexa debido a la multimodalidad y la no linealidad (un ejemplo que demuestra la no convexidad son la presencia de numerosos óptimos locales). Esto significa que no existe una única dirección en la que se pueda garantizar que se está moviendo hacia un óptimo global, lo cual complica encontrar el valor óptimo.

Finalmente, la limitación de la función objetivo se establece hasta el armónico 49 para que los niveles de THD puedan cumplir con las especificaciones de la norma IEEE 519.

4.1 Método Taguchi-DE

En el caso de los algoritmos metaheurísticos, es necesario definir que el objetivo es encontrar los ángulos de conmutación que satisfagan una menor THD, en el cual se busca definir sus parámetros que establezcan un ajuste que logre encontrar el resultado óptimo.

Partiendo de las fases que conforman la aplicación del diseño de experimentos [104], ilustrada en el diagrama esquemático de la Figura 10, se realiza cada Fase para satisfacer el análisis. Sabiendo que para satisfacer la Fase 1, se establece que se buscan los ángulos de conmutación, se pasa a la Fase 2 el cual es necesario realizar una investigación acerca del algoritmo metaheurístico.

Una vez comprendiendo el algoritmo evolutivo diferencial, sus distintos comportamientos y sus parámetros, se empieza a indagar sobre lo que se conoce para proponer la DOE para realizar el estudio de Taguchi.

Se reconoce que existen óptimos locales y óptimos globales, y que se pretende encontrar los óptimos globales pues es el que, dentro de las soluciones locales, el global es el que contendrá el mejor resultado. Es posible que un espacio de búsqueda cercano a la local se pueda encontrar el óptimo global. Porque el concepto de óptimo global solo destaca a la mejor solución sin importar donde se encuentre, si fuera o dentro de la nube de las posibles soluciones que optimicen el sistema.

Para la plataforma de su ejecución se opta por usar la herramienta de MATLAB conocida como YPEA (Yarpiz Evolutionary Algorithms) el cual es una herramienta para MATLAB proporcionada por Yarpiz. Esta herramienta incluye implementaciones de diversos algoritmos evolutivos y metaheurísticas, facilitando su uso y experimentación en MATLAB.

El algoritmo DE en la herramienta de YPEA cuenta con varias estrategias de mutación en las que se puede aplicar, se opta por ED/rand/1/bin, que se refiere al algoritmo DE (ED), la manera en cómo el vector de mutación es seleccionado de forma aleatoria (rand), que el valor de D será igual a 1 el cual se presenta en (17) anteriormente mostrada. Y hace referencia a que tomara un comportamiento binomial (bin). Es decir, la cruce se efectúa en cada variable “D” siempre y cuando se elija un número de manera aleatoria este entre cero y uno, éste sea menor que el valor de CR, en este caso considerando los valores propuestos por la DOE de Taguchi. Dado que se ha encontrado que no se requiere un número grande de generaciones, no más de 250, se proponen varios intervalos de generaciones para los niveles del factor de generaciones para la DOE de Taguchi.

La propuesta para los factores de la DOE de Taguchi que se pretende manipular se presenta en la Tabla 6, la cual considera los valores estudiados para todos los parámetros necesarios de DE.

Minitab es un software que cuenta con un catálogo de diseños DOE que son descritos en [110], [116] donde se muestra cómo se pueden obtener y el catálogo que dispone el software que se puede encontrar.

Considerando la Tabla 6, se tiene 4 factores (o 4 parámetros disponibles controlables) cada uno con 5 niveles (o 5 formas posibles de configurar). En lo mencionado anteriormente, se tiene que la DOE que mejor se ajusta a esta configuración de factores y de niveles es una DOE con 25 experimentos la cual se expone en la Tabla 7, cuando se ingresan los factores y niveles en Minitab, el software ofrece un diseño de 25 experimentos, este diseño es elegido porque es el número mínimo de experimentos necesarios para evaluar todas las combinaciones de niveles de los factores, esto asegura que se obtenga información suficiente para analizar y optimizar la THD, cumpliendo con los objetivos del proceso sin realizar numerosos experimentos.

Tabla 6. DOE de Taguchi de los parámetros del solucionador de Matlab (YPEA) y sus niveles experimentales para el algoritmo evolutivo diferencial (DE).

No.	Np- Population size	Generations	F-Scale Factor	Cr- Crossove r rate
1	5	10	0.3	0.3
2	10	50	0.5	0.5
3	20	100	0.8	0.8
4	50	150	0.9	0.9
5	100	200	1	1

La Tabla 7 satisface entonces la Fase 2 de las fases de aplicación de la DOE anteriormente mostrada en la Figura 10. Pasando a la Fase 3, se realizan los experimentos y se tabulan, cada

experimento (en este caso 25) se realiza 5 veces cada uno, para tener una variedad de muestras y poder discriminar la aleatoriedad en lo más posible e incrementar la consistencia de la respuesta del experimento como se expone en [117] para cada inversor CHBMLI. Los resultados capturados se presentan en la Tabla 8 y Tabla 9 para cada inversor CHBMLI.

En la Tabla 8 y Tabla 9 la primera columna “Exp” representa cada experimento de la Tabla 7, y en las columnas de cada “Corrida” representa cada repetición de cada experimento.

Tabla 7. Diseño de experimentos (DOE) generada con Minitab para DE con Taguchi-DE.

Parametros del solucionador de DE				
E	Np - Population size	Generations	F - Scale Factor	Cr - Crossover rate
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	1	5	5	5
6	2	1	2	3
7	2	2	3	4
8	2	3	4	5
9	2	4	5	1
10	2	5	1	2
11	3	1	3	5
12	3	2	4	1
13	3	3	5	2
14	3	4	1	3
15	3	5	2	4
16	4	1	4	2
17	4	2	5	3
18	4	3	1	4
19	4	4	2	5
20	4	5	3	1
21	5	1	5	4
22	5	2	1	5
23	5	3	2	1
24	5	4	3	2
25	5	5	4	3

Tabla 8. Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE.

SIVI	Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Corrida 5		
	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD
1	26.555	46.976	23.937	12.377	37.762	15.887	12.022	42.665	15.458	30.990	57.381	31.246	28.922	39.779	26.558
2	26.860	46.938	24.241	21.020	42.294	18.642	13.279	43.039	15.366	13.804	59.805	21.821	13.404	41.915	15.300
3	13.159	41.920	15.306	13.290	48.423	16.340	13.628	42.057	15.306	19.358	35.845	18.838	14.413	41.957	15.406
4	13.349	41.997	15.301	24.490	89.567	27.579	13.989	41.792	15.338	13.374	42.477	15.317	17.647	43.866	16.538
5	4.712	39.504	18.723	9.667	38.814	16.068	15.819	39.937	16.045	13.666	50.718	17.215	3.162	41.532	19.919
6	13.359	41.258	15.322	13.622	41.772	15.306	14.073	41.857	15.348	13.296	42.125	15.304	15.453	41.572	15.706
7	13.408	41.915	15.300	13.393	41.913	15.300	13.133	41.123	15.337	13.408	41.887	15.300	13.408	41.915	15.300
8	13.641	41.916	15.306	13.417	41.921	15.300	13.227	42.752	15.339	13.415	41.924	15.300	13.424	41.916	15.300
9	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
10	17.614	41.495	16.643	13.138	41.923	15.307	13.378	46.674	15.883	13.270	43.249	15.389	13.039	42.796	15.350
11	12.736	42.351	15.350	13.770	42.886	15.368	14.619	42.350	15.457	13.591	42.253	15.310	13.561	42.008	15.303
12	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
13	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
14	13.347	41.331	15.318	13.424	41.915	15.300	11.991	42.823	15.468	13.410	41.914	15.300	13.408	41.915	15.300
15	13.388	41.915	15.300	13.422	42.061	15.301	13.374	40.723	15.368	13.388	41.736	15.302	13.204	41.876	15.304
16	13.694	42.098	15.311	13.465	42.562	15.324	13.709	41.377	15.327	13.048	42.055	15.314	13.242	41.970	15.303
17	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
18	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.411	41.916	15.300	13.408	41.915	15.300
19	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
20	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
21	13.476	42.146	15.303	13.358	41.713	15.302	13.357	42.080	15.302	13.150	42.151	15.310	13.252	41.797	15.303
22	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
23	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
24	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
25	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300

Tabla 9. Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE.

7IVI	Corrida 1				Corrida 2				Corrida 3				Corrida 4				Corrida 5			
	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD
1	26.407	42.448	87.548	24.720	18.051	40.459	89.852	16.877	6.540	23.144	39.639	13.547	33.489	68.492	89.893	38.018	13.977	53.038	89.886	18.211
2	34.307	38.335	52.717	32.435	9.826	16.585	81.226	26.467	21.114	55.969	89.900	21.779	34.350	36.057	56.457	31.880	11.123	50.668	85.962	20.500
3	8.645	26.405	50.256	10.559	10.426	21.308	76.111	21.164	15.885	35.479	78.694	18.114	14.372	50.851	89.900	17.300	16.492	68.039	89.900	26.486
4	26.408	32.324	72.144	24.880	13.336	42.140	65.903	18.217	3.554	66.169	89.900	30.979	13.371	41.818	89.900	15.241	10.263	29.165	56.756	11.109
5	19.320	88.416	4.042	40.000	4.791	28.474	46.150	11.890	11.167	48.620	80.954	21.523	14.682	30.931	62.655	14.030	89.703	89.848	8.587	40.000
6	4.017	17.489	47.635	15.135	8.169	25.429	46.297	11.031	10.111	28.172	53.737	10.665	13.436	64.366	79.382	33.874	8.630	25.256	51.924	10.813
7	9.724	28.022	50.697	10.491	5.084	27.212	51.392	11.352	11.352	26.014	50.077	10.620	9.952	37.218	57.854	13.900	9.561	30.020	51.537	10.636
8	8.510	27.825	49.787	10.434	13.634	41.765	89.572	15.164	9.999	34.189	70.049	15.299	9.033	28.108	50.707	10.453	4.632	29.661	50.997	11.676
9	8.693	27.896	49.817	10.432	13.307	41.544	89.547	15.151	8.693	27.896	49.817	10.432	13.389	41.842	89.900	15.240	8.674	27.855	49.811	10.433
10	14.291	57.028	89.900	20.201	23.119	31.165	52.300	19.117	25.950	31.907	60.720	22.426	9.972	32.713	58.841	12.055	8.022	20.923	48.463	12.235
11	8.464	26.504	45.606	11.048	8.388	26.927	50.399	10.497	8.381	28.074	52.097	10.545	7.682	32.870	54.671	11.753	8.703	31.546	50.420	11.145
12	8.693	27.885	49.826	10.432	8.705	27.902	49.828	10.432	9.088	27.653	50.768	10.459	8.699	27.896	49.809	10.432	8.697	27.914	49.816	10.432
13	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
14	8.816	27.932	50.161	10.436	9.322	28.430	50.591	10.463	8.710	27.714	50.114	10.438	13.176	47.655	89.765	16.061	9.483	28.608	50.638	10.479
15	8.734	27.908	49.833	10.432	6.980	27.268	49.656	10.568	8.697	27.898	49.825	10.432	8.879	27.946	50.063	10.435	13.433	41.568	89.550	15.153
16	7.484	27.637	50.012	10.498	7.614	27.562	49.335	10.477	9.868	30.615	52.298	10.737	9.433	27.438	53.732	10.640	9.452	27.590	50.936	10.482
17	8.690	27.896	49.810	10.432	8.694	27.896	49.818	10.432	8.694	27.896	49.817	10.432	8.693	27.897	49.815	10.432	8.693	27.896	49.818	10.432
18	8.790	27.925	49.851	10.433	6.383	27.592	49.812	10.715	8.694	27.896	49.819	10.432	8.697	27.905	49.818	10.432	9.578	30.226	51.556	10.667
19	8.697	27.906	49.817	10.432	9.147	28.759	50.132	10.475	8.630	27.781	49.766	10.433	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
20	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
21	7.565	27.723	50.059	10.492	9.412	27.424	52.004	10.509	10.057	27.829	50.916	10.547	9.060	27.753	51.181	10.468	7.370	27.389	50.582	10.545
22	8.706	27.929	49.829	10.432	10.016	29.279	51.675	10.576	8.693	27.896	49.817	10.432	8.681	27.887	49.812	10.432	8.679	27.884	49.815	10.432
23	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
24	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
25	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432

En la Fase 4, se realiza el análisis de los resultados con (18) “Small is Better” y se obtiene una representación visual que muestra cómo elegir el valor óptimo de un factor de control que puede reducir la variabilidad en el resultado final, aprovechando relaciones no lineales para mejorar la robustez del sistema [110], [111], [112] y se muestra en la Figura 11.

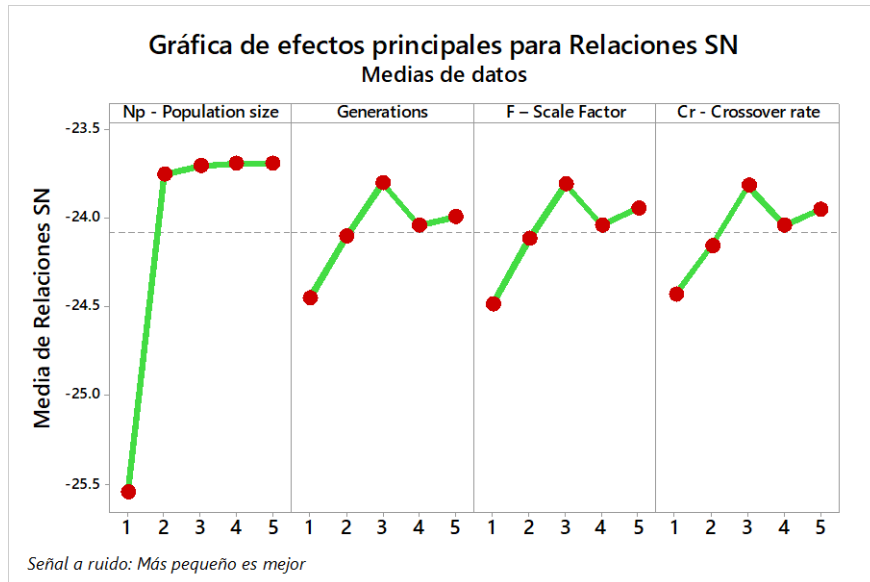


Figura 11 Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.

En la gráfica el eje vertical se representa la media de las relaciones S/N (Señal a Ruido) para cada nivel de los factores. En el eje horizontal se representa los niveles de cada factor analizado en la DOE, los niveles representan la manera en la que se configura cada factor.

Se observan las gráficas de efectos principales para el inversor de 5 niveles al examinar las representaciones gráficas de S/N, se distingue el factor Np, que revela una tendencia casi horizontal en sus últimos niveles; pero después con una gran inclinación en sus primeros niveles, insinuando así su falta de sensibilidad o de influencia en la mayoría de sus niveles, pero una gran influencia negativa principalmente es su primer nivel. Por el contrario, los factores Generations, F y Cr se presentan con inclinaciones considerables, lo que apunta hacia la posibilidad de ser más sensibles en comparación al resto de los demás factores, esto significa que cambiar del nivel más alto al más bajo o viceversa, el sistema se puede ver muy afectado (elegir 1 y 5 o 5 y 1 implican grandes afectaciones al sistema). Estos resultados se pueden corroborar con la tabla de efectos principales utilizando los valores de Delta el cual representa la diferencia entre el valor más alto y el más bajo de la media de S/N para cada factor. Es una medida de la variabilidad y sensibilidad del factor. Un valor de Delta mayor indica que el factor tiene un impacto más significativo en la respuesta del sistema, Delta se usa para clasificar la importancia de cada factor.

En la Tabla 10, se identifican las clasificaciones de los factores que consiste en obtener el valor de Delta, el cual se determina al restar el valor más alto del nivel de ese factor menos el valor más bajo de ese mismo factor. Luego, los valores de Delta se ordenan de mayor a menor, lo que proporciona un orden enumerado que facilita la identificación de los factores más sensibles o influyentes. Se considera que un factor es sensible o influyente cuando al modificar sus niveles puede tener un impacto sobre los resultados finales. En [118] indican que a partir del valor de Delta (que es el que da el orden a los factores para determinar el más

sensible o influyente) es con el que se basaron para averiguar los niveles óptimos para los factores establecidos.

Tabla 10. Tabla de análisis de varianza para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido

Más pequeño es mejor

Nivel	Np - Population size	Generations	F - Scale Factor	Cr - Crossover rate
1	-25.55	-24.45	-24.49	-24.43
2	-23.75	-24.11	-24.12	-24.16
3	-23.71	-23.80	-23.81	-23.82
4	-23.70	-24.04	-24.04	-24.04
5	-23.69	-23.99	-23.94	-23.95
Delta	1.85	0.65	0.68	0.62
Clasificar	1	3	2	4

Para identificar la combinación que resultaría en una menor THD para la función objetivo, es necesario revisar la Figura 11. En base a la línea punteada horizontal que representa la línea de referencia, se observan los puntos que se encuentran por encima de esta línea. De entre esos puntos, se seleccionan los niveles óptimos para cada factor (entiéndase niveles como los valores específicos asignados a cada factor). Los puntos óptimos son aquellos que se encuentran más alejados por encima de la línea punteada o línea de referencia, según lo observado. En la Tabla 11 se obtiene la configuración para cada factor. En última instancia se definen los siguientes niveles para cada factor:

Tabla 11. Configuración de los factores para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.

Configuración

Np - Population size	Generations	F - Scale Factor	Cr - Crossover rate
5	3	3	3

- Np – Population size: 100.
- Generations: 100.
- F – Scale Factor: 0.8.
- Cr – Crossover rate: 0.8.

Se implementaron estos parámetros en la YPEA toolbox de Matlab para DE y se obtiene que los ángulos de conmutación:

$$\theta_1 = 13.4080 \text{ y } \theta_2 = 41.9146$$

Logran alcanzar una THD de 15.299%.

Entregando como resultado una respuesta parecida a la Figura 12 considerando una respuesta aleatoria que no siempre será la misma por lo estocásticos que son las metaheurísticas [84], [119].

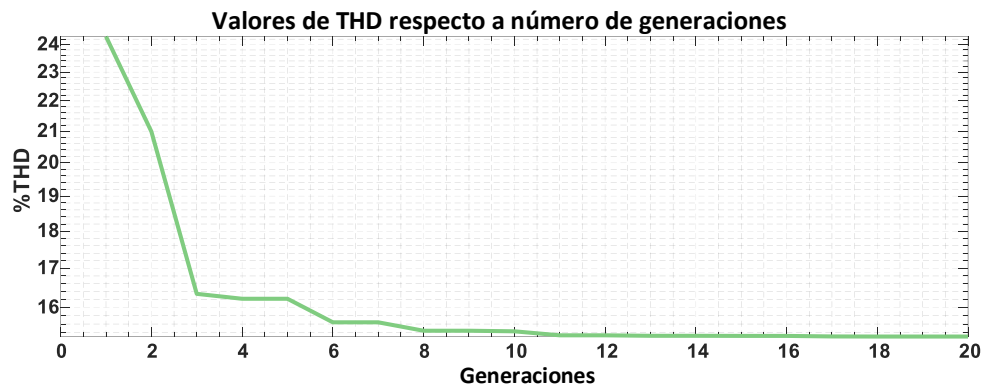


Figura 12. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en cascada de 5 niveles con Taguchi-DE.

Para el estudio del inversor CHBMLI de 7 niveles, en la Figura 13, se observan sus correspondientes graficas de efectos principales. Al examinar las representaciones gráficas de S/N (Señal a Ruido), en este caso se distingue el factor Generations, que revela una tendencia casi horizontal, insinuando así su falta de sensibilidad o de influencia. Por el contrario, para el análisis del inversor de 7 niveles, los factores Np, F y Cr se presentan con inclinaciones considerables, lo que apunta hacia la posibilidad de ser más sensibles en comparación al resto de los demás factores.

En la Tabla 12, se pueden apreciar las clasificaciones de los factores correspondientes al inversor de 7 niveles. Se destaca la posible sensibilidad de los factores Np, F y Cr.

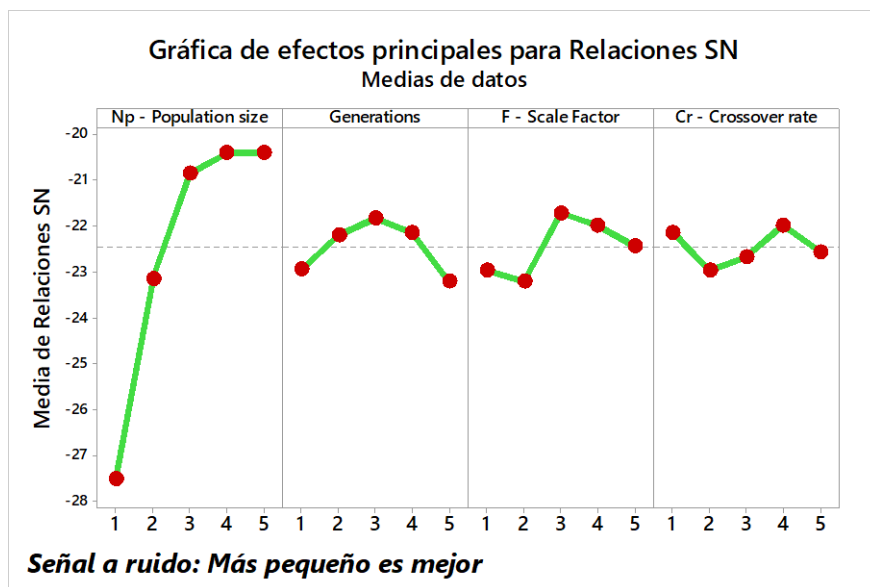


Figura 13. Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.

Tabla 12. Tabla de análisis de varianza para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido

Más pequeño es mejor

Nivel	Np - Population size	Generations	F - Scale Factor	Cr - Crossover rate
1	-27.52	-22.94	-22.96	-22.13
2	-23.13	-22.19	-23.21	-22.97
3	-20.85	-21.82	-21.71	-22.67
4	-20.41	-22.14	-21.98	-21.98
5	-20.39	-23.20	-22.44	-22.55
Delta	7.13	1.38	1.50	0.99
Clasificar	1	3	2	4

Para este caso, se obtiene la configuración para cada factor que resultaría en una menor THD para la función objetivo se muestra en la Tabla 13. En última instancia se definen los siguientes niveles para cada factor:

- Np – Population size: 100.
- Generations: 100.
- F – Scale Factor: 0.8.
- Cr – Crossover rate: 0.3.

Tabla 13. Configuración de los factores para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab.

Configuración

Np - Population size	Generations	F - Scale Factor	Cr - Crossover rate
5	3	3	1

Se implementaron estos parámetros en la YPEA toolbox de Matlab para DE y se obtiene que los ángulos de conmutación:

$$\theta_1 = 8.6929, \theta_2 = 27.8961 \text{ y } \theta_3 = 49.8167$$

Logran alcanzar una THD de 10.4324%. Entregando una respuesta parecida a la Figura 14.

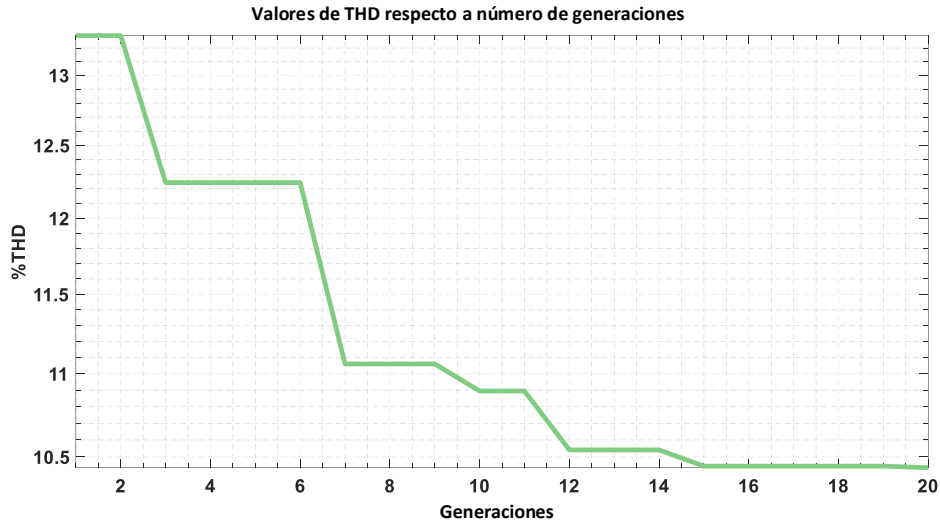


Figura 14. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en cascada de 7 niveles con Taguchi-DE empleando Minitab

Sin embargo, como en los valores asignados en los trabajos [37], [57]; se puede lograr un acercamiento de la eficiencia de la metaheurística eligiendo los valores que tiendan a una línea horizontal en las gráficas de efectos principales o en las tablas de la clasificación de los factores, siguiendo el mismo criterio reportado en [42], se puede establecer que los nuevos niveles óptimos para cada factor para el inversor CHBMLI de 5 niveles que se muestra en la Tabla 14 que son:

- Np – Population size: 20.
- Generations: 100.
- F – Scale Factor: 0.5
- Cr – Crossover rate: 0.5

Tabla 14. Configuración de los factores para el inversor H en cascada de 5 niveles ajustados con Taguchi-DE empleando Minitab.

Configuraciones			
Np – Population size	Generations	F – Scale Factor	Cr – Crossover rate
3	3	2	2

Se implementaron estos parámetros en la YPEA toolbox de Matlab para DE y se obtiene que los ángulos de conmutación:

$$\theta_1 = 13.408 \text{ y } \theta_2 = 41.915$$

Logran alcanzar una THD de 15.299%. Pero dentro de las 5 repeticiones se puede lograr obtener un valor de la THD de 15.3051%.

Y para el inversor CHBMLI de 7 niveles que se aprecia en la Tabla 15 serian:

Tabla 15. Configuración de los factores para el inversor H en cascada de 7 niveles ajustados con Taguchi-DE empleando Minitab.

Configuraciones			
Np – Population size	Generations	F – Scale Factor	Cr – Crossover rate
3	3	3	1

- Np – Population size: 20.
- Generations: 100.
- F – Scale Factor: 0.8
- Cr – Crossover rate: 0.3

Se implementaron estos parámetros en la YPEA toolbox de Matlab para DE y se obtiene que los ángulos de conmutación:

$$\theta_1 = 8.693, \theta_2 = 27.896 \text{ y } \theta_3 = 49.817$$

Logran alcanzar una THD de 10.4324%. Pero dentro de las 5 repeticiones se puede lograr obtener un valor de la THD de 10.4326% (diferencia muy mínima) e incluso en más de 5 repeticiones (30 repeticiones) se alcanza una THD de 15.134% (diferencia grande).

4.2 Método Taguchi-GA

Basándose en las fases que conforman la aplicación de la DOE [104], ilustrada en el diagrama esquemático de la Figura 10, se vuelve a realizar cada Fase para satisfacer el análisis. Y se opta por usar la herramienta de MATLAB de Optimización, que se utiliza para gestionar los parámetros y niveles de los factores, tal como se presenta en la Tabla 16 que muestra las configuraciones de los parámetros (los niveles de los factores). Esta herramienta permite definir y ajustar los parámetros de GA para los experimentos con diferentes niveles de los factores.

Tabla 16. Parámetros del solucionador de MATLAB y sus niveles experimentales para GA.

No.	Parameter	Code	Level			
			1	2	3	4
1	Migration direction	A	Forward	Both	-	-
2	Population size	B	50	100	150	200
3	Fitness scaling function	C	Proportional	Rank	Top	Shift linear
4	Selection function	D	Uniform	Tournament	Roulette	Stochastic uniform
5	Elite Count	E	1	5	10	15
6	Crossover fraction	F	0.3	0.5	0.7	0.9
7	Mutation function	G	Uniform	Constraint dependent	Adaptive feasible	Gaussian
8	Crossover function	H	Single point	Two point	Arithmetic	Scattered
9	Hybrid function	I	None	Fminsearch	Patternsearch	Fminunc

Esta configuración de factores y de niveles es una DOE con 32 experimentos, considerando la Tabla 16, se tiene que cuenta con 9 factores (o 9 parámetros disponibles controlables) cada uno con 4 niveles (o 4 formas posibles de configurar). Esta configuración de factores y de niveles conforman una DOE con 32 experimentos la cual se expone en la Tabla 17.

Tabla 17. Diseño de experimentos generada con MiniTab para el solucionador de MATLAB para GA.

E	Parámetros del solucionador GA								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3
4	1	1	4	4	4	4	4	4	4
5	1	2	1	1	2	2	3	3	4
6	1	2	2	2	1	1	4	4	3
7	1	2	3	3	4	4	1	1	2
8	1	2	4	4	3	3	2	2	1
9	1	3	1	2	3	4	1	2	3
10	1	3	2	1	4	3	2	1	4
11	1	3	3	4	1	2	3	4	1
12	1	3	4	3	2	1	4	3	2
13	1	4	1	2	4	3	3	4	2
14	1	4	2	1	3	4	4	3	1
15	1	4	3	4	2	1	1	2	4
16	1	4	4	3	1	2	2	1	3
17	2	1	1	4	1	4	2	3	2
18	2	1	2	3	2	3	1	4	1
19	2	1	3	2	3	2	4	1	4
20	2	1	4	1	4	1	3	2	3
21	2	2	1	4	2	3	4	1	3
22	2	2	2	3	1	4	3	2	4
23	2	2	3	2	4	1	2	3	1
24	2	2	4	1	3	2	1	4	2
25	2	3	1	3	3	1	2	4	4
26	2	3	2	4	4	2	1	3	3
27	2	3	3	1	1	3	4	2	2
28	2	3	4	2	2	4	3	1	1
29	2	4	1	3	4	2	4	2	1
30	2	4	2	4	3	1	3	1	2
31	2	4	3	1	2	4	2	4	3
32	2	4	4	2	1	3	1	3	4

Para GA se realizan los experimentos en la Toolbox de optimización que cuenta con un solucionador de problemas con GA, y se fijan límites para cada ángulo bajo los mismos criterios de aproximación de los ángulos de conmutación expuestos en [120].

Los resultados capturados de cada experimento (cada una 5 veces) se presentan en la Tabla 18 y Tabla 19 para cada inversor CHBMLI.

Tabla 18 Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA.

Sivl	Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Corrida 5		
Exp	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	THD
1	0.996	0.997	46.594	0.997	1.476	46.229	0.982	0.981	46.614	0.981	0.946	46.637	0.989	0.998	46.599
2	13.406	41.914	15.300	41.914	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.917	13.407	15.300	13.411	41.915	15.300
3	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300
4	41.913	13.407	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.914	15.300	41.915	13.407	15.300	41.913	13.408	15.300
5	13.407	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	41.916	13.409	15.300	41.913	13.408	15.300	41.914	13.406	15.300
6	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300
7	41.915	13.408	15.300	13.408	41.917	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.914	15.300
8	41.993	13.403	15.300	41.930	13.426	15.300	13.397	41.886	15.300	13.411	41.910	15.300	41.964	13.456	15.300
9	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300
10	41.915	13.408	15.300	13.408	41.917	15.300	13.408	41.915	15.300	41.914	13.407	15.300	13.407	41.914	15.300
11	13.409	41.911	15.300	41.913	13.393	15.300	13.399	41.806	15.301	41.942	13.369	15.300	13.397	41.940	15.300
12	41.915	13.408	15.300	13.406	41.915	15.300	13.408	41.914	15.300	13.407	41.914	15.300	41.915	13.408	15.300
13	13.408	41.912	15.300	41.911	13.412	15.300	13.406	41.911	15.300	13.408	41.915	15.300	13.407	41.915	15.300
14	10.453	6.342	35.701	6.094	16.694	30.041	14.912	3.333	32.400	2.494	21.404	27.633	8.050	21.012	25.959
15	13.408	41.914	15.300	13.407	41.914	15.300	13.408	41.915	15.300	13.409	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300
16	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300
17	41.916	13.407	15.300	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	41.914	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300
18	0.995	0.993	46.598	0.992	0.953	46.625	1.410	0.963	46.306	0.857	0.940	46.717	0.950	0.967	46.643
19	41.908	13.407	15.300	41.912	13.409	15.300	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300
20	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300	13.408	41.915	15.300
21	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300
22	13.407	41.914	15.300	41.915	13.408	15.300	13.407	41.920	15.300	41.915	13.408	15.300	13.406	41.912	15.300
23	41.913	13.385	15.300	13.406	41.913	15.300	41.905	13.384	15.300	41.908	13.397	15.300	13.413	41.919	15.300
24	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300
25	13.408	41.919	15.300	41.915	13.408	15.300	13.409	41.916	15.300	41.911	13.408	15.300	13.408	41.919	15.300
26	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300
27	41.915	13.408	15.300	41.916	13.408	15.300	41.915	13.407	15.300	41.916	13.407	15.300	41.915	13.408	15.300
28	13.413	41.894	15.300	13.410	41.908	15.300	41.919	13.463	15.300	13.444	41.958	15.300	41.998	13.367	15.300
29	13.399	41.925	15.300	13.383	41.926	15.300	13.376	41.833	15.300	41.889	13.457	15.300	13.341	41.915	15.300
30	41.910	13.409	15.300	41.918	13.406	15.300	13.407	41.914	15.300	13.412	41.912	15.300	13.408	41.916	15.300
31	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300	13.408	41.915	15.300	41.915	13.408	15.300
32	41.915	13.410	15.300	13.408	41.915	15.300	13.407	41.914	15.300	41.915	13.408	15.300	41.915	13.408	15.300

Tabla 19 Tabla de captura de resultados de los experimentos de la DOE para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA.

7lvl Exp	Corrida 1				Corrida 2				Corrida 3				Corrida 4				Corrida 5			
	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	THD
1	8.569	28.318	49.287	10.461	8.963	28.611	49.904	10.463	9.659	26.770	50.377	10.570	9.792	26.981	51.268	10.558	8.671	29.432	50.163	10.592
2	8.690	27.894	49.816	10.432	8.693	27.897	49.817	10.432	8.692	27.896	49.814	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
3	8.693	27.896	49.817	10.432	8.963	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
4	8.693	27.898	49.817	10.432	8.695	27.896	49.819	10.432	8.698	27.900	49.824	10.432	8.695	27.897	49.818	10.432	8.695	27.896	49.816	10.432
5	8.692	27.895	49.819	10.432	8.693	27.897	49.816	10.432	8.693	27.897	49.816	10.432	8.696	27.897	49.818	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
6	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
7	8.692	27.895	49.819	10.432	8.694	27.896	49.818	10.432	8.693	27.897	49.816	10.432	8.693	27.895	49.814	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
8	8.697	27.900	49.813	10.432	8.690	27.895	49.814	10.432	8.699	27.899	49.813	10.432	8.695	27.896	49.823	10.432	8.696	27.898	49.820	10.432
9	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
10	8.693	27.895	49.816	10.432	8.690	27.897	49.817	10.432	8.699	27.899	49.824	10.432	8.692	27.895	49.819	10.432	8.693	27.895	49.818	10.432
11	8.694	27.897	49.817	10.432	8.694	27.897	49.818	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.694	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
12	8.694	27.896	49.819	10.432	26.947	20.000	52.053	16.074	26.946	20.000	52.059	16.074	26.947	20.000	52.055	16.074	8.694	27.893	49.811	10.432
13	8.693	27.896	49.816	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.695	27.897	49.817	10.432	8.692	27.896	49.815	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432
14	27.852	8.841	49.846	10.434	27.697	8.465	49.490	10.438	8.682	27.822	49.685	10.433	8.797	49.729	28.099	10.436	8.726	27.939	49.789	10.433
15	8.694	27.898	49.814	10.432	8.693	27.897	49.817	10.432	8.692	27.896	49.816	10.432	8.693	27.897	49.815	10.432	8.692	27.897	49.816	10.432
16	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
17	8.689	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432
18	8.518	28.180	50.280	10.453	9.470	27.267	50.691	10.501	9.219	27.754	49.199	10.478	9.836	28.512	54.577	10.721	8.836	27.080	53.565	10.645
19	8.692	27.897	49.817	10.432	8.692	27.894	49.815	10.432	8.695	27.898	49.816	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432	8.694	27.897	49.815	10.432
20	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
21	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
22	8.693	27.896	49.817	10.432	8.695	27.895	49.820	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.692	27.896	49.820	10.432	8.692	27.896	49.816	10.432
23	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
24	8.693	27.894	49.817	10.432	8.693	27.897	49.817	10.432	8.694	27.892	49.816	10.432	8.693	27.895	49.816	10.432	8.692	27.895	49.817	10.432
25	8.705	27.904	49.827	10.432	8.704	27.897	49.829	10.432	8.694	27.896	49.816	10.432	8.694	27.896	49.819	10.432	8.691	27.895	49.815	10.432
26	8.691	27.895	49.815	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
27	8.692	27.896	49.818	10.432	8.694	27.897	49.815	10.432	8.694	27.899	49.818	10.432	10.076	58.526	45.000	19.480	8.692	27.896	49.816	10.432
28	8.694	27.897	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432	8.694	27.896	49.816	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
29	8.699	27.703	50.594	10.452	8.788	27.468	49.309	10.460	8.874	28.062	50.116	10.436	8.910	27.548	49.728	10.448	9.528	28.255	50.104	10.468
30	8.692	27.895	49.815	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432	8.693	27.896	49.816	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
31	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432	8.693	27.896	49.817	10.432
32	8.693	27.896	49.817	10.432	8.692	27.895	49.814	10.432	8.692	27.899	49.819	10.432	8.694	27.897	49.816	10.432	8.694	27.896	49.818	10.432

Se genera el estudio con el análisis de los resultados con la función menor es mejor y se obtiene una representación visual de cómo elegir el valor óptimo en las gráficas de efectos principales de la Figura 15 para el inversor CHBMLI de 5 niveles. Se analiza cada nivel con el objetivo de comprender su influencia en el rendimiento del sistema.

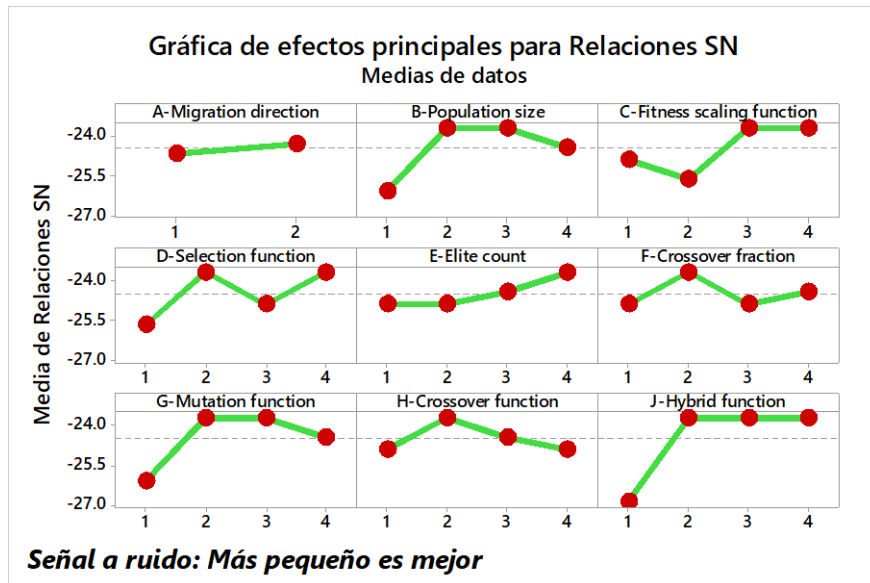


Figura 15. Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

En la Tabla 20, se observan los valores correspondientes a los factores B, G y J, que son los factores con más influencia en el sistema, por lo que es posible concluir que estos factores

podrían tener un impacto en la calidad de la THD en el sistema en comparación con el resto de los factores. Para estimar cuál de estos factores afecta más al sistema, se observa el factor J es el más sensible.

Para estimar cuál de estos factores afecta más al sistema, se lleva a cabo un análisis individual de los factores B, G y J por separado al resto de los factores. En la Tabla 21 se obtiene la configuración para cada factor. En última instancia se definen los siguientes niveles para cada factor:

- Migration direction: Both.
- Population size: 100.
- Fitness scaling function: Rank.
- Selection function: Tournament.
- Elite count: 15.
- Crossover fraction: 0.5.
- Mutation function: Constraint dependent.
- Crossover function: Two point.
- Hybrid function: Fminunc.

Tabla 20. Configuración de los factores para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido

Más pequeño es mejor

Nivel	B-Population size	G-Mutation function	J-Hybrid function
1	-26.11	-26.11	-26.86
2	-23.69	-23.69	-23.69
3	-23.69	-23.69	-23.69
4	-24.44	-24.44	-23.69
Delta	2.42	2.42	3.17
Clasificar	2	3	1

Tabla 21. Configuración de los factores para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

Configuraciones

A- Migration direction	B- Population size	C- Fitness scaling function	D- Selection function	E- Elite count	F- Crossover fraction	G- Mutation function
2	2	3	2	4	2	2
H-Crossover function	J-Hybrid function					
2	4					

Se implementaron estos parámetros en la GA toolbox de Matlab y se obtiene que $\theta_1 = 13.406^\circ$ y $\theta_2 = 41.915^\circ$ con una THD de 15.299%. Entregando una respuesta parecida a la Figura 16.

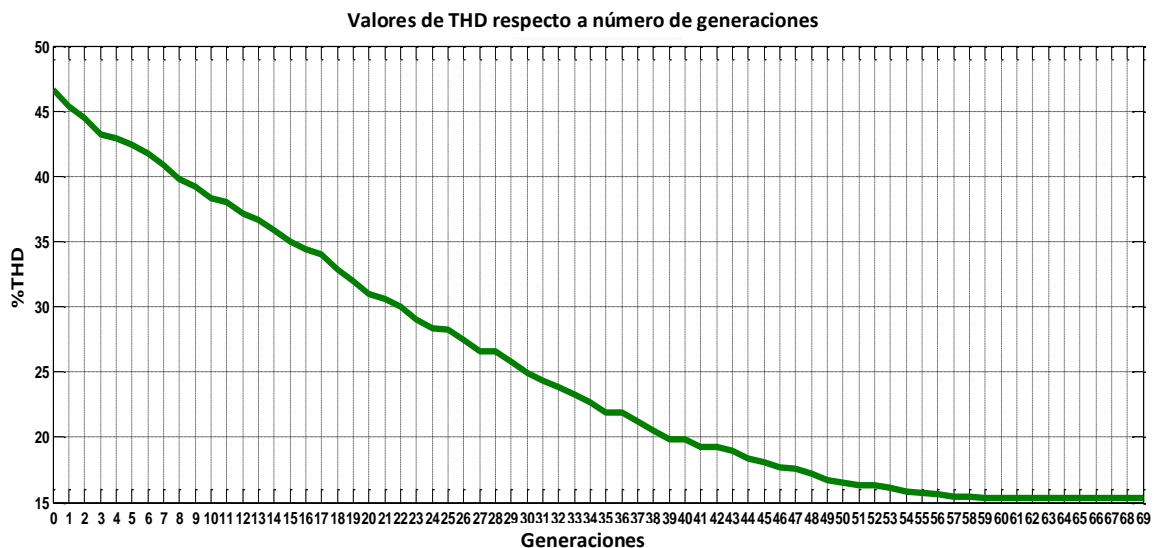


Figura 16. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en casca de 5 niveles con Taguchi-GA.

Para el inversor de 7 niveles, se observan las gráficas de efectos principales en la Figura 17, en esta situación, al examinar las representaciones gráficas de S/N, se distingue el factor A, que revela una tendencia casi horizontal, insinuando así su falta de sensibilidad. Por el contrario, los factores B, G y J se presentan con inclinaciones pronunciadas, lo que apunta hacia la posibilidad de ser más sensibles en comparación al resto de los demás factores.

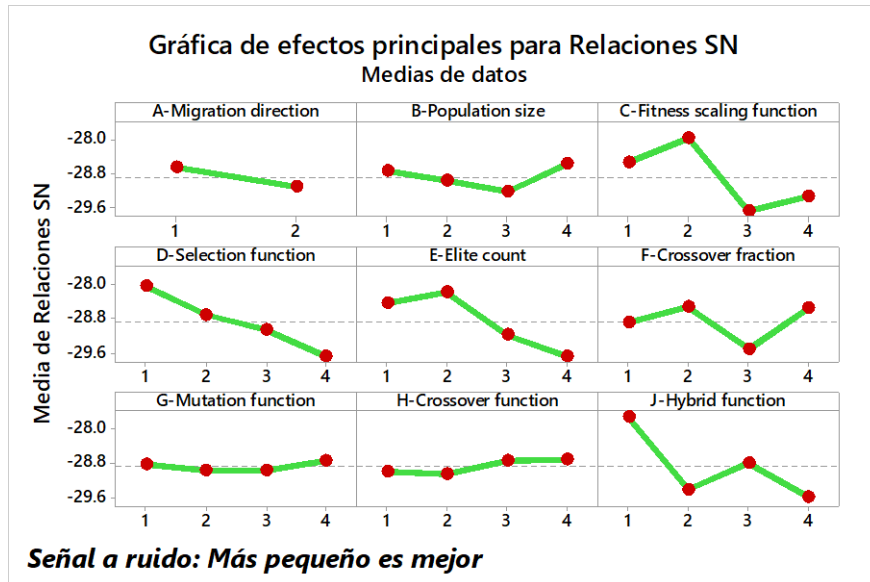


Figura 17. Gráfica de efectos principales de Relaciones S/N para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

Se destaca la posible sensibilidad de los factores J y C. Después se realizó una valoración más profunda con la Tabla 22 donde se muestra la clasificación independiente de los factores J y C separados del resto de los factores. Se identifica al factor J como el más sensible según la clasificación.

Tabla 22. Análisis de varianza para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido

Más pequeño es mejor

Nivel	C-Fitness scaling function	J-Hybrid function
1	-28.54	-27.70
2	-27.96	-29.41
3	-29.67	-28.80
4	-29.33	-29.59
Delta	1.71	1.88
Clasificar	2	1

Para este caso, se obtiene la configuración para cada factor que resultaría en una menor THD para la función objetivo se muestra en la Tabla 23. En última instancia se definen los siguientes niveles para cada factor:

- Migration direction: Both.
- Population size: 150.
- Fitness scaling function: Top.
- Selection function: Stochastic Uniform.

- Elite count: 15.
- Crossover fraction: 0.5.
- Mutation function: Adaptive feasible.
- Crossover function: Two point.
- Hybrid function: Fminunc.

Tabla 23. Configuración de los factores para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

Configuraciones

A-Migration direction	B-Population size	C-Fitness scaling function	D-Selection function	E-Elite count	F-Crossover fraction	G-Mutation function
1	4	2	1	2	2	1
H-Crossover function	J-Hybrid function					
4	1					

Se implementaron estos parámetros en la GA toolbox de Matlab y se obtiene que $\theta_1 = 8,692^\circ$, $\theta_2 = 27.896^\circ$ y $\theta_3 = 49.817$ con una THD de 10.432% y se obtiene una respuesta como en la Figura 18.

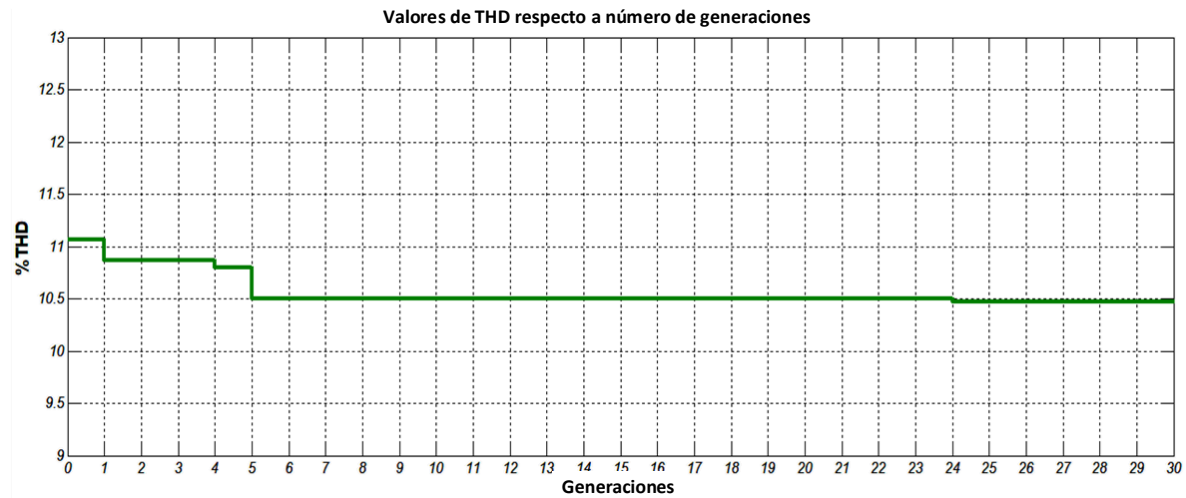


Figura 18. Gráfica de mejor resultado para el inversor puente H en cascada de 7 niveles con Taguchi-GA empleando Minitab.

En el análisis concluyente para ambas configuraciones de inversores, se observa que el factor A presenta la menor sensibilidad. Lo que sugiere que la manipulación de los niveles de este factor ejercería un efecto restringido en los resultados finales del sistema. De igual manera, se resalta que el factor J se posiciona como el de mayor influencia en ambos inversores. Esta observación insinúa que la alteración de dicho factor podría conllevar un impacto considerable en el sistema.

Capítulo

5. Resultados experimentales

5.1 Introducción de implementación

Se implementó en un inversor de tipo puente H disponible en el laboratorio, elaborado por el tesista de la Maestría en Ingeniería Electrónica Carlos Antonio Muñoz Malpica, utilizando semiconductores IGBTs STGW20NC60VD. Un módulo inversor de puente H diseñado, cuenta con características mostradas en la Tabla 24. El inversor fue replicado tres veces para formar inversores CHBMLI con configuraciones de cinco y siete niveles. Cada puente H en cascada donde el voltaje total de las fuentes de CD se establece como 180 V. En la configuración de cinco niveles, se emplearon dos fuentes de 90 V como entrada, mientras que para la de siete niveles se usaron tres fuentes de 60 V. La Figura 19 muestra la estructura del inversor de cinco niveles operando con una carga resistiva. Los ángulos de conmutación se programaron en el FPGA para DE y en un PIC (PIC16F877A) disponible en el laboratorio para GA, que controlan los puentes del inversor mediante los controladores ACPL3130. Finalmente, en la Tabla 24 se describen las características del inversor.

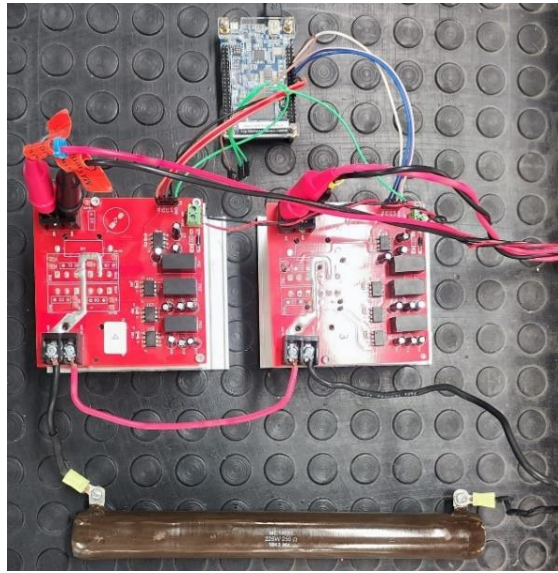


Figura 19 Configuración del laboratorio.

Tabla 24 Características de modulo inversor puente H.

Parámetro	Magnitud	Unidades
Voltaje de entrada máximo	180	V
Máxima corriente RMS de salida	20	A
Máximo pico de corriente	100	A
Máxima frecuencia de trabajo	16	<i>kHz</i>
Tipo de acoplamiento	Óptico	-
Voltaje de alimentación en impulsores	5 - 5.6	V
Voltaje mínimo etapa digital	3	V
Voltaje máximo etapa digital	5.7	V

El código VHDL genera un divisor de frecuencia, transformando la frecuencia original de 50 MHz del FPGA a un reloj cercano a la frecuencia deseada. Sin embargo, obtener exactamente 60 Hz a partir de 50 MHz no es posible mediante un divisor entero, por lo que la frecuencia resultante será una aproximación. Este reloj se usa como referencia para sincronizar las secuencias de salida, para que el inversor mantenga una frecuencia cercana a la correcta. Las señales se generan utilizando un contador que genera un ciclo de 360° , el cual es dividido en segmentos proporcionales al periodo total del ciclo de la señal, basándose en los ángulos de conmutación. Además, se incorporan breves periodos de no conducción, conocidos como tiempos muertos, para minimizar las transiciones bruscas entre los IGBT que podrían causar cortocircuitos. Los tiempos muertos deben ser pequeños, por lo que se ajustan a $3\mu s$ [121].

Partiendo del diagrama esquemático del inversor, se define los interruptores como “S” como se muestra en Figura 20, las secuencias de activación se muestran en la Tabla 25 para el inversor de 5 niveles y en la Tabla 26 para el inversor de 7 niveles.

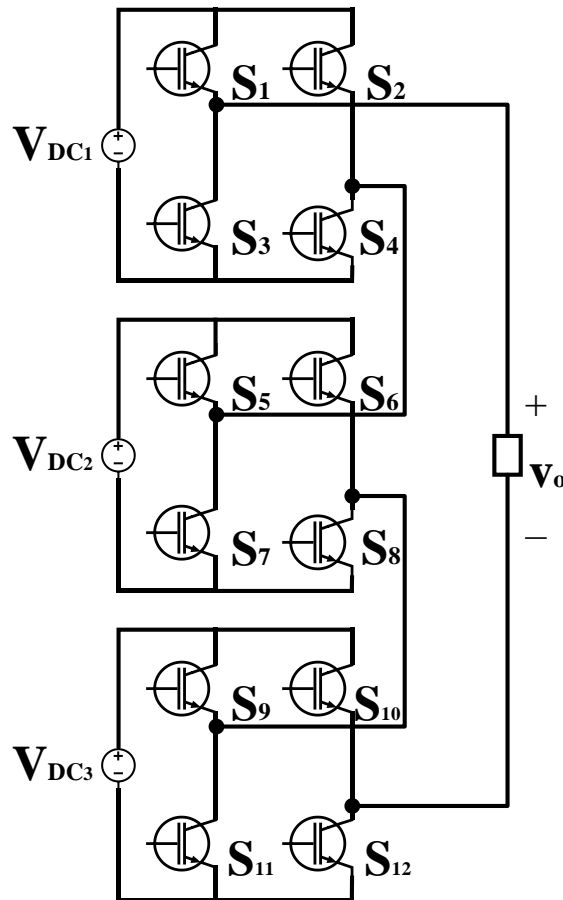


Figura 20 Diagrama esquemático del inversor multinivel CHBMLI de 7 niveles.

Para los tiempos muertos se parte de las tablas de verdad y se identifican las secciones donde un interruptor podría operar simultáneamente con otro interruptor, para asegurar el apagado de la secuencia para ambos diseños. En la Tabla 27 se muestran los intervalos de tiempo y las secuencias de los tiempos muertos para el inversor de 5 niveles, y en la Tabla 28 se

muestran los intervalos de tiempo y la secuencia de tiempos muertos para el inversor de 7 niveles. De esta forma se puede interpretar en el diseño VHDL que por ejemplo el primer intervalo para el inversor de 5 niveles será “11000011” y seguido del tiempo muerto “11000001”. Y por ejemplo para el inversor de 7 niveles el primer intervalo se interpreta “001100110011” seguido del tiempo muerto “001100110001” que se muestra en la Tabla 28.

Mediante el cálculo de la duración de un ciclo completo de la señal (16.66 ms y la aplicación de una escala proporcional basada en un ciclo completo de 360° se obtiene una serie de intervalos (t0 a t9), para ajustar los cambios de voltaje en cada segmento, posibilitando la creación de niveles de voltaje distintos para el inversor de cinco niveles como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 25 Combinaciones posibles para generar los niveles del inversor de 5 niveles.

V_o	Niveles							
	0	V_{DC}	$2V_{DC}$	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$-2V_{DC}$	$-V_{DC}$
S_1	1	1	1	0	0	0	0	1
S_2	1	0	0	0	0	1	1	1
S_3	0	0	0	1	1	1	1	0
S_4	0	1	1	1	1	0	0	0
S_5	0	0	1	1	1	1	0	0
S_6	0	0	0	0	1	1	1	1
S_7	1	1	0	0	0	0	1	1
S_8	1	1	1	1	0	0	0	0

Tabla 26 Combinaciones posibles para generar los niveles del inversor de 7 niveles.

V_o	Niveles											
	0	V_{DC}	$2V_{DC}$	$3V_{DC}$	$2V_{DC}$	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$-2V_{DC}$	$-3V_{DC}$	$-2V_{DC}$	$-V_{DC}$
S_1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
S_2	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
S_3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
S_4	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
S_5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
S_6	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
S_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
S_8	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
S_9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
S_{10}	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
S_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S_{12}	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 27 Combinaciones para generar los intervalos de tiempo del inversor de 5 niveles.

S_w	Intervalos																	
	T_1	bt_1	T_2	bt_2	T_3	bt_3	T_4	bt_4	T_5	bt_5	T_6	bt_6	T_7	bt_7	T_8	bt_8	T_9	
S_1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
S_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
S_3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
S_4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
S_5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
S_6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
S_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
S_8	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

Tabla 28 Combinaciones para generar los intervalos de tiempo del inversor de 7 niveles.

S_w	Intervalos																									
	T_1	bt_1	T_2	bt_2	T_3	bt_3	T_4	bt_4	T_5	bt_5	T_6	bt_6	T_7	bt_7	T_8	bt_8	T_9	bt_9	T_{10}	bt_{10}	T_{11}	bt_{11}	T_{12}	bt_{12}	T_{13}	
S_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
S_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
S_4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
S_6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
S_8	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
S_{10}	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S_{12}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Además, se asignan los intervalos de tiempo (t_0 a t_{13}) para generar los intervalos necesarios para el inversor de siete niveles, tal como se especifica en la Tabla 30.

Para adaptar estos intervalos de pulsos que el FPGA pueda gestionar, se determina la cantidad de pulsos por ciclo basándose en la frecuencia de 50 MHz del FPGA, obteniendo así 833333 pulsos por cada ciclo de 60 Hz. Los intervalos de los pulsos definidos en el código VHDL están formados de valores enteros, el cual el valor entero para cada intervalo se deduce de (21):

$$p_{tn} = t_n \left(\frac{p_c}{ciclo} \right) \quad (21)$$

Donde:

p_{tn} es el valor de pulsos en un intervalo n.

t_n es un intervalo de tiempo n.

p_c es el valor de pulsos que corresponde a un ciclo de 60Hz.

ciclo es el valor en milisegundos del ciclo de 60Hz de 16.66.

Tabla 29. Intervalos para el inversor de 5 niveles.

t0	0°
t1	A°
t2	B°
t3	180° - B°
t4	180° - A°
t5	180° + A°
t6	180° + B°
t7	360° - B°
t8	360° - A°
t9	360°

Los valores implementados en la FPGA se ajustaron ligeramente debido a los límites de resolución impuestos por la frecuencia de reloj de 50 MHz de la FPGA. Para generar el reloj de referencia de 60 Hz, la FPGA divide el reloj de 50 MHz, resultando en 833,333.33 pulsos por ciclo. Sin embargo, dado que VHDL no admite valores decimales, el conteo de pulsos se redondeó a 833,333 por lo que los valores de todos los ángulos involucrados cuentan con estos redondeos al entero más cercano para coincidir con el tiempo de pulsos de la FPGA.

La generación de las señales digitales se efectúa mediante el uso de multiplexores en cascada que seleccionan la salida requerida conforme al contador, que es regulado por el reloj principal del FPGA. Esto resulta en la obtención de los valores necesarios según el tiempo transcurrido del ciclo. La comparación de las señales digitales se realiza utilizando compuertas de comparación como se muestra en la Figura 21.

La onda que genera el FPGA, se caracteriza por transiciones fluidas entre los niveles mostrada en la Figura 22 además se observa que las señales son complementarias.

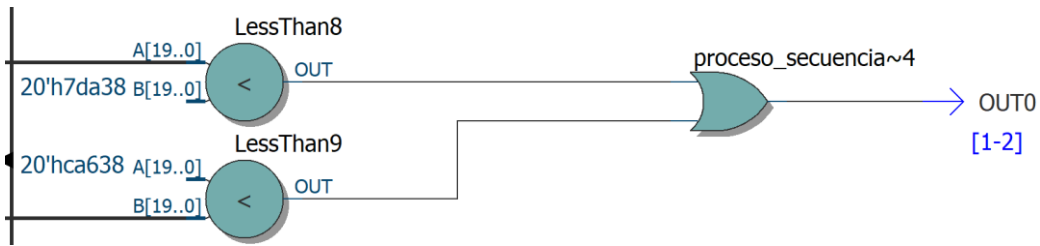


Figura 21 Diagrama de puertas de comparación.

Tabla 30. Intervalos para el inversor de 7 niveles.

t0	0°
t1	A°
t2	B°
t3	C°
t4	180° - C°
t5	180° - B°
t6	180° - A°
t7	180° + A°
t8	180° + B°
t9	180° + C°
t10	360° - C°
t11	360° - B°
t12	360° - A°
t13	360°

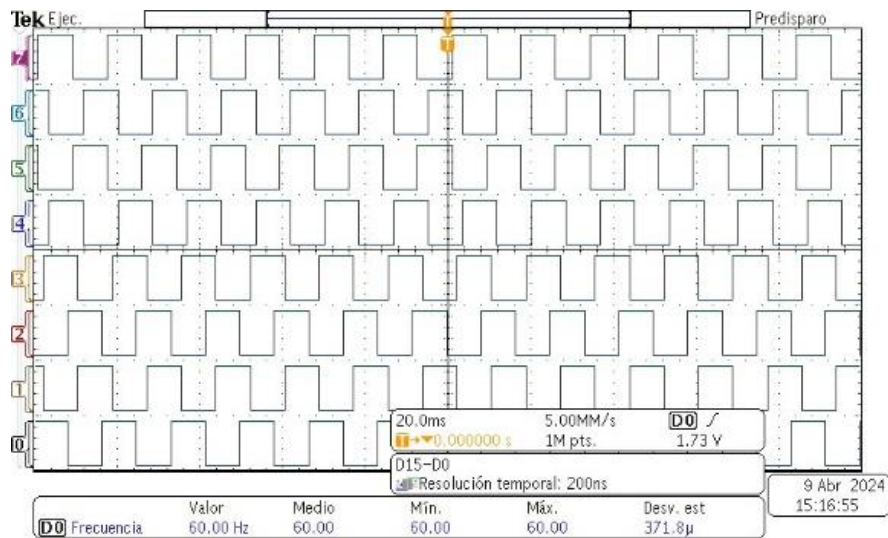


Figura 22 Señales de conmutación obtenidas en el FPGA para el inversor de 5 niveles.

5.2 Resultados con Taguchi-DE

Se emplean los ángulos obtenidos con la metodología de Taguchi-DE en el inversor disponible en el laboratorio, suministrado con fuentes de voltaje TOELLNER 8951 y

Tektronix PWS4602. Los resultados para el inversor CHBMLI de 5 niveles ilustrado en la Figura 23, se muestra la medición de voltaje con el osciloscopio Tektronix MDO3024, se tiene 5 niveles de voltaje y un nivel máximo de 180V. En la Figura 24 se muestra la medición de la THD con un medidor de calidad de energía Fluke 435, se tiene predominantemente el componente fundamental y componentes pequeñas hasta el armónico 49 obteniendo una THD de 15.3%.

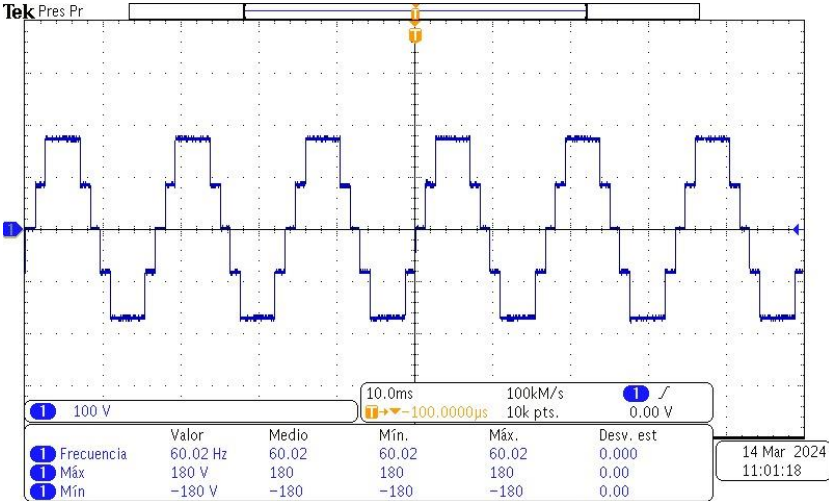


Figura 23 Lectura en osciloscopio para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE.

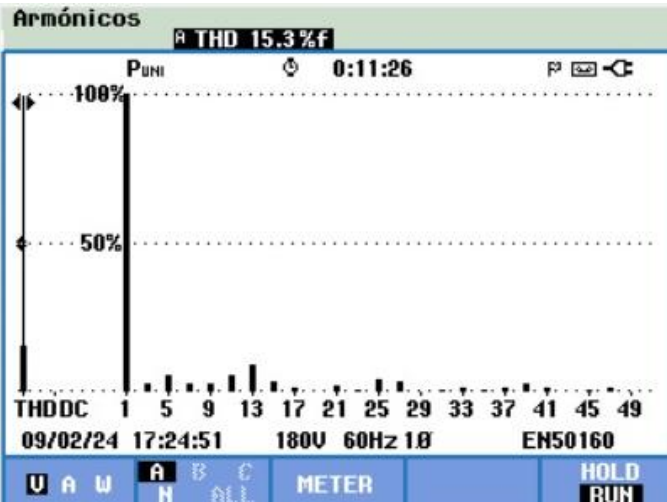


Figura 24 Lectura en el FLUKE 435 - II para el inversor de 5 niveles con Taguchi-DE.

Y para el inversor CHBMLI de 7 niveles se obtiene la medición mostrada en la Figura 25, en el que se observan los 7 niveles de voltaje con un voltaje máximo de 180V. en la Figura 26 se muestra la medición de THD, se tiene la medición de 10.4%.

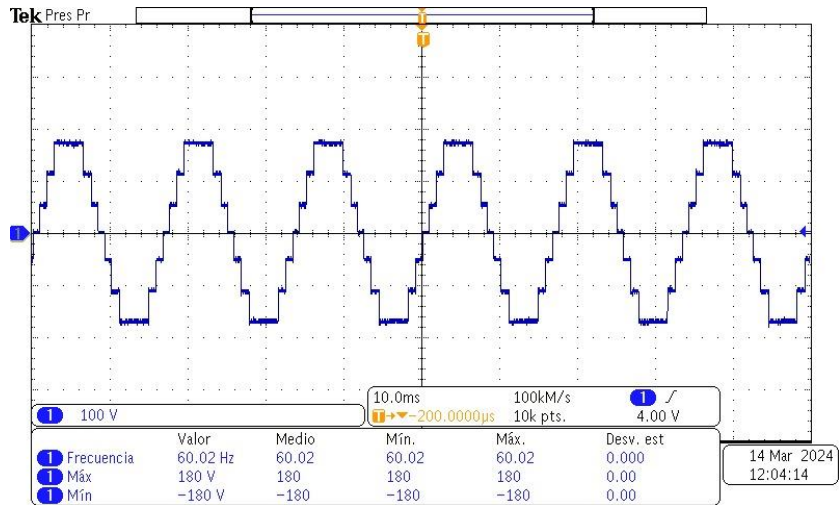


Figura 25 Lectura en osciloscopio para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE.

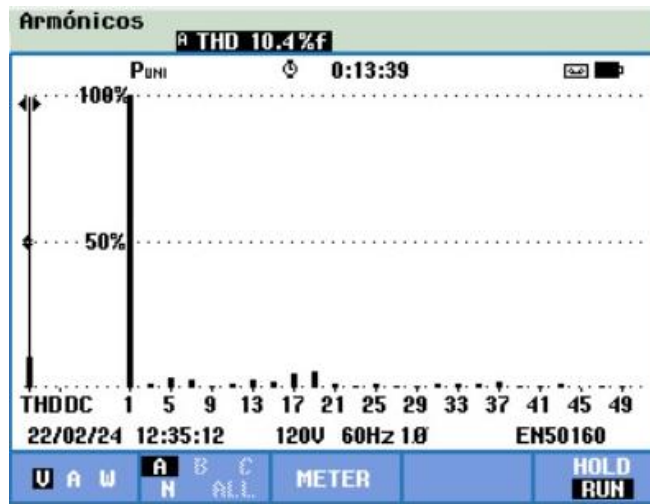


Figura 26 Lectura en el FLUKE 435 - II para el inversor de 7 niveles con Taguchi-DE.

5.3 Resultados con Taguchi-GA

Los ángulos obtenidos con la metodología de Taguchi-GA para el inversor de 5 niveles, se implementan en el inversor disponible en el laboratorio y se obtiene el voltaje de salida para el inversor de 5 niveles como se muestran en la Figura 27.

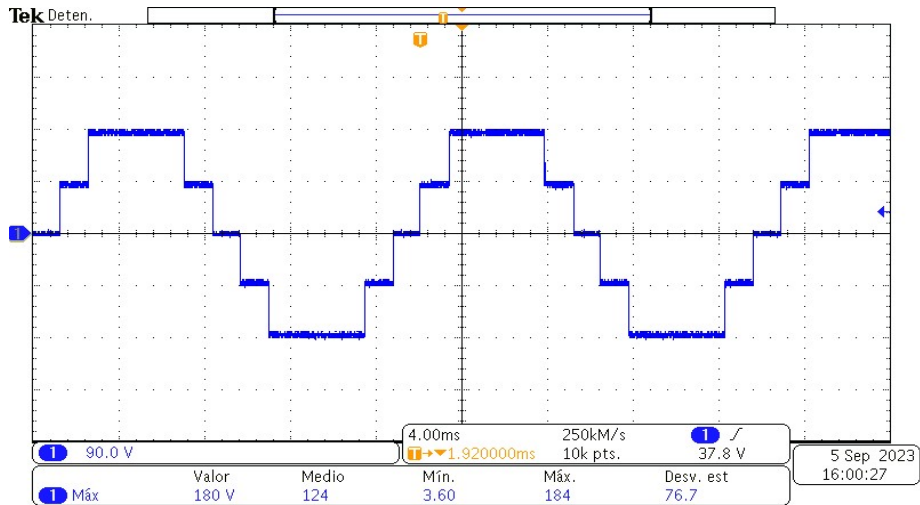


Figura 27 Lectura en osciloscopio para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA.

Y en la Figura 28, se muestra el valor obtenido de la THD para el inversor de 5 niveles con un valor de THD de 15.3%.

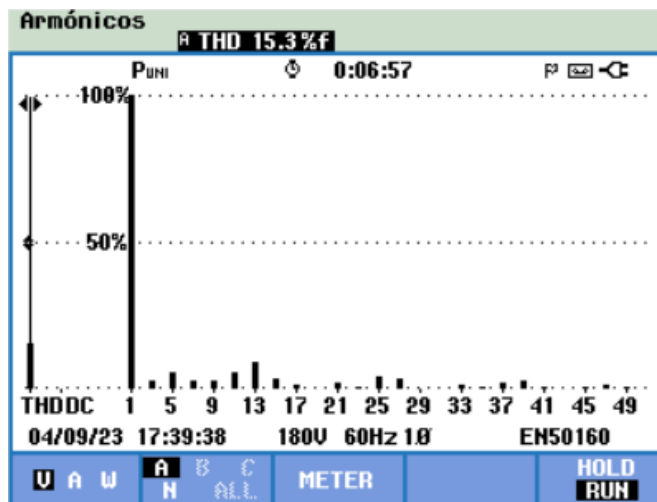


Figura 28 Lectura en el FLUKE - II para el inversor de 5 niveles con Taguchi-GA.

En la Figura 29, se ilustran los resultados obtenidos para el inversor de 7 niveles.

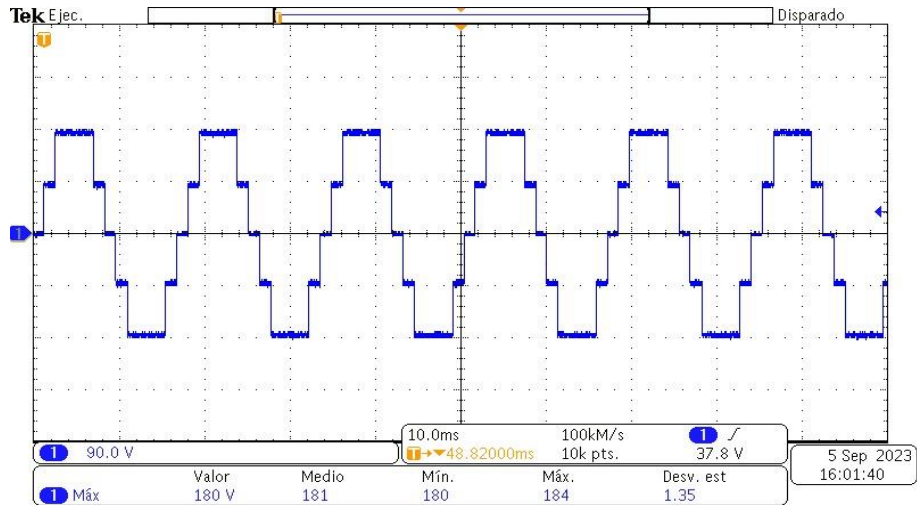


Figura 29 Lectura en osciloscopio para el inversor de 7 niveles con Taguchi-GA

Finalmente, en la Figura 30 se obtiene la medición de la THD, indicando un valor de 10.3%.

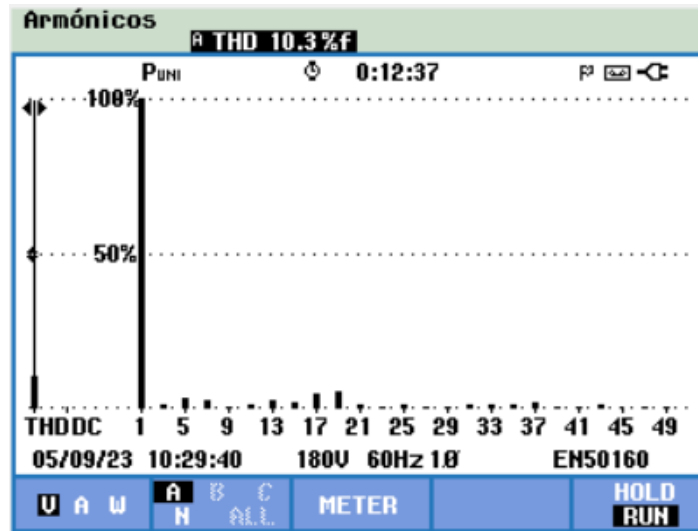


Figura 30 Lectura en el FLUKE 435 - II para el inversor de 7 niveles.

Capítulo

6. Conclusiones y trabajos a futuros.

6.1 Conclusiones

Siendo que los parámetros que rigen a las metaheurísticas se basan en la elección de la opinión humana acompañada con la experiencia, la garantía de la autenticidad de los resultados experimentales no es sencilla ya que diversas opiniones podrían obtener resultados opuestos.

En el método Taguchi se utiliza un enfoque sistemático y estructurado para diseñar experimentos que permiten evaluar la influencia de cada factor individual en la calidad del producto o proceso. Los resultados obtenidos en los experimentos recientes han permitido identificar los valores óptimos de los factores de entrada, lo cual ha abierto nuevas posibilidades para mejorar el diseño y reducir la variabilidad asociada a la THD de un inversor CHMLI de 5 y 7 niveles.

Cuando se emplean metaheurísticas es necesario contar con cierto nivel de experiencia para poder configurarlo de manera óptima. Este proceso implica una fase de ajuste que se basa en la iteración y la experimentación, lo cual demanda una inversión considerable de tiempo para alcanzar la validación deseada. A pesar de llevar a cabo numerosas pruebas, no existe una garantía absoluta de haber alcanzado el mejor resultado experimental, y tampoco es factible justificar plenamente la selección realizada por parte del experimentador. Por ello es importante destacar que con la aplicación del método Taguchi se puede justificar los valores de los parámetros de GA y DE.

La Tabla 31 muestra la comparativa de los hallazgos encontrados para ambos enfoques de metaheurísticas aplicando el método Taguchi.

Se concluye que el enfoque con mejores resultados es el algoritmo GA y en el caso del algoritmo DE para el inversor de 5 niveles, se tienen valores iguales. Sin embargo, en el inversor de 7 niveles se muestra una diferencia de 1% entre ambos enfoques, reconociendo así que el algoritmo GA es la metaheurística con mejores resultados aplicando el método Taguchi.

Tabla 31 Comparación de resultados finales obtenidos con el método Taguchi

Método	CHBMLI	Ángulo 1 (θ_1)	Ángulo 2 (θ_2)	Ángulo 3 (θ_3)	THD (%)
Taguchi-GA	CHBMLI 5LVL	13.406°	41.915°	-	15.3
Taguchi-DE	CHBMLI 5LVL	13.408°	41.915°	-	15.3
Taguchi-GA	CHBMLI 7LVL	8.692°	27.906°	49.817°	10.3
Taguchi-DE	CHBMLI 7LVL	8.693°	27.896°	49.816°	10.4

También se concluye que el algoritmo GA resulta más difícil de implementar por la gran variedad de parámetros y configuraciones con los que cuenta a diferencia de DE que depende de las variables que se necesiten solucionar de la función objetivo.

6.2 Trabajos a Futuro

Para asegurar una mejor THD, se puede estudiar la implementación de filtros que mejoren las configuraciones de los inversores de 5 y 7 niveles. Sin embargo, dado que la modulación opera a baja frecuencia, los componentes requeridos para este filtro podrían ser de dimensiones y costos elevados. Una alternativa sería incrementar los niveles del inversor CHBMLI para simplificar las demandas del filtro y, a su vez, reducir los costos asociados con su gestión.

Al aumentar el número de interruptores en el inversor, se mejora el rendimiento de salida, se reducen los armónicos y las interferencias electromagnéticas. No obstante, esta mejora viene acompañada de pérdidas por conmutación, altos costos y un mayor tamaño físico del dispositivo. Una posible solución a estos problemas es reducir el número de interruptores. Trabajando con menos dispositivos de conmutación, se podría lograr un rendimiento optimizado en el futuro. Por ejemplo, se puede implementar módulos de puente H que reduzcan la cantidad de interruptores operativos en el inversor. Se propone un módulo de puente H con 7 interruptores capaz de generar 7 niveles de voltaje, optimizando así la eficiencia del inversor. Otra posibilidad es hacer que ahora el inversor multinivel de este presente trabajo opere con fuentes asimétricas, conservando el mismo diseño de puente H.

6.3 Productos académicos

Se realizó un artículo que presenta una implementación con el método Taguchi en conjunto con Algoritmos Genéticos para optimizar los ángulos de conmutación en inversores de 5 y 7 niveles CHBMLI. Se utilizó MATLAB para la implementación de los algoritmos. Los resultados obtenidos se implementaron en un inversor disponible en el laboratorio.

Los resultados demuestran una reducción en la THD, validando la eficacia de la metodología propuesta.

Lopez, A. R., Sosa, J. M., Sámano, C., De León-Aldaco, S. E., Aguayo-Alquicira, J., & López-Santos, O. (2023). Optimization of the Voltage Total Harmonic Distortion in Multilevel Inverters by Using the Taguchi Method. *Machines*, 12(1), 7.

Referencias

- [1] E. Kabalcı, *Multilevel Inverters: Introduction and Emergent Topologies*, Academic Press. Elsevier, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-821668-2.09991-8.
- [2] J. R. Espinoza, “Inverters,” in *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications, Third Edition*, Elsevier, 2011, pp. 357–408. doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00015-X.
- [3] N. A. Jefry, L. Kah Haw, and W. K. Ing, “The New Topology of Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches.,” *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2020 - Proceedings*, pp. 94–99, Aug. 2020, doi: 10.1109/ICSGRC49013.2020.9232502.
- [4] A. Muthuramalingam and M. , & H. S. Balaji, “Selective harmonic elimination modulation method for multilevel inverters.,” *India International Conference on Power Electronics*, pp. 40–45, 2006.
- [5] S. D. Patil and S. G. Kadwane, “Application of optimization technique in SHE controlled multilevel inverter.,” *international conference on energy, communication, data analytics and soft computing (ICECDS) IEEE*, pp. 26–30, 2017.
- [6] A. R. L. Núñez, J. D. M. Antonio, J. A. Alquicira, and G. C. Zavala, “Núñez, A. R. L., Antonio, J. D. M., Alquicira, J. A., & Zavala, G. C. (2018). Estado del arte de las soluciones a perturbaciones armónicas en generadores eolieléctricos interconectados a la red basados en un generador doblemente alimentado.,” *Pistas Educativas*, vol. 35, no. 108, 2018.
- [7] S. E. De León-Aldaco, H. Calleja, and J. Aguayo. Alquicira, “Metaheuristic optimization methods applied to power converters: A review,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 12, pp. 6791–6803, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2397311.
- [8] M. Marin Reyes, “Estudio de los métodos de optimización en el convertidor multinivel en cascada monofásico.,” Tesis, cenidet, 2019.
- [9] M. Marín-Reyes, J. Aguayo-Alquicira, and S. E. De León-Aldaco, “Calculation of Optimal Switching Angles for a Multilevel Inverter Using NR, PSO, and GA- a Comparison,” *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 22, no. 4–5, pp. 349–355, Oct. 2020, doi: 10.18280/ejee.224-506.
- [10] Y. Sahali and M. Fellah, “Selective harmonic eliminated pulse-width modulation technique (SHE PWM) applied to three-level inverter/converter.,” *In IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 1112–1117, 2003.
- [11] C. K. Duffey and R. P. Stratford, “Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems.,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 25, no. 6, pp. 1025–1034, 1989.

- [12] H. Abedinpourshotorban, S. M. Shamsuddin, Z. Beheshti, and D. N. Jawawi, "Electromagnetic field optimization: a physics-inspired metaheuristic optimization algorithm," *Swarm Evol Comput*, vol. 26, pp. 8–22, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.swevo.2015.07.002.
- [13] M. Abdel-Basset, L. Abdel-Fatah, and A. K. Sangaiah, "Metaheuristic algorithms: A comprehensive review," in *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, Elsevier, 2018, pp. 185–231. doi: 10.1016/B978-0-12-813314-9.00010-4.
- [14] L. Bianchi, M. Dorigo, L. M. Gambardella, and W. J. Gutjahr, "A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization," *Nat Comput*, vol. 8, pp. 239–287, 2009, doi: 10.1007/s11047-008-9098-4.
- [15] S. K. Karna and R. Sahai, "An overview on Taguchi method," *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2012, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/265282800>
- [16] A. Suresh, A. Mittal, J. Lakwal, and D. M. Deshpande, "MATLAB Simulation of Single Phase Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems," In *ICGSEE-2013 (International Conference on Global Scenario in Environment and Energy Ca)*, 14th–16th March, vol. 2013, 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/278023823>
- [17] R. H. Baker and L. H. Bannister, "Electric power converter," Patent 3 867 643, Feb. 1975
- [18] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," *IEEE Trans Ind Appl*, no. 5, pp. 518–523, 1981.
- [19] K. K. Gupta, A. Ranjan, P. Bhatnagar, L. K. Sahu, and S. Jain, "Multilevel inverter topologies with reduced device count: A review," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 1, pp. 135–151, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2405012.
- [20] A. El-Hosainy, H. A. Hamed, H. Z. Azazi, and E. E. El-Kholy, "A review of multilevel inverter topologies, control techniques, and applications," In *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE., p. 12651275, 2017.
- [21] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. John wiley & sons., 2003.
- [22] J. Rodríguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
- [23] H. H. Hamzah, A. Ponniran, A. N. Kasiran, M. A. Harimon, D. A. Gendum, and M. H. Yatim, "A single phase 7-level cascade inverter topology with reduced number of

switches on resistive load by using PWM.,” *In Journal of Physics: Conference Series*, vol. 995, no. 1, Apr. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/995/1/012061.

- [24] V. Yadhati, “A comparative study of capacitor voltage balancing techniques for flying capacitor multi-level power electronic converters.,” Thesis, MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2010. [Online]. Available: https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/4790
- [25] J. Rodríguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
- [26] N. Celanovic, “SPACE VECTOR MODULATION AND CONTROL OF MULTILEVEL CONVERTERS,” Ph. D. Dissertation, CPES-Virginia Polytechnic Institute & State University, 2000.
- [27] B.-S. Suh and D.-S. Hyun, “A new N-level high voltage inversion system.,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 107–115, 1997.
- [28] X. Yuan and Ivo. Barbi, “Fundamentals of a New Diode Clamping Multilevel Inverter,” *Yuan, X., & Barbi, I. (2000). Fundamentals of a new diode clamping multilevel inverter. IEEE Transactions on power electronics*, vol. 15, no. 4, pp. 711–718, 2000.
- [29] Y. Shakweh and E. A. Lewis, “Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drive applications.,” *In 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record.(Cat. No. 99CH36321)* , vol. 2, pp. 965–971, 1999.
- [30] M. D. Manjrekar, P. K. Steimer, and T. A. Lipo, “Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications.,” *IEEE transactions on industry applications*, vol. 36, no. 3, pp. 834–841, 2000.
- [31] S. Alepuz Menéndez, “Aportación al Control del Convertidor CC/CA de Tres Niveles,” Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [32] S. Wei, B. Wu, F. Li, and X. Sun, “Control method for cascaded H-bridge multilevel inverter with faulty power cells.,” *In Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 261–267, 2003.
- [33] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo, and O. Duque-Perez, “A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems,” Oct. 02, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/en14206467.
- [34] Eugenio Téllez Ramírez, “Distorsión armónica.,” *Autom. Product. Y Calid. SaCV. Handbook*, no. 222, pp. 1–31, 2008.

- [35] J. A. Suarez, G. F. Di Mauro, D. Anaut, and C. Agüero, “Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 3, no. 5, pp. 429–435, 2005.
- [36] C. O. Salas, “Estudio comparativo de simulación 2D y 3D de la refrigeración de transformadores de potencia mediante dinámica computacional,” Tesis, 2014.
- [37] K. Y. Gomez Diaz, “Reducción de contenido armónico en un Inversor Multinivel utilizando el algoritmo de optimización basado en enseñanza aprendizaje,” Tesis, cenidet, 2023. Accessed: Oct. 01, 2023. [Online]. Available: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5372>
- [38] H. A. Perusquia and J. R. Sanchez, “Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en sistemas eléctricos,” Tesis, Instituto Politecnico Nacional., Mexico DF., 2010.
- [39] L.-I. Tong, C.-T. Su, and C.-H. Wang, “The optimization of multi-response problems in the Taguchi method,” *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 14, no. 4, pp. 367–380, 1997.
- [40] Y. A. Báez López, “Optimización de la prueba de jalón utilizando la metodología Taguchi y eliminación del defecto por coplanaridad en la línea prisma I,” thesis.
- [41] T. V. Catota Veloz and E. S. ambrano Bravo, “Análisis de las propiedades mecánicas de la junta soldada de un acero estructural (A588) con el proceso GMAW mediante la implementación del método de Taguchi,” Bachelor’s thesis, Quito., 2020.
- [42] N. Masmiati and A. A. Sarhan, “Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress—Taguchi approach,” *Measurement*, vol. 60, pp. 267–275, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2014.10.002.
- [43] Z. Du, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, and J. N. Chiasson, “Fundamental frequency switching strategies of a seven-level hybrid cascaded H-bridge multilevel inverter,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 24, no. 1, pp. 25–33, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2006678.
- [44] A. R. Lopez *et al.*, “Optimal Switching Angles Calculation for a Multilevel Inverter Through the ABC Algorithm,” In *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, vol. 6, pp. 1–5, 2022.
- [45] H. S. Patel and R. G. Hoft, “Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I--Harmonic Elimination.,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 9, no. 3, pp. 310–317, 1973.
- [46] H. S. Patel and R. G. Hoft, “Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: part II---voltage control techniques,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 10, no. 5, pp. 666–673, 1974.

- [47] A. R. Lopez, C. J. Cortés, C. A. Limones-Pozos, J. M. Sosa, J. Aguayo, and S. D. L. Aldaco, "Optimal Switching Angles Calculation for a Multilevel Inverter through the SHE Method and the PSO Algorithm, a comparison.," *In IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, vol. 4, pp. 1–6, 2020.
- [48] Y. Sahali and M. Fellah, "New Approach for the Symmetrical Multilevel Inverters Control: Optimal Minimization of the Total Harmonic Distorsion (OMTHD technique)," *International Symposium on Industrial Electronics IEEE-ISIEi04, Ajaccio, France*, pp. 4–7, 2004, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/26488467>
- [49] Y. Sahali and M. Fellah, "Optimal Minimization of the Total Harmonic Distortion (OMTHD) technique for the Symmetrical Multilevel Inverters Control," *First National Conference on Electrical Engineering and its Applications CNEAi04, Sidi-Bel-Abbes*, 2004, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/26488467>
- [50] Y. Sahali and M. Fellah, "ModÈlisation et Simulation des Onduleurs Multiniveaux de Tension.," Master Thesis of the Djillali-Liabes University, SidiBelAbbes, Algeria, 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/26488467>
- [51] N. Torres Cruz, M. Antonio Oliver Salazar, and J. Aguayo Alquicira, "Algoritmo de Búsqueda Aleatoria (ABA) Aplicado en Estrategia de Modulación por Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE) para Inversores Multinivel.," *Congreso Nacional de Control Automático*, pp. 435–440, 2015.
- [52] B. Alamri, A. Sallama, and M. Darwish, "Optimum SHE for cascaded H-bridge multilevel inverters using: NR-GA-PSO, comparative study.," *In 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, pp. 1–10, 2015.
- [53] S. E. De Leon-Aldaco, H. Calleja, and J. Aguayo Alquicira, "Metaheuristic optimization methods applied to power converters: A review.," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 12, pp. 6791–6803, Dec. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2397311.
- [54] N. Yousefpoor, S. H. Fathi, N. Farokhnia, and H. A. Abyaneh, "THD minimization applied directly on the line-to-line voltage of multilevel inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 373–380, Jan. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2143373.
- [55] J. Ronkkonen, S. Kukkonen, and K. V Price, "Real-Parameter Optimization with Differential Evolution," *IEEE*, vol. 1, no. In 2005 IEEE congress on evolutionary computation., pp. 506–513, 2005, [Online]. Available: <http://www.ntu.edu.sg/home/epnsugan>
- [56] J. A. Hernaiz Navas, "Optimizacion de un controlador fuzzy mediante differential evolution (Bachelor's thesis)," 2014.

- [57] O. Sanchez Vargas, “Cálculo de los Angulos de Conmutación para un Convertidor Multinivel en Cascada Utilizando el Algoritmo de Evolución Diferencial.,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2022. Accessed: Oct. 01, 2023. [Online]. Available: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2991>
- [58] J. Fernández Martín, J. María, P. Sánchez, and A. Latorre De La Fuente, “Extensión del Algoritmo Evolutivo MOS con técnicas de Evolución Diferencial,” 2008.
- [59] B. Hegerty, C.-C. Hung, and K. Kasprak, “A comparative study on differential evolution and genetic algorithms for some combinatorial problems.,” vol. 9, no. In Proceedings of 8th Mexican international conference on artificial intelligence, pp. 9–13, 2009.
- [60] R. Thangaraj, M. Pant, and A. Abraham, “A simple adaptive differential evolution algorithm,” *IEEE*, no. In 2009 world congress on nature & biologically inspired computing (nabic), pp. 457–462, 2009, doi: 10.1109/NABIC.2009.5393350.
- [61] A. E. Eiben and T. Bäck, “Empirical investigation of multiparent recombination operators in evolution strategies.,” *Evol Comput*, vol. 5, no. 3, pp. 347–365, 1997.
- [62] D. H. Wolpert and W. G. Macready, “No free lunch theorems for search (Vol. 10).,” 1995.
- [63] S. V. Pawar and S. Morteza, “Harmonic Elimination in Cascade Multilevel Inverter with Non Equal Dc Sources Using Genetic and Differential Evolution Algorithm.,” *IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 2, pp. 144–150, 2015, [Online]. Available: www.ijiset.com
- [64] E. Deniz, O. Aydogmus, and Z. Aydogmus, “GA-based optimization and ANN-based SHEPWM generation for two-level inverter.,” *In IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 738–744, 2015.
- [65] S. Sudha Letha, T. Thakur, and J. Kumar, “Harmonic elimination in a solar powered cascaded multilevel inverter using genetic algorithm and differential evolution optimization techniques.,” *In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 57441, no. American Society of Mechanical Engineers., Art. no. V06BT07A048, 2015, [Online]. Available: <http://www.asme.org/abo>
- [66] F. Chabni, R. Taleb, M. G. Cimoroni, and C. Buccella, “Selective harmonic elimination procedure for uniform step asymmetrical 7-level CHB inverter.,” *5th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA).IEEE*, pp. 1–6, 2018.
- [67] A. Chatterjee, A. Rastogi, R. Rastogi, A. Saini, and A. K. Saini, “Selective harmonic elimination of cascaded H-bridge multilevel inverter using genetic algorithm.,” *In Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). IEEE*, pp. 1–4, 2017.

- [68] G. J. A. Araque, R. J. L. Díaz, and Gualdrón G.O.E., “The optimization of a single phase multilevel inverter using genetic algorithms,” *Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA Proceedings*, vol. 1, pp. 60–66, 2013, doi: 10.1109/PEPQA.2013.6614944.
- [69] V. B. R and P. S. Puttaswamy, “Selective Harmonic Elimination: A Comparative Analysis for Three-Phase Cascaded H-bridge Nine-Level Inverter.,” *Original Research Paper International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering IJISAE*, vol. 12, no. 16s, pp. 624–632, 2024, [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-2722-9775>
- [70] A. A. Stonier, G. Chinnaraj, R. Kannan, and G. Mani, “Investigation and validation of an eleven level symmetric modular multilevel inverter using grey wolf optimization and differential evolution control algorithm for solar PV applications.,” *Circuit World*, vol. 47, no. 1, pp. 117–127, Jan. 2020, doi: 10.1108/CW-12-2019-0197.
- [71] Georgios. Papazoglou and Pandelis. Biskas, “Review and Comparison of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization in the Optimal Power Flow Problem,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, p. 1152, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031152.
- [72] R. Sowmya, M. Premkumar, and P. Jangir, “Newton-Raphson-based optimizer: A new population-based metaheuristic algorithm for continuous optimization problems.,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 128, no. 107532, 2024.
- [73] C. L. B. Silveira, A. Tabares, L. T. Faria, and J. F. Franco, “Mathematical optimization versus Metaheuristic techniques: A performance comparison for reconfiguration of distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 196, no. 107272, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107272.
- [74] M. Abdel-Basset, R. Mohamed, I. M. Hezam, K. M. Sallam, and I. A. Hameed, “Parameters identification of photovoltaic models using Lambert W-function and Newton-Raphson method collaborated with AI-based optimization techniques: A comparative study.,” *Expert Syst Appl*, vol. 255, no. 124777, 2024.
- [75] Y. H. Chang, C. H. Chu, and H. W. Lin, “Improvement in Laptop Heat Dissipation with Taguchi Method,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 5, p. 882, Mar. 2024, doi: 10.3390/electronics13050882.
- [76] J. K. Sao, G. Panda, P. K. Ray, R. D. Patidar, and S. D. Swain, “Parameter optimization of PV integrated Shunt Active power filter with Taguchi SNR.,” *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 377–387, 2023.
- [77] R. Boukenoui, R. Bradai, and A. Kheldoun, “A Taguchi method-based optimization algorithm for the analysis of the wind driven-self-excited induction generator,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 769–783, Jun. 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i2.pp769-783.

- [78] Y. Mao and Y. Yang, “Optimization of Magnetic Gear Patterns Based on Taguchi Method Combined with Genetic Algorithm,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 14, p. 4963, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15144963.
- [79] T. Tetzlaff *et al.*, “Metaheurísticas, búsqueda estocástica y cómputo eficiente en optimización aplicada,” *In XXIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2021, Chilecito, La Rioja).*, 2021.
- [80] M. Gendreau and J. Y. Potvin, *Handbook of metaheuristics*, vol. 3. 2019. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/6161>
- [81] J. Xu and J. Zhang, “Exploration-exploitation tradeoffs in metaheuristics: Survey and analysis,” *In Proceedings of the 33rd Chinese control conference. IEEE.*, pp. 8633–8638, 2014.
- [82] B. Toaza and D. Esztergár-Kiss, “A review of metaheuristic algorithms for solving TSP-based scheduling optimization problems.,” *Appl Soft Comput*, vol. 148, no. 110908., Nov. 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2023.110908.
- [83] E. Herrera, “Desarrollo del pensamiento estocástico.,” 2004.
- [84] J. C. Spall, *Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control*. John Wiley & Sons., 2005.
- [85] R. H. Torres *et al.*, “Comparación de diferentes algoritmos metaheurísticos en la estimación de parámetros del modelo relacional general de cromatografía líquida en columna.,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 22, no. 1, pp. 14–25, 2014, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77229676003>
- [86] M. Mythili and N. Kayalvizhi, “THD minimization in single phase symmetrical cascaded multilevel inverter using programmed PWM technique.,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 11, pp. 1567–1572, 2013, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [87] Y. Ç. Kuyu and F. Vatansever, “Advanced metaheuristic algorithms on solving multimodal functions: Experimental analyses and performance evaluations.,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 7, pp. 4861–4873, 2021.
- [88] I. Boussaïd, J. Lepagnot, and P. Siarry, “A survey on optimization metaheuristics.,” *Inf Sci (N Y)*, vol. 237, pp. 82–117, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.ins.2013.02.041.
- [89] C. Blum and A. Roli, “Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison.,” *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 35, no. 3, pp. 268–308, 2003, doi: 10.1145/937503.937505.
- [90] B. A. Garro, H. Sossa, and R. A. Vazquez, “Diseño automático de redes neuronales artificiales mediante el uso del algoritmo de evolución diferencial (ED).,” vol. Polibits, no. 46, pp. 13–27, 2012.

- [91] C. Darwin, Bynum, and W. F., *The origin of species by means of natural selection: or, the preservation of favored races in the struggle for life*. New York: AL Burt, 2009. [Online]. Available: www.gutenberg.org
- [92] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [93] T. Bäck and H. P. Schwefel, “An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization,” *Evol Comput*, vol. 1, no. 1, pp. 1–23, 1993.
- [94] A. K. Qin, V. L. Huang, and P. N. Suganthan, “Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 2, pp. 398–417, 2008, doi: 10.1109/TEVC.2008.927706.
- [95] I. Triguero, J. Derrac, S. García, and F. Herrera, “Evolución Diferencial para Reducción de Prototipos y Ponderación de Características,” 2012.
- [96] J. Brest, V. Viljemžumer, and M. S. Maučec, “Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm in Constrained Real-Parameter Optimization,” *IEEE*, no. In 2006 IEEE international conference on evolutionary computation, pp. 215–222, 2006, doi: 10.1109/CEC.2006.1688311.
- [97] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization.,” *In Proceedings of ICNN’95-international conference on neural networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [98] A. Hassanat, K. Almohammadi, E. A. Alkafaween, E. Abunawas, A. Hammouri, and V. S. Prasath, “Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms—a review with a new dynamic approach.,” *Information*, vol. 10, no. 12, p. 390, Dec. 2019, doi: 10.3390/info10120390.
- [99] A. Shukla, H. M. Pandey, and D. Mehrotra, “Comparative review of selection techniques in genetic algorithm.,” *In international conference on futuristic trends on computational analysis and knowledge management (ABLAZE). IEEE.*, pp. 515–519, 2015.
- [100] M. Lovay, G. Peretti, and E. Romero, “Aplicación del algoritmo Evolución Diferencial en un método de dimensionamiento para filtros bicuadráticos.,” no. In VI Simposio Argentino de Informática Industrial (SII)-JAIIO 46 (Córdoba, 2017)., pp. 222–233, 2017.
- [101] J. D. Ospina Arango, “Estimación de un modelo de difusión con saltos con distribución de error generalizada asimétrica usando algoritmos evolutivos (Doctoral dissertation),” 2009.

- [102] R. Storn and K. Price, “Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces,” *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997, doi: 10.1023/A:1008202821328.
- [103] M. B. Larumbe, “Aplicación de un algoritmo evolutivo diferencial multiobjetivo para el diseño de un absorbedor de energía de las olas,” 2013. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/2454/8929>
- [104] R. K. Roy, *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons, 2001.
- [105] T. Mori, *Taguchi methods: benefits, impacts, mathematics, statistics, and applications*, ASME Press. 2011. [Online]. Available: www.asme.org
- [106] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [107] E. A. C. Trejos, P. D. M. Varela, and C. A. S. Diaz, “Una revisión crítica de la razón señal ruido usada por Taguchi,” *Scientia et technica*, vol. 2, no. 50, pp. 52–56, 2012.
- [108] T. V. Catota Veloz and E. S. Zambrano Bravo, “Análisis de las propiedades mecánicas de la junta soldada de un acero estructural (A588) con el proceso GMAW mediante la implementación del método de Taguchi,” Bachelor’s thesis, Quito, 2020.
- [109] T. Mori, “The inspection report for the SN-ratio optimum prediction accuracy of Taguchi two step design. Is its D grade?”.
- [110] H. Gutiérrez Pulido, *Calidad y productividad*. Mexico: McGraw Hill México, 2014.
- [111] P. D. M. Varela, E. A. C. Trejos, and J. H. Restrepo, “Aplicación del modelo de experimentacion taguchi en un ingenio azucarero del valle del cauca,” *Scientia et technica*, vol. 2, no. 34, pp. 337–341, 2007.
- [112] Vásquez Alfaro Mónica M., “Preparación y caracterización de nanopartículas de poliuretano: optimización mediante diseño experimental de Taguchi.” Tesis, 2016.
- [113] L. H. Chan-Chan *et al.*, “Segmented Poly(urea)urethane Nanoparticles: Size Optimization Using Taguchi Experimental Design and Nanoprecipitation Method,” *Curr Nanosci*, vol. 17, no. 1, pp. 70–80, Mar. 2021, doi: 10.2174/1573413716666200324180010.
- [114] V. A. Monica, “Preparación y caracterización de nanopartículas de poliuretano: optimización mediante diseño experimental de Taguchi.” thesis, 2016.
- [115] E. Can, “Variable determined for optimization of alternating energy on the load by the adaptive Taguchi method,” *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, vol. 10, no. 4, pp. 316–335, Dec. 2022, doi: 10.36909/jer.12657.
- [116] P. G. Mathews, *Design of Experiments with MINITAB*. Quality press. 2005. [Online]. Available: <http://qualitypress.asq.org>.

- [117] S. D. Dao, K. Abhary, and R. Marian, “Maximising Performance of Genetic Algorithm Solver in Matlab,” *Engineering Letters*, vol. 24, no. 1, 2016.
- [118] Cam Chiang and L. F., “Determinación de parámetros de fabricación mediante el proceso de modelado por deposición fundida con poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono según la metodología de Taguchi.”
- [119] F. Neri and V. Tirronen, “Scale factor local search in differential evolution,” *Memet Comput*, vol. 1, no. 2, pp. 153–171, Jun. 2009, doi: 10.1007/s12293-009-0008-9.
- [120] J. Aguayo Alquicira, S. E. D. León-Aldaco, J. H. Calleja Gjumlich, and A. Claudio-Sánchez, “Switching angles calculation in multilevel inverters using triangular number sequence—A THD minimization approach.,” *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 49–55, Feb. 2020, doi: 10.18280/ejee.220106.
- [121] R. P. López and E. B. Portillo, *Electrónica de potencia*. Marcombo., 2012.

Anexos

Anexo I. Código en FPGA con Taguchi-DE para el inversor CHBMLI de 5 niveles.

```
-- 5LVL
-- EP4CE22F17C6
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

-- Entity
entity FiveLVL is
    port (
        CLK_60Hz: in std_logic; -- Reloj original del FPGA (50MHz)
        Q: out std_logic_vector(7 downto 0) -- Salidas de la secuencia
    );
end FiveLVL;

-- Architecture
architecture FiveLVL_arq of FiveLVL is
    signal contador: integer range 0 to 833333 := 0; -- Ajustado el rango del contador para 60
    Hz (833333)
    signal pulso: std_logic := '0';

-- Declaración de variables para los tiempos en pulsos
    constant p_t0: integer := 0;
    constant p_t1: integer := 31037; -- 13.4080°
    constant p_t2: integer := 97025; -- 41.9146°
    constant p_t3: integer := 319642;
    constant p_t4: integer := 385630;
    constant p_t5: integer := 447703;
```

```

constant p_t6: integer := 513691;
constant p_t7: integer := 736309;
constant p_t8: integer := 802296;
constant p_t9: integer := 833333; -- 360° equivale a un ciclo completo
constant bt: integer := 150; -- Tiempo muerto entre tramos (150 pulsos son 3us)
-- 1 solo pulso es
igual a 20 nanosegundos.

```

```

begin
proceso_divisor: process(CLK_60Hz)
begin
-- Divisor de frecuencia para obtener el periodo (16.66ms)
if rising_edge(CLK_60Hz) then
if contador = 833333 then
pulso <= NOT pulso;
contador <= 0;
else
contador <= contador + 1;
end if;
end if;
end process proceso_divisor;

```

```

proceso_secuencia: process(CLK_60Hz)
begin
-- Lógica para generar las secuencias en 1/9 del periodo
if rising_edge(CLK_60Hz) then
case contador is
when p_t0 to p_t1 => -- 1/9 del periodo
Q <= "11000011";

```

```

when p_t1+1 to p_t1+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "11000001";
when p_t1+bt+1 to p_t2 => -- 2/9 del periodo
  Q <= "11001001";
when p_t2+1 to p_t2+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "10001001";
when p_t2+bt+1 to p_t3 => -- 3/9 del periodo
  Q <= "10011001";
when p_t3+1 to p_t3+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "10011000";
when p_t3+bt+1 to p_t4 => -- 4/9 del periodo
  Q <= "10011100";
when p_t4+1 to p_t4+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "00011100";
when p_t4+bt+1 to p_t5 => -- 5/9 del periodo
  Q <= "00111100";
when p_t5+1 to p_t5+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "00110100";
when p_t5+bt+1 to p_t6 => -- 6/9 del periodo
  Q <= "00110110";
when p_t6+1 to p_t6+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "00100110";
when p_t6+bt+1 to p_t7 => -- 7/9 del periodo
  Q <= "01100110";
when p_t7+1 to p_t7+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "01100010";
when p_t7+bt+1 to p_t8 => -- 8/9 del periodo
  Q <= "01100011";

```



```
when p_t8+1 to p_t8+bt => -- Tiempo muerto
    Q <= "01000011";
when p_t8+bt+1 to p_t9 => -- 9/9 del periodo
    Q <= "11000011";
when others =>
    null;
end case;
end if;
end process proceso_secuencia;

end FiveLVL_arq;
```

Anexo II. Código en FPGA con Taguchi-DE para el inversor CHBMLI de 7 niveles.

```
-- 7LVL
-- EP4CE22F17C6
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

-- Entity
entity SevenLVL is
  port (
    CLK_60Hz: in std_logic; -- Reloj original del FPGA (50MHz)
    Q: out std_logic_vector(11 downto 0) -- Salidas de la secuencia
  );
end SevenLVL;

-- Architecture
architecture SevenLVL_arq of SevenLVL is
  signal contador: integer range 0 to 833333 := 0; -- Ajustado el rango del contador para 60
  Hz
  signal pulso: std_logic := '0';

-- Declaración de variables para los tiempos en pulsos
constant p_t0: integer := 0;
constant p_t1: integer := 20122;
constant p_t2: integer := 64574;
constant p_t3: integer := 115316;
constant p_t4: integer := 301350;
constant p_t5: integer := 352092;
constant p_t6: integer := 396544;
```

```

constant p_t7: integer := 436789;
constant p_t8: integer := 481241;
constant p_t9: integer := 531983;
constant p_t10: integer := 718017;
constant p_t11: integer := 768759;
constant p_t12: integer := 813211;
constant p_t13: integer := 833333; -- 360° equivale a un ciclo completo
constant bt: integer := 150; -- Tiempo muerto entre tramos (150 pulsos son 3us)
-- 1 solo pulso
es igual a 20 nanosegundos.

```

```

begin
  proceso_divisor: process(CLK_60Hz)
  begin
    -- Divisor de frecuencia para obtener el periodo (16.66ms)
    if rising_edge(CLK_60Hz) then
      if contador = 833333 then
        pulso <= NOT pulso;
        contador <= 0;
      else
        contador <= contador + 1;
      end if;
    end if;
  end process proceso_divisor;
  proceso_secuencia: process(CLK_60Hz)
  begin
    -- Lógica para generar las secuencias en 1/13 del periodo
    if rising_edge(CLK_60Hz) then
      case contador is

```

```

when p_t0 to p_t1 => -- 1/13 del periodo
  Q <= "001100110011";
when p_t1+1 to p_t1+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "001100110001";
when p_t1+bt+1 to p_t2 => -- 2/13 del periodo
  Q <= "001100111001";
when p_t2+1 to p_t2+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "001100011001";
when p_t2+bt+1 to p_t3 => -- 3/13 del periodo
  Q <= "001110011001";
when p_t3+1 to p_t3+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "000110011001";
when p_t3+bt+1 to p_t4 => -- 4/13 del periodo
  Q <= "100110011001";
when p_t4+1 to p_t4+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "000110011001";
when p_t4+bt+1 to p_t5 => -- 5/13 del periodo
  Q <= "001110011001";
when p_t5+1 to p_t5+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "001100011001";
when p_t5+bt+1 to p_t6 => -- 6/13 del periodo
  Q <= "001100111001";
when p_t6+1 to p_t6+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "001100110001";
when p_t6+bt+1 to p_t7 => -- 7/13 del periodo
  Q <= "001100110011";
when p_t7+1 to p_t7+bt => -- Tiempo muerto
  Q <= "001100110010";

```

```

when p_t7+bt+1 to p_t8 => -- 8/13 del periodo
    Q <= "001100110110";
when p_t8+1 to p_t8+bt => -- Tiempo muerto
    Q <= "001100100110";
when p_t8+bt+1 to p_t9 => -- 9/13 del periodo
    Q <= "001101100110";
when p_t9+1 to p_t9+bt => -- Tiempo muerto
    Q <= "001001100110";
when p_t9+bt+1 to p_t10 => -- 10/13 del periodo
    Q <= "011001100110";
when p_t10+1 to p_t10+bt => -- Tiempo muerto
    Q <= "001001100110";
when p_t10+bt+1 to p_t11 => -- 11/13 del periodo
    Q <= "001101100110";
when p_t11+1 to p_t11+bt => -- Tiempo muerto
    Q <= "001100100110";
when p_t11+bt+1 to p_t12 => -- 12/13 del periodo
    Q <= "001100110110";
when p_t12+1 to p_t12+bt => -- Tiempo muerto
    Q <= "001100110010";
when p_t12+bt+1 to p_t13 => -- 13/13 del periodo
    Q <= "001100110011";
when others =>
    null;
end case;
end if;
end process proceso_secuencia;
end SevenLVL_arq;

```

Anexo III. Código de MATLAB para obtener los valores enteros del FPGA para el inversor CHBMLI de 5 niveles.

```
%5LVL
clear all;
clc;

% Definición de ángulos A y B
A = 13.4080;
B = 41.9146;
ciclo = 16.66; % duración de un ciclo en milisegundos

% Conversión de ángulos a tiempo
t0 = 0;
t1 = (A * ciclo) / 360;
t2 = (B * ciclo) / 360;
t3 = ((180 - B) * ciclo) / 360;
t4 = ((180 - A) * ciclo) / 360;
t5 = ((180 + A) * ciclo) / 360;
t6 = ((180 + B) * ciclo) / 360;
t7 = ((360 - B) * ciclo) / 360;
t8 = ((360 - A) * ciclo) / 360;
t9 = (360 * ciclo) / 360;

% Cálculo de pulsos
p = 5000000 / 60; % 833333

% Correspondencia en pulsos para cada tiempo t redondeados
p_t0_rounded = round(t0 * (p / ciclo));
p_t1_rounded = round(t1 * (p / ciclo));
p_t2_rounded = round(t2 * (p / ciclo));
p_t3_rounded = round(t3 * (p / ciclo));
p_t4_rounded = round(t4 * (p / ciclo));
p_t5_rounded = round(t5 * (p / ciclo));
p_t6_rounded = round(t6 * (p / ciclo));
p_t7_rounded = round(t7 * (p / ciclo));
p_t8_rounded = round(t8 * (p / ciclo));
p_t9_rounded = round(t9 * (p / ciclo));

% Correspondencia en pulsos para cada tiempo t sin redondear
p_t0 = t0 * (p / ciclo);
p_t1 = t1 * (p / ciclo);
p_t2 = t2 * (p / ciclo);
p_t3 = t3 * (p / ciclo);
p_t4 = t4 * (p / ciclo);
p_t5 = t5 * (p / ciclo);
p_t6 = t6 * (p / ciclo);
p_t7 = t7 * (p / ciclo);
p_t8 = t8 * (p / ciclo);
p_t9 = t9 * (p / ciclo);

% Conversión de pulsos a tiempo
t_p0 = p_t0 * (ciclo / p);
t_p1 = p_t1 * (ciclo / p);
```

```
t_p2 = p_t2 * (ciclo / p);  
t_p3 = p_t3 * (ciclo / p);  
t_p4 = p_t4 * (ciclo / p);  
t_p5 = p_t5 * (ciclo / p);  
t_p6 = p_t6 * (ciclo / p);  
t_p7 = p_t7 * (ciclo / p);  
t_p8 = p_t8 * (ciclo / p);  
t_p9 = p_t9 * (ciclo / p);
```

```
% Verificación de simetría
```

```
diffs = [p_t1 - p_t0, p_t2 - p_t1, p_t3 - p_t2, p_t4 - p_t3, p_t5 - p_t4, p_t6 -  
p_t5, p_t7 - p_t6, p_t8 - p_t7, p_t9 - p_t8];  
diffs_rounded = [p_t1_rounded - p_t0_rounded, p_t2_rounded - p_t1_rounded,  
p_t3_rounded - p_t2_rounded, p_t4_rounded - p_t3_rounded, p_t5_rounded -  
p_t4_rounded, p_t6_rounded - p_t5_rounded, p_t7_rounded - p_t6_rounded,  
p_t8_rounded - p_t7_rounded, p_t9_rounded - p_t8_rounded];
```

Anexo IV. Código de MATLAB para obtener los valores enteros del FPGA para el inversor CHBMLI de 7 niveles.

```
%7LVL
clear all;
clc;

% Definición de ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ 
theta1 = 8.6929;
theta2 = 27.8961;
theta3 = 49.8167;
ciclo = 16.66; % duración de un ciclo en milisegundos

% Conversión de ángulos a tiempo
t0 = 0;
t1 = (theta1 * ciclo) / 360;
t2 = (theta2 * ciclo) / 360;
t3 = (theta3 * ciclo) / 360;
t4 = (180 - theta3) * ciclo / 360;
t5 = (180 - theta2) * ciclo / 360;
t6 = (180 - theta1) * ciclo / 360;
t7 = (180 + theta1) * ciclo / 360;
t8 = (180 + theta2) * ciclo / 360;
t9 = (180 + theta3) * ciclo / 360;
t10 = (360 - theta3) * ciclo / 360;
t11 = (360 - theta2) * ciclo / 360;
t12 = (360 - theta1) * ciclo / 360;
t13 = 360 * ciclo / 360;

% Cálculo de pulsos
p = 50000000 / 60; % 833333

% Correspondencia en pulsos para cada tiempo t redondeados
p_t0_rounded = round(t0 * (p / ciclo));
p_t1_rounded = round(t1 * (p / ciclo));
p_t2_rounded = round(t2 * (p / ciclo));
p_t3_rounded = round(t3 * (p / ciclo));
p_t4_rounded = round(t4 * (p / ciclo));
p_t5_rounded = round(t5 * (p / ciclo));
p_t6_rounded = round(t6 * (p / ciclo));
p_t7_rounded = round(t7 * (p / ciclo));
p_t8_rounded = round(t8 * (p / ciclo));
p_t9_rounded = round(t9 * (p / ciclo));
p_t10_rounded = round(t10 * (p / ciclo));
p_t11_rounded = round(t11 * (p / ciclo));
p_t12_rounded = round(t12 * (p / ciclo));
p_t13_rounded = round(t13 * (p / ciclo));

% Correspondencia en pulsos para cada tiempo t sin redondear
p_t0 = t0 * (p / ciclo);
p_t1 = t1 * (p / ciclo);
p_t2 = t2 * (p / ciclo);
p_t3 = t3 * (p / ciclo);
p_t4 = t4 * (p / ciclo);
```



```

p_t5 = t5 * (p / ciclo);
p_t6 = t6 * (p / ciclo);
p_t7 = t7 * (p / ciclo);
p_t8 = t8 * (p / ciclo);
p_t9 = t9 * (p / ciclo);
p_t10 = t10 * (p / ciclo);
p_t11 = t11 * (p / ciclo);
p_t12 = t12 * (p / ciclo);
p_t13 = t13 * (p / ciclo);

```

```

% Conversión de pulsos a tiempo

```

```

t_p0 = p_t0 * (ciclo / p);
t_p1 = p_t1 * (ciclo / p);
t_p2 = p_t2 * (ciclo / p);
t_p3 = p_t3 * (ciclo / p);
t_p4 = p_t4 * (ciclo / p);
t_p5 = p_t5 * (ciclo / p);
t_p6 = p_t6 * (ciclo / p);
t_p7 = p_t7 * (ciclo / p);
t_p8 = p_t8 * (ciclo / p);
t_p9 = p_t9 * (ciclo / p);
t_p10 = p_t10 * (ciclo / p);
t_p11 = p_t11 * (ciclo / p);
t_p12 = p_t12 * (ciclo / p);
t_p13 = p_t13 * (ciclo / p);

```

```

% Simetría

```

```

diffs = [p_t1 - p_t0, p_t2 - p_t1, p_t3 - p_t2, p_t4 - p_t3, p_t5 - p_t4, p_t6 -
p_t5, p_t7 - p_t6, p_t8 - p_t7, p_t9 - p_t8, p_t10 - p_t9, p_t11 - p_t10, p_t12
- p_t11, p_t13 - p_t12];
diffs_rounded = [p_t1_rounded - p_t0_rounded, p_t2_rounded - p_t1_rounded,
p_t3_rounded - p_t2_rounded, p_t4_rounded - p_t3_rounded, p_t5_rounded -
p_t4_rounded, p_t6_rounded - p_t5_rounded, p_t7_rounded - p_t6_rounded,
p_t8_rounded - p_t7_rounded, p_t9_rounded - p_t8_rounded, p_t10_rounded -
p_t9_rounded, p_t11_rounded - p_t10_rounded, p_t12_rounded - p_t11_rounded,
p_t13_rounded - p_t12_rounded];

```

Anexo V. Código de MATLAB para obtener los ángulos de conmutación para el inversor CHBMLI de 5 niveles.

```
%%  
% Create an Instance of Optimization Problem  
format short  
clc  
clear all  
close all  
  
problem = ypea_problem();  
  
% Set the Problem Type  
problem.type = 'min';  
  
lower_bounds = [1, 1];  
upper_bounds = [89.9, 89.9];  
  
problem.vars = [  
    ypea_var('x', 'real', 'lower_bound', lower_bounds(1), 'upper_bound',  
    upper_bounds(1))  
    ypea_var('y', 'real', 'lower_bound', lower_bounds(2), 'upper_bound',  
    upper_bounds(2))  
];  
  
% Define the objective function directly in the problem  
problem.obj_func = @(sol) calc_THD(sol.x, sol.y);  
  
alg = ypea_de('DE/rand/1/bin');  
  
%%  
  
% Population Size  
alg.pop_size = 100; %Es posible poner 10 pero no es muy estable,  
    %pero da buenos resultados aun.  
  
% Maximum Number of Iterations  
alg.max_iter = 100;  
  
% Minimum Value of Acceleration Coefficient  
alg.beta_min = 0.001; %Esta linea no es necesaria  
  
% Maximum Value of Acceleration Coefficient  
alg.beta_max = 0.8;  
  
% Crossover Probability  
alg.crossover_prob = 0.8;  
  
%%  
  
best_sol = alg.solve(problem);
```

```

% Se obtienen los mejores individuos
best_sol.solution

% THD se calcula directamente en la función objetivo
best_THD = calc_THD(best_sol.solution.x, best_sol.solution.y)

figure;
alg.semilogy('iteration', 'LineWidth', 5, 'Color', [0.5, 0.8, 0.5]);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best Objective Value');
title(['Results of ' alg.full_name]);
grid on;
set(gca, 'FontSize', 14);
set(get(gca, 'XLabel'), 'FontSize', 16);
set(get(gca, 'YLabel'), 'FontSize', 16);
set(get(gca, 'Title'), 'FontSize', 18);

%%

best_sol = alg.solve(problem);

% Se obtienen los mejores individuos
best_sol.solution

% THD se calcula directamente en la función objetivo
best_THD = calc_THD(best_sol.solution.x, best_sol.solution.y)

%%

figure= figure('Color',[1 1 1]);

hold(gca,'on');

alg.semilogy('iteration', 'LineWidth', 5, 'Color', [0.5, 0.8, 0.5]);
xlabel('Generaciones');
ylabel('%THD');
title('Mejor % THD:15.299');
grid on;
box(gca,'on');
grid(gca,'on');
hold(gca,'on');

xlim([1, 15]);
ylim([0, 16]);

set(gca, 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold', 'GridLineStyle', '--', ...
    'LineStyleOrder', {'-'}, 'MinorGridLineStyle', '--
    ', 'XMinorGrid', 'on', ...

    'XMinorTick', 'on', 'YMinorTick', 'on', 'YScale', 'log', 'ZMinorGrid', 'on', ...
    'ZMinorTick', 'on');
set(get(gca, 'XLabel'), 'FontSize', 20);
set(get(gca, 'YLabel'), 'FontSize', 20);
set(get(gca, 'Title'), 'FontSize', 20);

```

```

%%

function THD = calc_THD(x, y)
% Aplicar restricción: x < y en la función objetivo
if x >= y
    THD = inf; % Penalizar soluciones que no cumplan la restricción
    return;
end

sum = 0;

for n = 3:2:49
    H = (((cos(x * n * pi / 180) + cos(y * n * pi / 180)) / n)^2);
    sum = sum + H;
end

THD = 100 * sqrt((sum) / (cos(x * pi / 180) + cos(y * pi / 180))^2);

end

```

Anexo VI. Código de MATLAB para obtener los ángulos de conmutación para el inversor CHBMLI de 7 niveles.

```
%%  
% Create an Instance of Optimization Problem  
format short  
  
clc  
clear all  
close all  
  
problem = ypea_problem();  
  
% Set the Problem Type  
problem.type = 'min';  
  
lower_bounds = [1, 1, 1];  
upper_bounds = [89.9, 89.9, 89.9];  
  
problem.vars = [  
    ypea_var('x', 'real', 'lower_bound', lower_bounds(1), 'upper_bound',  
    upper_bounds(1))  
    ypea_var('y', 'real', 'lower_bound', lower_bounds(2), 'upper_bound',  
    upper_bounds(2))  
    ypea_var('z', 'real', 'lower_bound', lower_bounds(3), 'upper_bound',  
    upper_bounds(3))  
];  
  
% Define the objective function directly in the problem  
problem.obj_func = @(sol) calc_THD(sol.x, sol.y, sol.z);  
  
alg = ypea_de('DE/rand/1/bin');  
  
%%  
  
% Population Size  
alg.pop_size = 100;  
  
% Maximum Number of Iterations  
alg.max_iter = 100;  
  
% Minimum Value of Acceleration Coefficient  
alg.beta_min = 0.0001; %Esta línea no es necesaria  
  
% Maximum Value of Acceleration Coefficient  
alg.beta_max = 1; %0.7  
  
% Crossover Probability  
alg.crossover_prob = 1;  
  
%%
```

```

best_sol = alg.solve(problem);

% Se obtienen los mejores individuos
best_sol.solution

% THD se calcula directamente en la función objetivo
best_THD = calc_THD(best_sol.solution.x, best_sol.solution.y,
best_sol.solution.z)

%Grafica resultados
figure;
alg.semilogy('iteration', 'LineWidth', 5, 'Color', [0.5, 0.8, 0.5]);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best Objective Value');
title(['Results of ' alg.full_name]);
grid on;

set(gca, 'FontSize', 14); % Tamaño de letra para los ejes
set(get(gca, 'XLabel'), 'FontSize', 16); % Tamaño de letra para la
etiqueta del eje x
set(get(gca, 'YLabel'), 'FontSize', 16); % Tamaño de letra para la
etiqueta del eje y
set(get(gca, 'Title'), 'FontSize', 18); % Tamaño de letra para el
título
%
figure= figure('Color',[1 1 1]);
hold(gca,'on');
alg.semilogy('iteration', 'LineWidth', 5, 'Color', [0.5, 0.8, 0.5]);
xlabel('Generaciones');
ylabel('%THD');
title('Mejor % THD:10.4324');
grid on;
box(gca,'on');
grid(gca,'on');
hold(gca,'on');

xlim([1, 20]);
ylim([0, 16]);

set(gca,'FontSize',20,'FontWeight','bold','GridLineStyle','--',...
'LineStyleOrder',{'-'},'MinorGridLineStyle','--
','XMinorGrid','on',...
'XMinorTick','on','YMinorTick','on','YScale','log','ZMinorGrid','on',...
'ZMinorTick','on');
set(get(gca, 'XLabel'), 'FontSize', 20);
set(get(gca, 'YLabel'), 'FontSize', 20);
set(get(gca, 'Title'), 'FontSize', 20);

%%

function THD = calc_THD(x, y, z)
% Aplicar restricción:  $x < y$  y  $y < z$  en la función objetivo
if x >= y || y >= z

```

```

    THD = inf; % Penalizar soluciones que no cumplan la restricción
    return;
end

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 VII. Código en PIC (16F887) con Taguchi-GA para el inversor CHBMLI de 5 niveles.

```
#include <16F887.h>

#FUSES HS, NOWDT, PUT, NOMCLR, NOLVP, NOPROTECT, NOCPD,
NOBROWNOUT

#USE delay(clock=4000000)

//DEFINIMOS LOS PUERTOS Y SUS INTERRUPTORES

#define S1 PIN_B0
#define S2 PIN_B1
#define S3 PIN_B2
#define S4 PIN_B3
#define S5 PIN_B4
#define S6 PIN_B5
#define S7 PIN_B6
#define S8 PIN_B7

//DEFINIMOS LOS TIEMPOS DE ESPERA

#define t1 621
#define t2 1320
#define t3 4452
#define t4 1241

void main()
{
//////// NIVEL CERO //////////
// INVERSOR 1
output_high(S1); output_high(S2);
```



```

output_low(S3); output_low(S4);
// INVERSOR 2
output_low(S5); output_low(S6);
output_high(S7); output_high(S8);
  while(TRUE)
  {
//Ángulo 0°
output_high(S8);
output_low(S6);
  delay_us(t1);

//Ángulo 13.3918°
output_low(S2);
output_high(S4);
  delay_us(t2);

//Ángulo 41.9314°
output_low(S7);
output_high(S5);
  delay_us(t3);

//Ángulo 138.0686°
output_low(S1);
output_high(S3);
  delay_us(t2);

//Ángulo 166.6082°
output_low(S8);

```

```
output_high(S6);
  delay_us(t4);

//Ángulo 193.3918°
output_low(S4);
output_high(S2);
  delay_us(t2);

//Ángulo 221.9314°
output_low(S5);
output_high(S7);
  delay_us(t3);

//Ángulo 318.0686°
output_low(S3);
output_high(S1);
  delay_us(t2);

//Ángulo 346.6082°
output_low(S6);
output_high(S8);
  delay_us(t1);

}
}
```

Anexo VIII. Código en PIC (16F887) con Taguchi-GA para el inversor CHBMLI de 7 niveles.

```
#include <16F887.h>

#FUSES HS, NOWDT, PUT, NOMCLR, NOLVP, NOPROTECT, NOCPD,
NOBROWNOUT

#USE delay(clock=4000000)

//DEFINIMOS LOS PUERTOS Y SUS INTERRUPTORES

#define S1 PIN_B0
#define S2 PIN_B1
#define S3 PIN_B2
#define S4 PIN_B3
#define S5 PIN_B4
#define S6 PIN_B5
#define S7 PIN_B6
#define S8 PIN_B7
#define S9 PIN_D7
#define S10 PIN_D6
#define S11 PIN_D5
#define S12 PIN_D4

//DEFINIMOS LOS TIEMPOS DE ESPERA

#define t1 401
#define t2 890
#define t3 1017
#define t4 3719
#define t5 801

void main()
{
```

```

//////// NIVEL CERO //////////
// INVERSOR 1
output_high(S1); output_high(S2);
output_low(S3); output_low(S4);
// INVERSOR 2
output_high(S5); output_high(S6);
output_low(S7); output_low(S8);
// INVERSOR 3
output_high(S9); output_high(S10);
output_low(S11); output_low(S12);
    while(TRUE)
    {
//Ángulo 0°
output_high(S1);
output_low(S3);
    delay_us(t1);

//Ángulo 8.6555°
output_low(S2);
output_high(S4);
    delay_us(t2);

//Ángulo 27.8744°
output_low(S6);
output_high(S8);
    delay_us(t3);

//Ángulo 49.8378°

```

```
output_low(S10);
output_high(S12);
  delay_us(t4);

//Ángulo 130.1622°
output_low(S12);
output_high(S10);
  delay_us(t3);

//Ángulo 152.1256°
output_low(S8);
output_high(S6);
  delay_us(t2);

//Ángulo 171.3445°
output_low(S4);
output_high(S2);
  delay_us(t5);

//Ángulo 188.6555°
output_low(S1);
output_high(S3);
  delay_us(t2);

//Ángulo 207.8744°
output_low(S5);
output_high(S7);
  delay_us(t3);
```

```
//Ángulo 229.8378°
```

```
output_low(S9);
```

```
output_high(S11);
```

```
delay_us(t4);
```

```
//Ángulo 310.1622°
```

```
output_low(S11);
```

```
output_high(S9);
```

```
delay_us(t3);
```

```
//Ángulo 332.1256°
```

```
output_low(S7);
```

```
output_high(S5);
```

```
delay_us(t2);
```

```
//Ángulo 351.3445°
```

```
output_low(S3);
```

```
output_high(S1);
```

```
delay_us(t1);
```

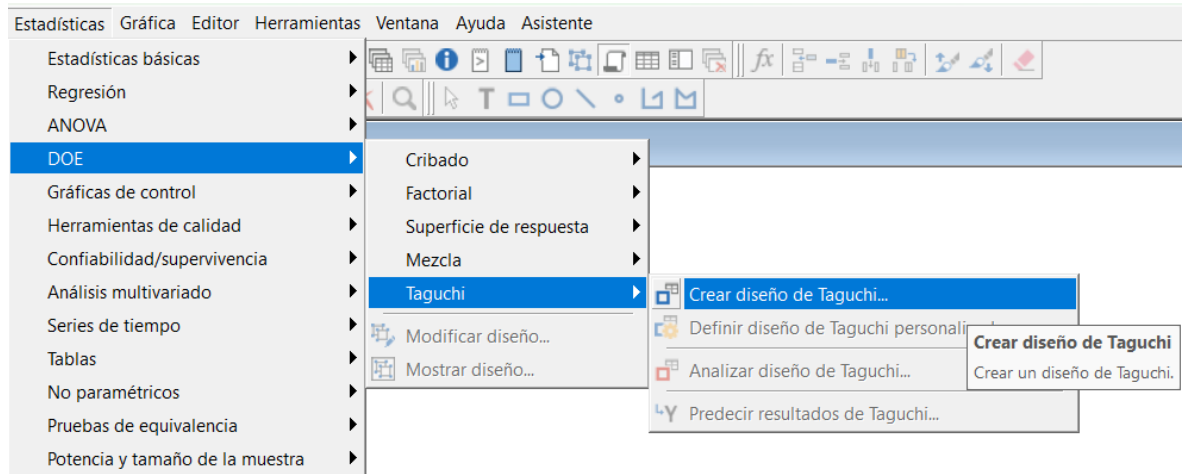
```
}
```

```
}
```

Anexo IX. Configuración de Minitab en el Análisis de Datos.

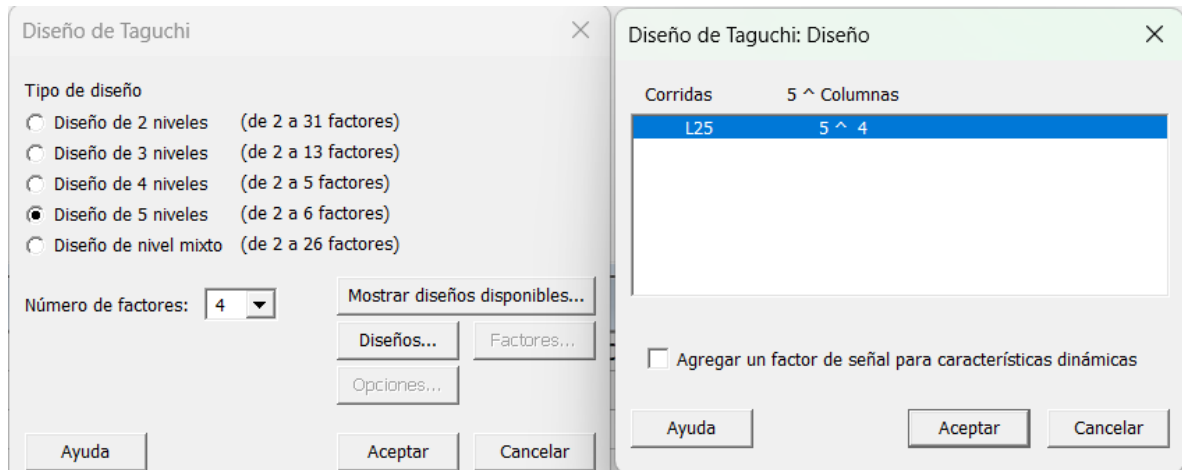
Paso 1

Abrir Minitab e ir a la pestaña “Estadísticas”, seleccionar la opción de “Taguchi” y seleccionar “Crear diseño de Taguchi”.



Paso 2

Aparecerá la ventana para configurar la DOE, se seleccionan los factores y niveles según el interés del experimentador, en este ejemplo se coloca 5 niveles y 4 factores.



Paso 3

En el apartado de “Factores”, ajustar el nombre de los factores y de los niveles.

Diseño de Taguchi: Factores X

Asignar factores


A columnas del arreglo, tal como se especifica más adelante

Para permitir estimación de interacciones seleccionad

Factor	Nombre	Valores de nivel	Columna	Niveles
A	Np - population	1 2 3 4 5	1	5
B	Generations	1 2 3 4 5	2	5
C	F - Scale Facto	1 2 3 4 5	3	5
D	Cr - Crossover	1 2 3 4 5	4	5

Paso 4

Se muestra en la interfaz el resumen del Diseño.

 Sesión

Diseño de Taguchi

Resumen del diseño

Arreglo de Taguchi L25(5⁴)

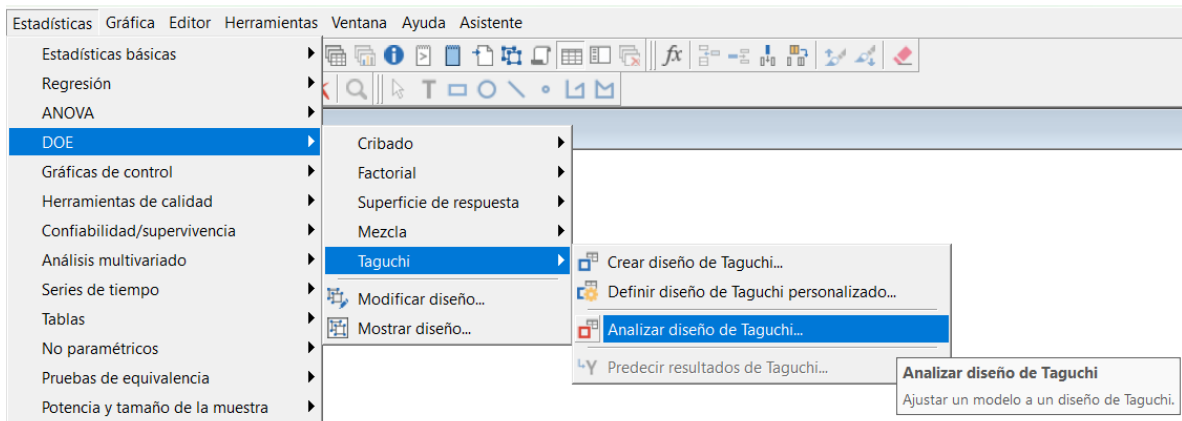
Factores: 4

Corridas: 25

Columnas del arreglo de L25(5⁶): 1 2 3 4

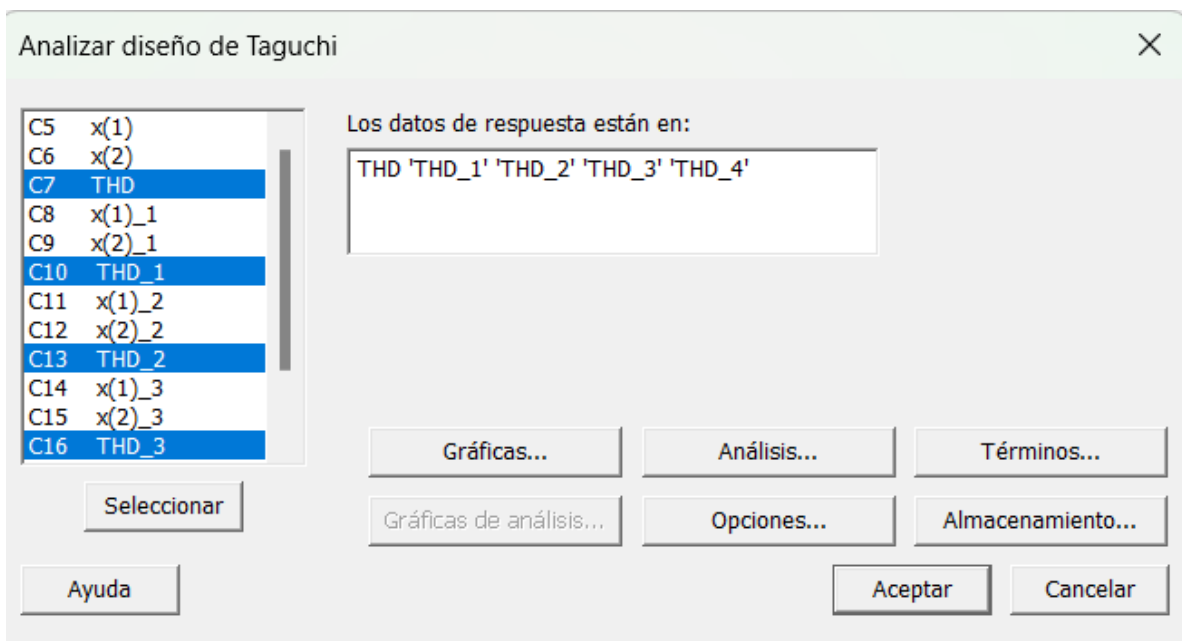
Paso 7

Para realizar el análisis de Taguchi, ir a la pestaña “Estadísticas”, seleccionar la opción de “Taguchi” y seleccionar “Analizar diseño de Taguchi”.



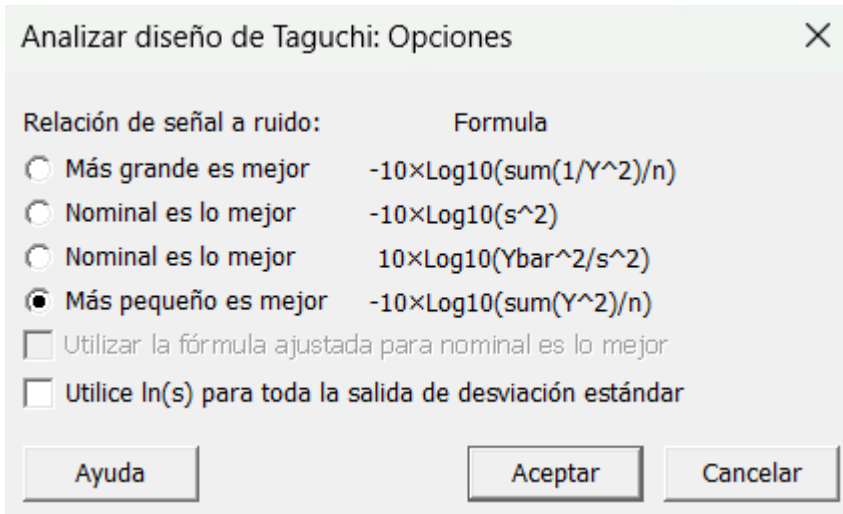
Paso 8

Seleccionar todos los valores a optimizar (THD) de cada corrida de cada experimento.



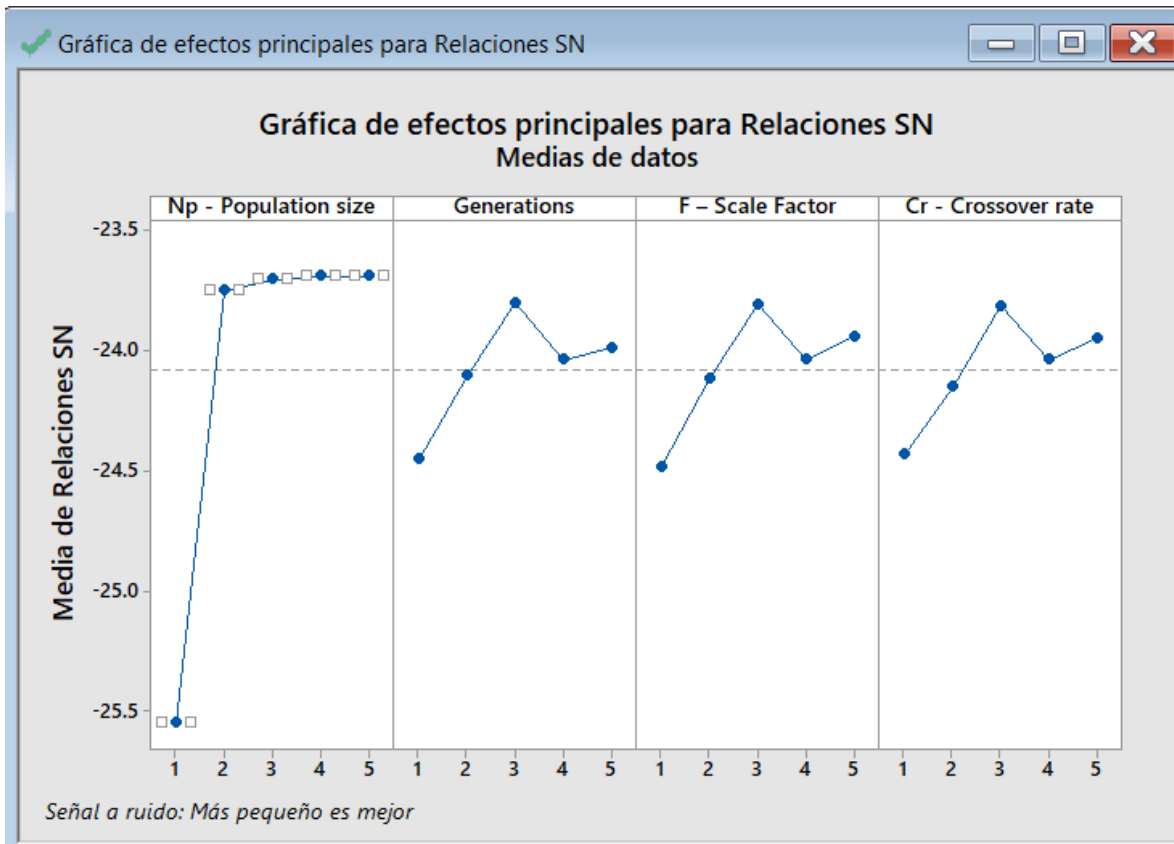
Paso 9

Ajustar el apartado de “Opciones” con la función “Más pequeño es mejor”



Paso 10

Para modificar el tamaño de letra o el color de las gráficas de efectos principales. Dar doble clic en lo que se desee modificar hasta que aparezcan recuadros blancos y el menú de configuración.



Editar línea de conexión de la media ×

Atributos

Líneas

Automático

Personalizado

Tipo:

Color:

Tamaño:

Ayuda Aceptar Cancelar