



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SAPF EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: DARWIN PATRICIO MAGUANA ZHINDÓN
CHRISTIAN ANDRÉS QUIZHPE GORDILLO
TUTOR: ING. ARTURO PERALTA SEVILLA, Ph.D.

Cuenca - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Darwin Patricio Maguana Zhindón con documento de identificación N° 0302306642 y Christian Andrés Quizhpe Gordillo con documento de identificación N° 0150047355, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 22 de Agosto del 2025

Atentamente,



Darwin P. Maguana Zhindón
0302306642



Christian A. Quizhpe Gordillo
0150047355

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Darwin Patricio Maguana Zhindón con documento de identificación N° 0302306642 y Christian Andrés Quizhpe Gordillo con documento de identificación N° 0150047355, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: **Ubicación y dimensionamiento de SAPF en redes de distribución**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 22 de Agosto del 2025

Atentamente,

Darwin P. Maguana Zhindón
0302306642

Christian A. Quizhpe Gordillo
0150047355

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Arturo Geovanny Peralta Sevilla con documento de identificación N° 0102199072, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SAPF EN REDES DE DISTRIBUCIÓN realizado por Darwin Patricio Maguana Zhindón con documento de identificación N° 0302306642 y Christian Andrés Quizhpe Gordillo con documento de identificación N° 0150047355, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico, que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 22 de Agosto del 2025

Atentamente,



Ing. Arturo Peralta, Ph.D.
0102199072

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mi madre Luisa Zhindón y a mi padre Manuel Maguana, quienes con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificios constantes me han enseñado que con dedicación y perseverancia es posible alcanzar cualquier meta. Sus consejos llenos de sabiduría y su ejemplo de vida han sido mi guía y fortaleza a lo largo de este camino. Este logro es tanto mío como suyo, pues refleja el apoyo inquebrantable y el amor que siempre me han brindado.

A mis hermanos Jenny, Jhonny y July, por estar siempre presentes, motivándome con su compañía y palabras de aliento. Su apoyo ha sido un pilar importante que me dio fuerzas para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Extiendo también mi sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, por su guía paciente y su compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Sus observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para el crecimiento académico que hoy se ve reflejado en este proyecto. Más allá de lo profesional, agradezco la confianza y el respeto con los que me acompañó en este proceso, haciendo de esta experiencia una oportunidad de aprendizaje integral.

Darwin Patricio Maguana Zhindón

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre Teresa Gordillo, por acompañarme con amor y sacrificio en cada etapa de mi vida. Gracias a su apoyo incondicional he podido avanzar con firmeza hacia la consecución de mis metas, a mi hija Emma Quizhpe, cada logro alcanzado lleva implícito el deseo de brindarle un mejor futuro y la esperanza de que este esfuerzo sirva como inspiración en su vida, a mi hermana Erika Quizhpe, por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo, sus consejos y su compañía en los momentos más importantes de este proceso académico.

Finalmente, a mi tutor de tesis, por su guía, paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Sus aportes y acompañamiento fueron decisivos para culminar con éxito este proyecto, por lo cual le guardo un profundo agradecimiento y respeto.

Christian Andrés Quizhpe Gordillo

DEDICATORIA

A mi madre Luisa Zhindón, por su amor incondicional, su entrega y su fortaleza en cada etapa de mi vida. Gracias por ser mi guía, por brindarme siempre palabras de aliento en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño logro. Este trabajo es para ti, con todo mi amor.

A mi padre Manuel Maguana, por su apoyo inquebrantable y por cada sacrificio realizado para que yo pueda alcanzar mis metas. Gracias por ser ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y dedicación. Este logro también es tuyo, con gratitud y amor.

A mis hermanos Jenny, Jhonny y July, por acompañarme con su cariño, ánimo y comprensión en este camino. Gracias por estar presentes en mi vida, por darme fortaleza en los momentos de cansancio y por ser siempre una fuente de motivación y alegría.

Este trabajo representa no solo mi esfuerzo, sino también el de mi familia, que ha sido y será siempre mi mayor inspiración.

Darwin Patricio Maguana Zhindón

A mi madre Teresa Gordillo, por ser mi ejemplo de fortaleza, por enseñarme con su amor y sacrificio que no existen imposibles cuando se lucha con el corazón. Todo lo que soy, en gran parte, se lo debo a ella.

A mi hija Emma Quizhpe, mi razón de vivir. Aunque eres aún pequeña, me has mostrado el significado más puro del amor y me inspiras cada día a ser mejor persona y mejor padre. Este logro también es para ti, porque eres mi mayor motivación.

A mi hermana Erika Quizhpe, por estar siempre a mi lado, apoyándome en mis caídas y celebrando mis triunfos. Gracias por ser mi compañera de vida y mi refugio en los momentos difíciles.

A ustedes, las mujeres más importantes de mi vida, les entrego este logro con todo mi amor y gratitud eterna.

Christian Andrés Quizhpe Gordillo

RESUMEN

La expansión de las cargas no lineales en redes de distribución de energía eléctrica ha incrementado los niveles de distorsión armónica que afectan la calidad de energía y rendimiento de los equipos. Los SAPF son una solución siempre y cuando su localización y tamaño sean adecuados. En esta investigación, se propone un método de mejora para la localización de los SAPF que consiste en minimizar la Distorsión Armónica Total, THD, para cumplir con la norma IEEE 519/2022 utilizando la mínima cantidad de SAPF en línea. El procedimiento propuesto se ejecuta en una red IEEE de 69 barras en Matlab/Simulink[®] y considera escenarios de carga no lineal centralizada y distribuida. Al final de cada iteración, el algoritmo de localización elige los menos sobrecargados y repite el proceso para el próximo SAPF candidato. El THD disminuyó más de 60 % en las barras con mayor contenido armónico, pasando de 11 % a 4,5 %, y 52 % en promedio en toda la red. Se mejoró el perfil de voltajes y la potencia evitada por líneas al utilizar menos unidades SAPF en línea comparado con investigaciones anteriores. Se puede concluir en que el algoritmo de paso adaptativo es una herramienta eficiente con potencial de expandir y adaptar para la mitigación armónica, debiendo ser validado en redes reales e integración de sistemas de generación renovable para aumentar su aplicabilidad.

Palabras clave: algoritmos adaptativos, distorsión armónica total, filtros activos de potencia en derivación, IEEE 69 barras, redes de distribución eléctrica.

ABSTRACT

The expansion of nonlinear loads in electric power distribution networks has increased harmonic distortion levels, affecting power quality and equipment performance. SAPFs are a solution as long as their location and size are adequate. In this research, a method of improvement for SAPF location is proposed. This method consists of minimizing Total Harmonic Distortion (THD) to comply with IEEE Standard 519/2022 using the minimum number of SAPFs online. The proposed procedure is run on a 69-bus IEEE network in Matlab/Simulink[®] and considers centralized and distributed nonlinear load scenarios. At the end of each iteration, the location algorithm selects the least overloaded buses and repeats the process for the next candidate SAPF. The THD decreased by more than 60 % on the buses with the highest harmonic content, from 11 % to 4,5 %, and by 52 % on average across the entire network. The voltage profile and avoided power per line were improved by using fewer SAPF units online compared to previous research. It can be agreed that the adaptive step algorithm is an efficient tool with potential for expansion and adaptation for harmonic mitigation. It should be validated in real networks and integrated with renewable generation systems to increase its applicability.

Keywords: adaptive algorithms, total harmonic distortion, active shunt power filters, IEEE 69 bus, electrical distribution networks.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
GLOSARIO	XIII
1 GENERALIDADES	1
1.1 Delimitación del problema	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Justificación	4
1.4 Grupo objetivo	4
1.5 Objetivos	4
1.5.1 General	4
1.5.2 Específicos	5
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Redes de distribución eléctrica	6
2.2 Armónicos	8
2.2.1 Características	9
2.2.2 Clasificación según la secuencia de los fasores	11
2.2.3 Tipo de cargas	12
2.2.4 Cuantificación	14
2.3 Filtros de potencia	17
2.4 Topologías comunes de los SAPF	18
2.4.1 SAPF trifásico de 3 hilos	18
2.4.2 SAPF trifásico de 4 hilos	19
2.4.3 SAPF multinivel trifásico	19
2.4.4 SAPF con VSI	20
2.4.5 SAPF con <i>Current Source Inverter</i> CSI	21
2.4.6 SAPF trifásico híbrido	21
2.5 Métodos de optimización matemática	22
2.5.1 Programación lineal	22
2.5.2 Algoritmo adaptativo a pasos SSAA	23
2.6 Normativa IEEE 519/2022	24

3	CALCULO DEL SAPF	26
3.1	Algoritmo de mejora con paso adaptativo	26
3.2	Procedimiento	27
3.2.1	Conversiones y base por unidad	27
3.2.2	Modelo de Línea (Modelo π en pu)	29
3.2.2.1	Admitancia serie de la línea	29
3.2.2.2	Susceptancia shunt por extremo	29
3.2.2.3	Construcción de la Matriz Y_{bus}	30
3.2.3	Matriz de impedancias	30
3.2.4	Inyección armónica y propagación	30
3.2.5	Conjunto de barras candidatas	31
3.2.5.1	Selección de barras	31
3.2.6	Selección de órdenes armónicos	32
3.2.7	Amplitudes y fases	32
3.2.7.1	Fasores de inyección	33
3.2.7.2	Representación temporal	33
3.2.8	Índices de distorsión	34
3.2.9	Ubicación del SAPF	35
3.2.10	Compensación con el SAPF	36
3.2.11	Dimensionamiento del convertidor SAPF	36
4	RESULTADOS	38
4.1	Resultados con un SAPF	38
4.1.1	Inyección de armónicos	38
4.1.2	Comportamiento THD	39
4.1.3	Valor del THD sin SAPF	41
4.1.4	Ubicación del SAPF	41
4.1.5	Decrecimiento del THDv	42
4.1.6	Comparación del THD antes y después del SAPF	43
4.2	Resultados con dos SAPFs	44
4.2.1	Inyección de armónicos	44
4.2.2	Valor de THDv sin SAPFs	45
4.2.3	Ubicación de los SAPFs	46
4.2.4	Decrecimiento del THDv	47
4.2.5	Comparación del THD antes y después del SAPF	48
5	DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
5.1	Discusión	50
5.2	Conclusiones	51
5.3	Recomendaciones	51

BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXO A: ANEXO SO2	59

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Etapas del SEP [17]	6
2.2	Etapas del SEP con GD [17]	7
2.3	Distorsión armónica (HD)	8
2.4	Armónicos n: 1 - 25	9
2.5	Triángulo de potencias P , Q y S_1	10
2.6	Triángulo de potencias P , Q , D y S	11
2.7	Armónicos según la secuencia de los fasores	11
2.8	Distorsión armónica individual	16
2.9	Filtros de potencia activos en derivación SAPF [30]	17
2.10	Filtros híbridos [31]	18
2.11	SAPF multinivel [34]	20
2.12	Sistema de control SAPF basado en VSI	21
2.13	Algoritmo adaptativo a pasos [36]	24
3.1	Procedimiento de ubicación y tamaño de SAPF con paso adaptativo	26
4.1	Barras donde se inyectaron armónicos	39
4.2	Mapa de propagación THD en la red	40
4.3	THD de voltaje sin SAPF	41
4.4	Ubicación de SAPF	42
4.5	Decrecimiento del THD _v	43
4.6	THD de voltaje antes y después ante el uso del SAPF	43
4.7	Barras donde se inyectaron armónicos	45
4.8	Valor del THD en todas las barras	46
4.9	Ubicación de los SAPFs	47
4.10	Decrecimiento del THD _v	48
4.11	THD de voltaje antes y después ante el uso del SAPF	48

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Contenido armónico típico de diferentes cargas no lineales	14
2.2	Límites IHD y THD de voltaje	24
2.3	Distorsión máxima de corriente armónica del sistema entre 0,12 a 69 kV	25
1	Áreas del Trabajo de Grado	58

GLOSARIO

AT	Alta Tensión.
BT	Baja Tensión.
CSI	Current Source Inverter.
FP	Factor de Potencia.
GA	Genetic Algorithms.
GD	Generación Distribuida.
HD	Harmonic Distortion.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IEEE519	Institute of Electrical and Electronics Engineers 519.
IHD	Individual Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Individual).
MT	Media Tensión.
PSO	Particle Swarm Optimization.
PWM	Pulse Width Modulation.
RDE	Red de Distribución Eléctrica.
RMS	Root Mean Square.
SAPF	Shunt Active Power Filter (Filtro Activo en Derivación).
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
SSAA	Step Size Adaptive Algorithm.
TDD	Total Demand Distortion (Distorsión de Demanda Total).
THD	Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total).
VFD	Variable Frequency Drive (Variador de Frecuencia).
VSI	Voltage Source Inverter.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Delimitación del problema

La eliminación de las corrientes armónicas es fundamental para mejorar la calidad de la energía en las redes de distribución eléctrica *Red de Distribución Eléctrica (RDE)*. Históricamente, los filtros de potencia pasivos han sido ampliamente utilizados con este propósito debido a su diseño sencillo, bajo costo y mínimas pérdidas operativas. Sin embargo, alcanzar las características de filtrado deseadas puede ser complicado, ya que la gama de frecuencias que estos filtros pasivos pueden compensar es limitada [1].

1.2. Antecedentes

La calidad de la energía en las RDE se ha deteriorado con el paso de los años debido a 2 factores como el incremento de cargas de tipo no lineal y a la integración de energías renovables, principalmente por la distorsión armónica. A diferencia de hace varias décadas, el impacto de las cargas no lineales en la distorsión armónica ha aumentado en gran medida los estándares internacionales como el *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE-519)* por lo que surgieron estrategias para garantizar su cumplimiento. Los *Shunt Active Power Filter (SAPF)* son soluciones eficaces para la compensación de armónicos, ya que mejoran la eficiencia del sistema eléctrico de potencia *Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)* y la estabilidad operativa [2].

Uno de los estudios más citados sobre ese aspecto es el análisis de Abbas et al. [3],

que probaron SAPF sintonizados y optimizados con el algoritmo denominado *Water Cycle Algorithm* en una red *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* de 69 barras. Además, aplicaron este modelo para la mitigación del armónico generado por la generación distribuida que utiliza inversores. Por consiguiente, abordaron este sistema en simulaciones de Matlab/Simulink[®], donde los resultados encontrados mostraron cómo la *Total Harmonic Distortion (THD)* y las pérdidas eléctricas se reducen significativamente, también tienen a favor mejorar el perfil de tensión.

Guo et al. [4] desarrollaron un algoritmo de paso adaptativo en relación con los SAPF de optimización de fase y dimensión en una red IEEE de 18 barras. Al igual que el estudio de Abbas et al., realizaron las simulaciones en Matlab[®] y demostraron eficacia ante cargas centralizadas como distribuidas, mejorando así la calidad de energía, cumpliendo los requerimientos del estándar IEEE-519.

Yang et al. [5] diseñaron un enfoque de compensación multi-barras basado en sensibilidad armónica que permite simplificar la cantidad y tamaño de SAPF, consecuentemente se mejoraron los recursos. Se validó en la red IEEE 19 barras con excelentes resultados en términos de supresión de armónicos y eficiencia.

Yin et al. [6] abordaron los problemas desde el punto de vista de la incertidumbre usando un modelo de estimación del estado armónico y un algoritmo genético multiobjetivo. Con ello, lograron ubicar SAPF de manera eficiente con la menor cantidad de dispositivos posible mientras se cumplía con los límites de la distorsión. Por otro lado, sus simulaciones también se realizaron a través de Simulink[®].

Yang et al. [7] aplicaron un algoritmo de Enjambre de Partículas Multiobjetivo para resolver el desafío de optimizar en redes bajo varias fuentes de distorsión. Esta técnica se realizó en Matlab[®] para validar el modelo de optimización y fue comparado con algoritmos convencionales.

Gony et al. [8] compararon el algoritmo *Jellyfish Search Optimization* con *Particle Swarm Optimization (PSO)* y *Genetic Algorithms (GA)* en sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. Este estudio alcanzó un THD del 1,32 %, el cual mejora la confiabilidad y eficiencia del SEP analizado.

Wei et al. [9] también propusieron una idea innovadora: usaron la capacidad residual de los inversores solares para mitigar el armónico sin requerir *hardware* adicional. Cualquier cambio en la inyección de corriente compensatoria fue mediante el algoritmo PSO, causando una reducción máxima del 11,59 % de THD.

Ahmed et al. [10] enfocaron sus trabajos en redes industriales con alta penetración de energías renovables al comparar el rendimiento de los filtros activos con los pasivos. Su optimización con GA fue la ubicación y tamaño del filtro, mientras que hubo una clara mejora en la calidad de la energía.

Singh et al. [11] aplicaron algoritmos evolutivos con el propósito de ajustar controladores PI (proporcional-integral) de SAPF. Ante ello, efectuaron un criterio de minimización bajo la técnica PSO y la integral del error cuadrado ponderado para proporcionar el mejor rendimiento bajo condiciones de carga variables.

Arunsankar y Srinath [12] emplearon dos técnicas combinadas, una denominada algoritmo mejorado de optimización de Saltamontes y otra aplicando redes neuronales artificiales. Ambas sirven para mejorar el desempeño de SAPF ante variaciones de carga.

Por otro lado, Manasa et al. [13], propusieron la aplicación de un SAPF, junto con la estrategia de control basada en la teoría de las Id-Iq para llevar a cabo una compensación eficiente de las corrientes armónicas de las cargas no lineales. Utilizaron una técnica de generación de referencia basada en la transformación de Park, lo que posibilita la cancelación de las componentes indeseadas identificadas en tiempo real. Además, llevaron a cabo simulaciones donde demuestran la disminución significativa del THD. El trabajo de Bhowmik y Mukherjee [14], en comparación con Manasa et al. [13] no solo validó el SAPF experimentalmente en condiciones de carga desequilibrada bajo las teorías P-Q (potencias activa - reactiva) e Id-Iq, sino que también confirmaron que el Id-Iq brindaba una reducción más efectiva del THD y una mayor estabilidad. Además de un menor tiempo de respuesta, su investigación validó el SAPF en condiciones reales de sistemas y verificó un rendimiento más efectivo.

Finalmente, Patel et al. [15] presentaron un controlador adaptable basado en la lógica difusa y una versión alterada de la teoría de referencia síncrona para controlar un SAPF en fuente distorsionada. Al aplicar este método, las referencias de corriente compensadas se modifican dinámicamente para mantener bajas las THD, incluso frente a variaciones de la red o carga.

En Ecuador, el interés de estos estudios en SAPF es limitado. Por lo tanto, se propone estudiar la ubicación factible de los SAPF en los SEP a través del entorno de simulación Simulink[®] y modelos de prueba estandarizados basados en sistemas IEEE 69 barras.

1.3. Justificación

El aumento de cargas no lineales en la RDE está provocando problemas armónicos significativos que afectan la calidad de la energía y el rendimiento de los equipos eléctricos. Las estrategias tradicionales de supresión armónica, basadas en filtros de potencia pasivos, han demostrado ser ineficaces en redes con múltiples cargas no lineales distribuidas debido a su banda de frecuencia de compensación limitada.

Los SAPF ofrecen una solución más flexible y dinámica, capaz de ajustar sus características de filtrado en tiempo real para compensar armónicos de manera rápida y precisa. Sin embargo, la proliferación de cargas no lineales presenta un desafío considerable para los SAPF, ya que su efectividad depende de la ubicación y tamaño en la RDE.

1.4. Grupo objetivo

Este proyecto es particularmente relevante para aquellos que trabajan en la mejora y mitigación de armónicos en redes eléctricas, especialmente en entornos donde las cargas no lineales están distribuidas de manera amplia. El proyecto de implementación de un algoritmo adaptativo de escalamiento en la RDE para la localización y dimensionamiento de los SAPF está dirigido a ingenieros eléctricos, investigadores, y profesionales involucrados en la mejora de la calidad de la energía en redes de distribución.

Este proyecto también puede interesar a empresas de servicios públicos, organizaciones que operan redes eléctricas y fabricantes de dispositivos de filtrado.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Determinar la ubicación y el tamaño adecuado de los Filtros Activos de Potencia en Derivación SAPF en una red de distribución utilizando un método basado en

pasos adaptativos, con el fin de reducir la distorsión armónica de la red por debajo de los estándares estipulados en el estándar IEEE-519, minimizando la cantidad de SAPF necesarios.

1.5.2. Específicos

- **Análisis matemático:** Desarrollar y analizar la mejor factibilidad desde una perspectiva matemática para establecer un procedimiento completo y detallado que permita la ubicación y dimensionamiento de los SAPF en la red de distribución.
- **Implementación y simulación:** Implementar el método propuesto en un sistema de prueba IEEE y realizar simulaciones para evaluar la viabilidad.
- **Evaluación de Resultados:** Evaluar los resultados de la simulación sobre diferentes escenarios, considerando tanto cargas no lineales centralizadas como distribuidas en la red de distribución.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Redes de distribución eléctrica

El SEP es una infraestructura compleja diseñada para generar, transportar, distribuir y finalmente suministrar energía eléctrica a los usuarios finales. Estas a su vez se reflejan mediante la Figura 2.1 [16], [17].

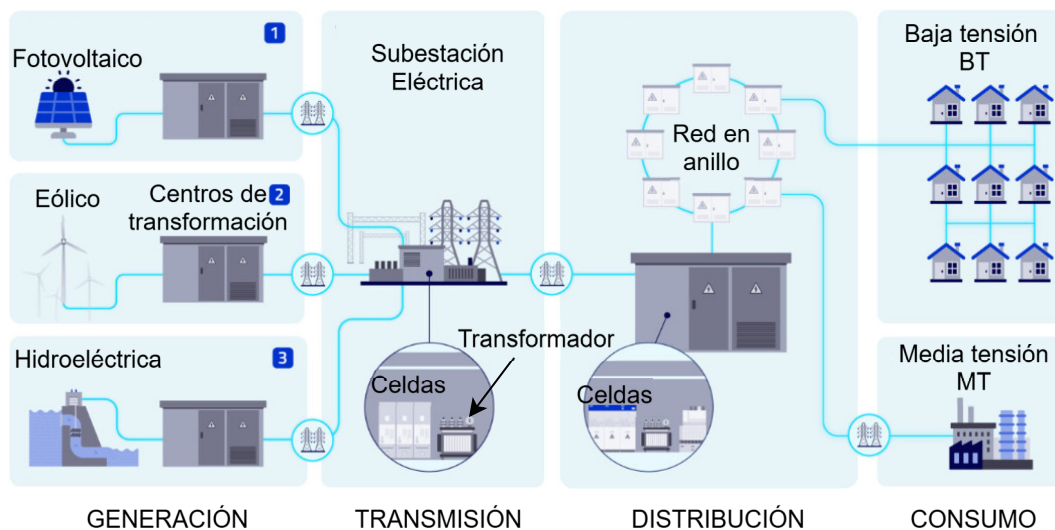


FIGURA 2.1: Etapas del SEP [17]

La generación eléctrica es el proceso mediante el cual se convierte una forma de energía primaria (hidráulica, térmica, eólica o solar) en energía eléctrica, generalmente en grandes centrales. Esta energía generada se transporta mediante redes de transmisión, que operan a tensiones elevadas para minimizar las pérdidas durante largas distancias. Posteriormente, la energía llega a subestaciones donde se reduce su nivel de tensión para ser entregada a las redes de distribución eléctrica (RDE), que

se encargan de llevar la electricidad desde los puntos de transformación hasta los usuarios residenciales, comerciales e industriales. Finalmente, en el consumo, la energía es utilizada por las diferentes cargas conectadas al sistema, cuyas características influyen directamente en la calidad del suministro [17].

La generación distribuida *Generación Distribuida (GD)* o descentralizada es un enfoque en el que la electricidad es producida a través de múltiples fuentes y es desplegada cerca del consumo de energía. La GD es instalada o integrada directamente en la línea de distribución del SEP, tal como se ilustra en la Figura 2.2; en lugar de estar en la etapa de generación, lo que la hace más adecuada para ser conectada a la RDE y para un uso de energía a autogenerada. Cuando la fuente de energía contribuyente es instalada cerca del punto de servicio, los beneficios de la GD son múltiples. No solo se reducen los gastos y se disminuye las pérdidas generadas por el transporte sino que también se liberan las inmensidades de transporte de electricidad, con la desventaja generada por la congestión, y se mejora la confiabilidad del sistema de redimensionado gracias a la distribución de las fuentes productoras del sistema generador del impacto en caso de un fallo [17].

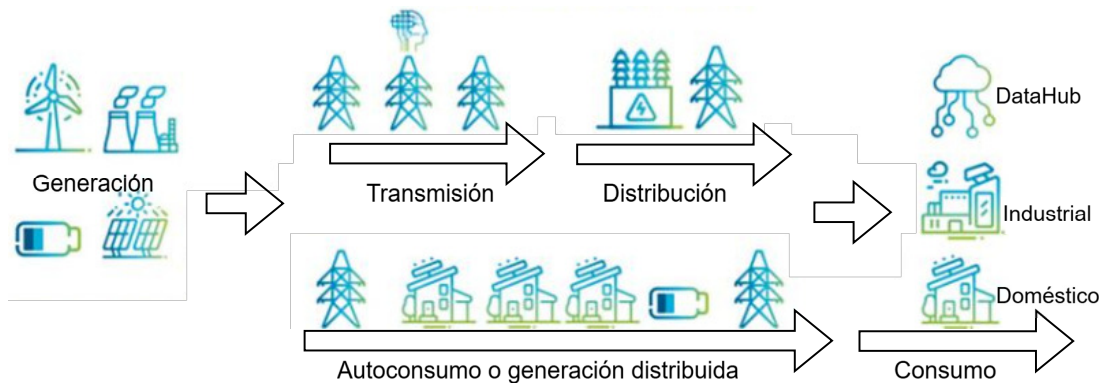


FIGURA 2.2: Etapas del SEP con GD [17]

Dentro de este mismo conjunto, la RDE es la etapa final de este proceso, cumpliendo un rol sumamente importante en torno a suministrar energía de forma segura y confiable. Distribuir energía desde las subestaciones eléctricas a los centros de consumo es su función básica [17]. A diferencia de las redes de transmisión, las RDE operan a niveles de tensión más bajos [18]:

- *Alta Tensión (AT)*: (40-138 kV).
- *Media Tensión (MT)*: (0,6-40 kV).

- *Baja Tensión (BT)*: (menor a 0,6 kV), siendo la MT y BT las más comunes para el suministro urbano e industrial.

2.2. Armónicos

Estas son perturbaciones que sucede tanto en la señal de onda del voltaje y corriente, causados por la frecuencia múltiple de la fundamental a 50/60 hertz [19]. Normalmente, aparecen cuando una carga no lineal interactúa con la señal sinusoidal fundamental, alterando su forma de onda, tal como se visualiza en la Figura 2.3 [20].

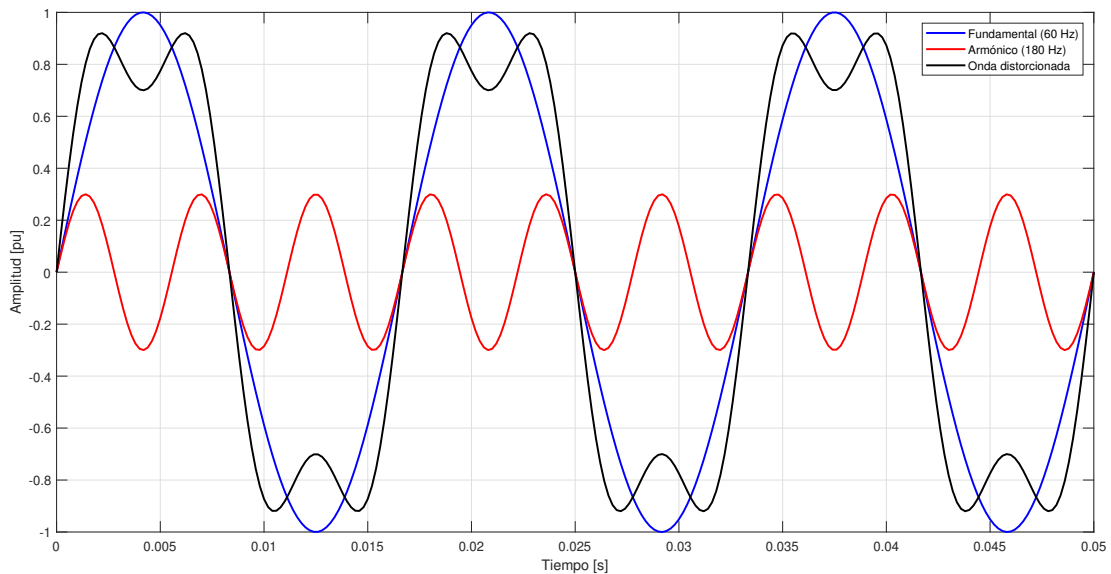


FIGURA 2.3: Distorsión armónica (HD)

La Figura 2.4 muestra la onda fundamental de 60 Hz y su interacción con armónicos de números impares ascendentes. Dichos armónicos son armónicos de tercer orden a armónico de vigésimo tercer orden respectivamente: 180 Hz, 300 Hz, 420 Hz, y así sucesivamente, hasta 1380 Hz. A medida que la frecuencia de los armónicos agregados aumenta, la onda combinada comienza a mostrar distorsiones más graves y oscilaciones alrededor de la señal fundamental. Este es un ejemplo sencillo de cómo la presencia de armónicos causa “impureza” en la señal sinusoidal: la onda expresada deja de replicar el movimiento suave y oscilante, consistente principalmente en el valor máximo / mínimo de la señal.

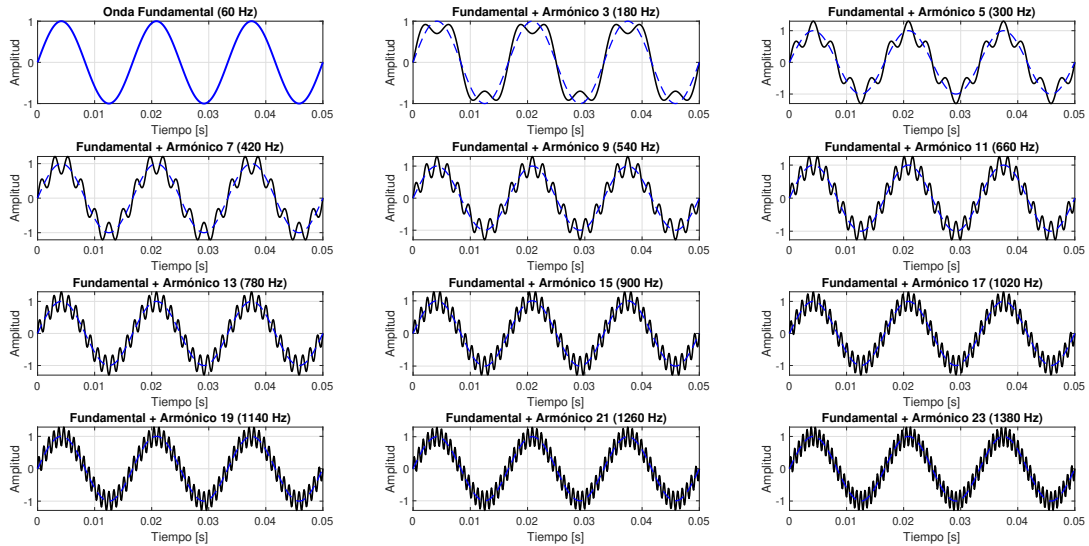


FIGURA 2.4: Armónicos n: 1 - 25

2.2.1. Características

Las características principales de la *Harmonic Distortion (HD)* incluyen su periodicidad, su energía finita, y su permanencia en el tiempo. La presencia de armónicas puede analizarse mediante el teorema de Fourier, que descompone cualquier señal periódica en una suma de senoidales: la componente fundamental (1ra armónica) y sus múltiplos superiores. Se puede considerar como 3 tipos de señal, baja, media (por ejemplo, 3ra, 5ta y 7ma) y alta frecuencia que es superior al 25vo armónico [20]. Además, la magnitud y la frecuencia de estas componentes dan la cantidad de su impacto en el sistema, mientras que estas armónicas de baja orden son más comunes en las RDE; no obstante, las de alto orden son más peligrosas, ya que afectan a los sistemas de comunicación y control [21].

Las ondas simétricas se forman por armónicos impares, mientras que las asimétricas incluyen ambas, es decir, pares e impares. El análisis se realiza normalmente con herramientas como la transformada rápida de Fourier para obtener el espectro armónico [20].

Al ser una onda distorsionada, esta puede originar ciertos inconvenientes en ciertos equipos eléctricos como sobrecalentamiento en motores y transformadores, la inducción de una resonancia en los sistemas capacitivos, causando más armónicos de corriente y afectando el funcionamiento de los sistemas [22]. Otra falla, que es crítica, es la inducción de una interferencia electromagnética, este afecta al sistema

de control y el circuito electrónico activo. Otro daño menor incluye la disminución del *Factor de Potencia (FP)* y el aumento de las pérdidas efectivas debido a que la energía no es transferida adecuadamente [21].

En un circuito de corriente alterna se define el FP como la razón entre las potencias, activa P y aparente S_1 , tal como se muestra en la ecuación 2.1 y Figura 2.5 [23].

$$FP = P/S_1 \quad (2.1)$$

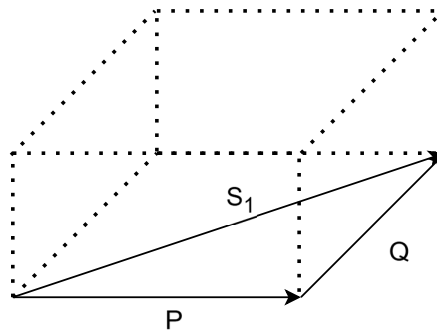


FIGURA 2.5: Triángulo de potencias P , Q y S_1

Cuando el circuito es lineal, se dice que tanto el voltaje como la corriente presentan formas de onda senoidales perfectas; por ende el coseno del ángulo (φ) se forma a través de los fasores de voltaje \hat{V} y corriente \hat{I} , tal como se define en la ecuación 2.2 [23].

$$FP = \cos(\hat{V} - \hat{I}) = \cos(\varphi) \quad (2.2)$$

En cambio, si se tiene cargas no lineales, la forma onda deja de ser una senoidal pura debido a que ese tipo de cargas crean corrientes armónicas. Bajo este aspecto S estaría compuesto por P , Q y una potencia que genera la distorsión, denominada como D , visto en la ecuación 2.3 y Figura 2.6 [23].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.3)$$

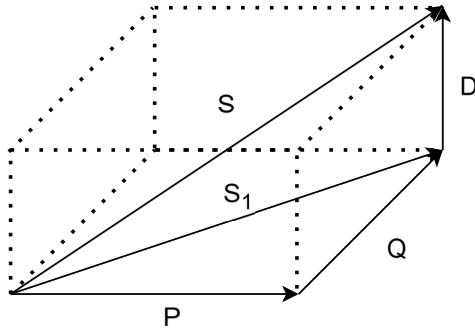


FIGURA 2.6: Triángulo de potencias P , Q , D y S

2.2.2. Clasificación según la secuencia de los fasores

A través de la Figura 2.7 se muestra la clasificación de los armónicos según la secuencia de los fasores, donde cada uno de ellos se describe a continuación:

		n							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Armónicas	Secuencia directa	h= 4	7	10	13	16	19	22	25
	Secuencia inversa	h= 5	8	11	14	17	20	23	26
	Homopolares	h= 3	6	9	12	15	18	21	24

FIGURA 2.7: Armónicos según la secuencia de los fasores

■ Armónicas de secuencia directa ($3n+1$)

Las armónicas de secuencia directa, son aquellas para las cuales el orden de la armónica está dado por la expresión $h = 3n + 1$, donde n es un número entero positivo. Es importante destacar que para estas armónicas, la rotación de fase es la originalmente presentada por el sistema trifásico, es decir, ocupa la misma secuencia de fase que la fundamental [24], [25].

En un sistema balanceado, este tipo de armónicas pueden acumularse y amplificarse en determinados puntos de la red, causando perturbaciones sutiles. Puesto que no se eliminan de manera natural con las armónicas inversas y

triples, su control es significativamente importante en presencia de cargas no lineales [26].

- **Armónicas de secuencia inversa ($3n+2$)**

Las armónicas de secuencia inversa son armónicos de orden $h = 3n + 2$ y giran en dirección contraria al giro de la señal fundamental. Por lo tanto, generan un par de frenado en motores de inducción, reduciendo su eficiencia y calor. Pueden ser especialmente perjudiciales para equipos rotatorios porque crean una vibración mecánica [24], [25].

Además, las armónicas de secuencia inversa crean un desequilibrio en una corriente en un sistema trifásico, incluso cuando la carga parece estar equilibrada. Las corrientes de secuencia negativa afectan el flujo de energía y acortan vida de un sistema eléctrico [26].

- **Armónicas homopolares ($3n$)**

Al ser armónicas de la forma $h = 3n$, implica tener la misma fase del sistema trifásico. Son un tipo de armónicas común y peligroso, debido a que generan una sobrecarga en el neutro, ya que la corriente en el mismo incrementa directamente. Suelen aparecer cuando se poseen nodos monofásicos conectados a sistemas trifásicos. No suelen anularse entre en fases. Por ende, poseen la capacidad de desplazar corriente entre el neutro o entre tierras, lo cual es extremadamente peligroso si se asocia al problema de la generación de interferencias electromagnéticas. Cabe destacar que estas corrientes demasiado altas corren riesgo el mecanismo de puesta a tierra, lo que podría incluso generar disparos de protecciones innecesarios [26].

2.2.3. Tipo de cargas

Principalmente, las cargas eléctricas se dividen en lineales y no lineales. Al trabajar, las cargas lineales, como resistencias, capacitores e inductores, exhiben una relación proporcional entre la corriente y el voltaje, de acuerdo con la ley de Ohm, y conservan la forma sinusoidal de la señal. Las cargas no lineales, por otro lado, generan corrientes que no guardan proporción con el voltaje aplicado, alteran la forma de onda y causan la aparición de armónicos en la red eléctrica. Tales deformaciones son características de la mayoría de los dispositivos electrónicos modernos, como: *Variable Frequency Drive (VFD)*, hornos de inducción, fuentes de alimentación conmutada, computadoras y lámparas electrónicas, que funcionan a través de la electrónica de potencia [21].

La presencia y ocurrencia de tales ineficiencias pueden afectar significativamente la calidad de la energía, en particular, en líneas de alta impedancia, donde se amplifica una pequeña distorsión. Este fenómeno es especialmente pronunciado en redes de BT con una penetración digital significativa. Además, las fuentes renovables con inversores de corriente continua intercambiable a alterna, como los paneles solares y las turbinas eólicas, también generan armónicos durante la conmutación electrónica. Si los armónicos generados por las cargas se combinan con las impedancias de la red y caen en vibraciones resonantes, pueden interrumpir el sistema [4].

Las cargas no lineales son la causa fundamental de la distorsión de la forma de onda de corriente y, al hacerlo, generan armónicos que perturban la calidad de la energía eléctrica. La naturaleza y magnitud de los armónicos generalmente son diferentes con respecto al tipo y la gravedad, ya que depende más del dispositivo electrónico, tal como se describe en la Tabla 2.1, donde:

- A: VFD con control *Pulse Width Modulation (PWM)*.
- B: cargador de batería industrial.
- C: iluminación LED (diodo emisor de luz, por sus siglas en inglés).
- D: impresora láser.
- E: soldadora por arco.
- F: rectificador 6/12 pulsos.
- G: VFD-PWM de 6 pulsos.
- H: Fuente de alimentación conmutada.
- I: Ordenador personal.
- J: lámparas fluorescentes

TABLA 2.1: Contenido armónico típico de diferentes cargas no lineales

Orden armónica	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
3			14.5	5.2				81	57	28.7
5	30-50	35	12.8	6	10.5	20 / ...	25-47	60.6	38	2.6
7	15-25	22	11.1	3.9	9.2	14.3 / ...	16	37.5	23	2.2
9		8.2	5.6	1.8				15.7		
11	5.3	7.5	3.2	1.3	6.5	9.1 / 9.1	8.7	2.4	2.3	
13	3.2	5	2.1	0.9	5.7	7.7 / 7.7	4.5	6.3	6	
15	2.1	3.3						7.9		
17	1.5	2.4				3.6 / 5.9	3.7			
19	1.2	1.8				2.9 / 5.3	1.9			
THD	48	65	30	14	43	28 / 14.3	51	116	75	29

2.2.4. Cuantificación

La HD puede ser medible, en base a los siguientes parámetros [1]:

- Valor eficaz (X_{rms}), *Root Mean Square (RMS)*: representa la medida de la energía total contenida en una señal eléctrica, incluyendo tanto la onda fundamental y armónicas presentes en el sistema. A través de la ecuación 2.4 se determina la potencia real que atraviesa el sistema distorsionado.

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2} \quad (2.4)$$

- Cofactor de distorsión (C_d) que se calcula bajo la expresión de la ecuación 2.5.

Este cuantifica la proporción de HD en relación con la energía total de la señal. Es útil para caracterizar señales donde la THD no refleja completamente la severidad de la distorsión.

$$C_d = \frac{X_{\text{rms}}^2 - X_1^2}{X_{\text{rms}}^2} \quad (2.5)$$

- THD: esta medición expresa qué tan distorsionado se encuentra una señal con respecto a la onda fundamental y se calcula mediante la ecuación 2.6.

$$\text{THD}_x = \frac{\sqrt{X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2}}{X_1} \quad (2.6)$$

- *Individual Harmonic Distortion (IHD)*: representa la contribución específica de cada componente en base a la señal fundamental de voltaje o corriente. A su vez se expresa de manera porcentual (ver Figura 2.8) y con ello, se puede identificar qué orden de armónico tiene mayor impacto en la onda distorsionada. El estudio del contenido armónico en una señal de corriente o voltaje se realiza mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés). Esta herramienta matemática permite descomponer la señal original en su componente fundamental y en las distintas componentes armónicas que la conforman. El resultado de este análisis se representa a través de un espectro armónico, generalmente en forma de gráfico de barras, donde se compara la magnitud de cada armónico con respecto a la fundamental. Este método no solo facilita la identificación de los armónicos más significativos presentes en la señal, sino que además constituye la base para calcular indicadores clave de la calidad de la energía, como la Distorsión Armónica Total IHD y la Distorsión Armónica Individual IHD.

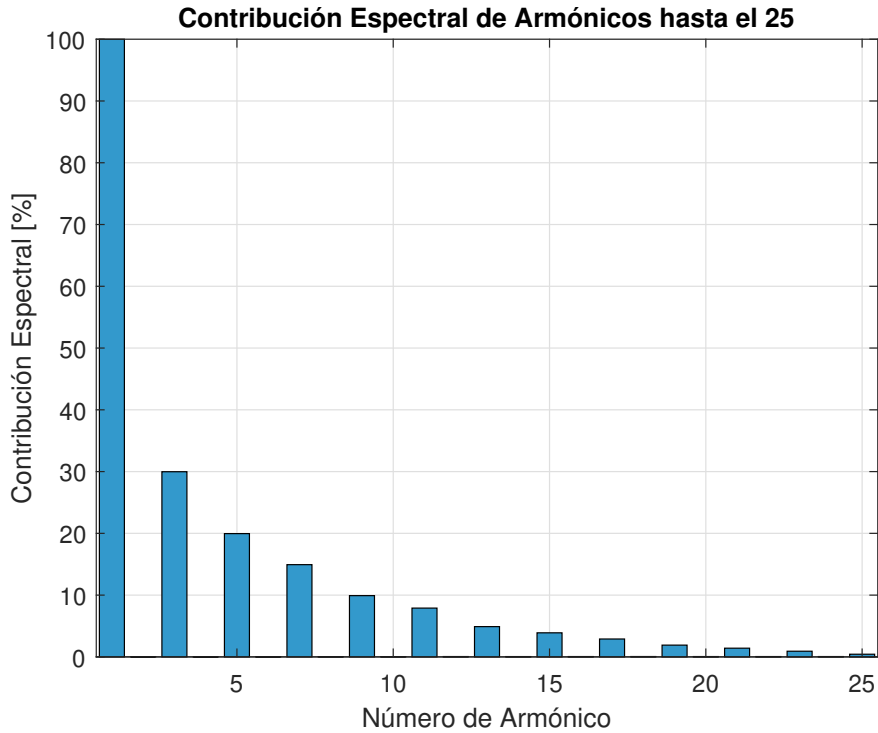


FIGURA 2.8: Distorsión armónica individual

En la ecuación 2.7 se tiene una fórmula para calcular la distorsión individual en corriente.

$$\text{THD}_{I,h} = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \% \quad (2.7)$$

Donde:

- I_h es la magnitud eficaz de la corriente en el armónico de orden h .
- I_1 es la magnitud eficaz de la corriente fundamental.

La distorsión individual para cada armónica de voltaje se calcula mediante la ecuación 2.8.

$$\text{THD}_{V,h} = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \% \quad (2.8)$$

Donde:

- V_h es la magnitud eficaz del voltaje armónico de orden h .
- V_1 es el voltaje fundamental.

2.3. Filtros de potencia

Estos elementos se destacan para reducir o eliminar perturbaciones que aparecen en las señales de voltaje y corriente. Generalmente, causados por armónicos, interferencias electromagnéticas o variaciones de carga Salmerón. Los filtros de potencia pueden ser pasivos, activos y/o híbridos. Los primeros se conforman de elementos lineales RLC (resistencia-inductancia-capacitancia); a pesar de ser económicos suelen tener limitaciones ante la poca flexibilidad de fluctuaciones de carga, sensible a la impedancia de la red y por último, puede originar resonancia con el SEP [27].

En cambio, los filtros activos (ver Figura 2.9) emplean dispositivos electrónicos como *Voltage Source Inverter (VSI)* junto a sensores y técnicas de control capaces de realizar un monitoreo y mitigar los armónicos detectados [28]. Además, tienen la capacidad de adaptarse dinámicamente a las condiciones del sistema, lo que les permite tratar problemas de calidad de energía de manera más eficiente que los filtros pasivos, incluida la HD, un bajo FP y el desbalance de corriente. Funcionan en la detección de componentes armónicas de la carga; generan, en tiempo real, una corriente de magnitud igual pero de fase opuesta a cada armónico; así logran el efecto de cancelación [29].

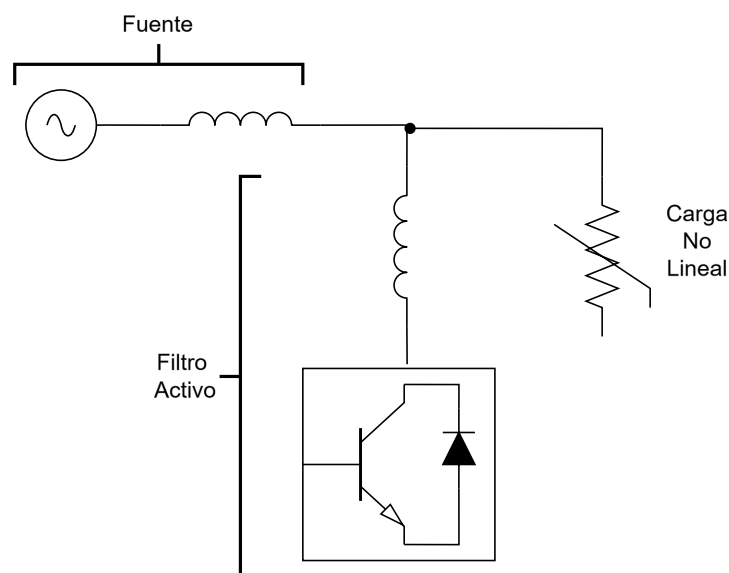


FIGURA 2.9: Filtros de potencia activos en derivación SAPF [30]

Finalmente, existen filtros híbridos compuestos por las 2 configuraciones antes mencionadas, como se ilustran en la Figura 2.10. Este en cambio tiene como función suprimir armónicos específicos de baja frecuencia, mejorar el FP de la red y compensar

armónicos restantes [30].

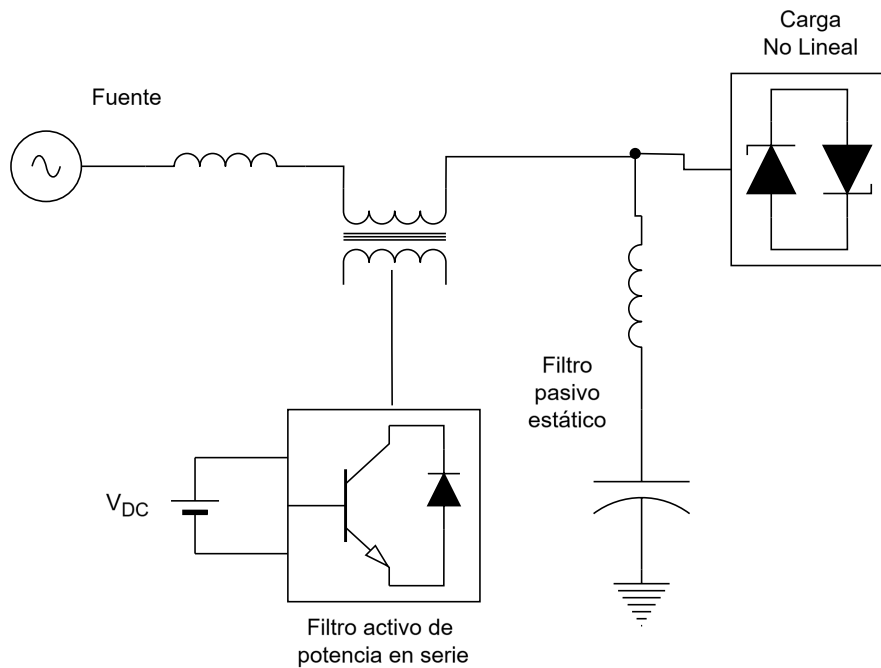


FIGURA 2.10: Filtros híbridos [31]

2.4. Topologías comunes de los SAPF

Los SAPF son dispositivos electrónicos diseñados para eliminar los armónicos y corregir el FP dentro de un sistema eléctrico a través de la inyección de corrientes compensatorias en paralelo con la RDE. Las distintas topologías de los SAPF son capaces de modificar la forma en la que operan para adaptarlo a diferentes condiciones de carga, niveles de tensión y configuraciones de la red; esto con el objetivo de mejorar la calidad de la energía de potencia generada o consumida y estar de acuerdo a estándares como la IEEE-519 [32].

2.4.1. SAPF trifásico de 3 hilos

Es una topología diseñada para redes trifásicas balanceadas sin conductor neutro. En este caso, se compensan únicamente las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa. Por lo tanto, esta topología es más sencilla y de menor costo debido al menor número de sensores de corriente y la capacidad de conmutación, comparada con la configuración de 4 hilos [33].

La principal ventaja de la topología es su costo y simplicidad. Esta topología no puede compensar corrientes desequilibradas o armónicos de secuencia cero. Se utiliza para sistemas donde todas las cargas son balanceadas, como en motores trifásicos y VFD en los entornos comerciales e industriales más comunes [33].

2.4.2. SAPF trifásico de 4 hilos

Esta configuración se diseña para compensar corrientes armónicas en sistemas trifásicos con cargas desequilibradas y presencia de neutro. A diferencia de SAPF de 3 hilos, es capaz de compensar las componentes de secuencia cero y suprimir corrientes en el conductor neutro. Para su operación, se requiere de un inversor con 4 brazos o la inyección de corriente en el neutro.

Además, ofrece como principal ventaja una compensación completa de armónicos, desequilibrios y corriente de neutro, mostrándose ideal para sistemas con predominante número de cargas monofásicas. Entre sus desventajas se encuentra un mayor costo y complejidad de control y un aumento en los requerimiento de sus componentes electrónicos. Es utilizado sobre todo para instalaciones comerciales, centros de datos y edificios que cuentan con varios equipos monofásicos conectados.

2.4.3. SAPF multinivel trifásico

Otra variante de los SAPF es el denominado multinivel, el cual usa inversores que generan voltajes a varios niveles, por lo que puede aproximarse mejor a la señal sinusoidal. En consecuencia, tanto el contenido armónico de la señal de salida del filtro como el esfuerzo dieléctrico sobre los interruptores disminuyen. Los SAPF multinivel suelen estar contruidos con topologías en cascada (ver Figura 2.11), diodo-clamp o *flying* capacitor [34].

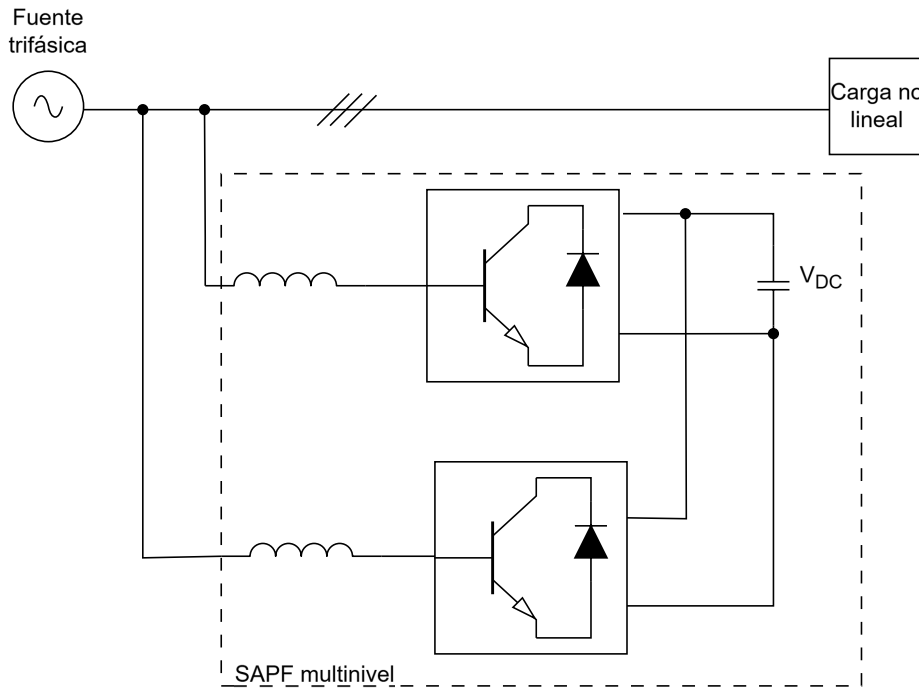


FIGURA 2.11: SAPF multinivel [34]

Entre sus ventajas se encuentra la menor distorsión armónica, la menor necesidad de filtrado pasivo y la mayor eficiencia de conmutación. Sin embargo, tienen un diseño y control más complejo, un mayor número de interruptores y fuentes de voltaje. Los SAPF de multinivel son utilizados en aplicaciones de MT y AT como parques industriales, subestaciones y otros sistemas de energía renovable [34].

2.4.4. SAPF con VSI

La estructura de topología comúnmente utilizada en los SAPF emplean un VSI. La configuración básica de un VSI típico, basado en SAPF. En general, el SAPF se conecta a un SEP contaminado por armónicas en un punto PCC (terminación de acoplamiento común), que es la zona entre la fuente de alimentación y la carga generadora de armónicas (carga no lineal), visto en la Figura 2.13 [32].

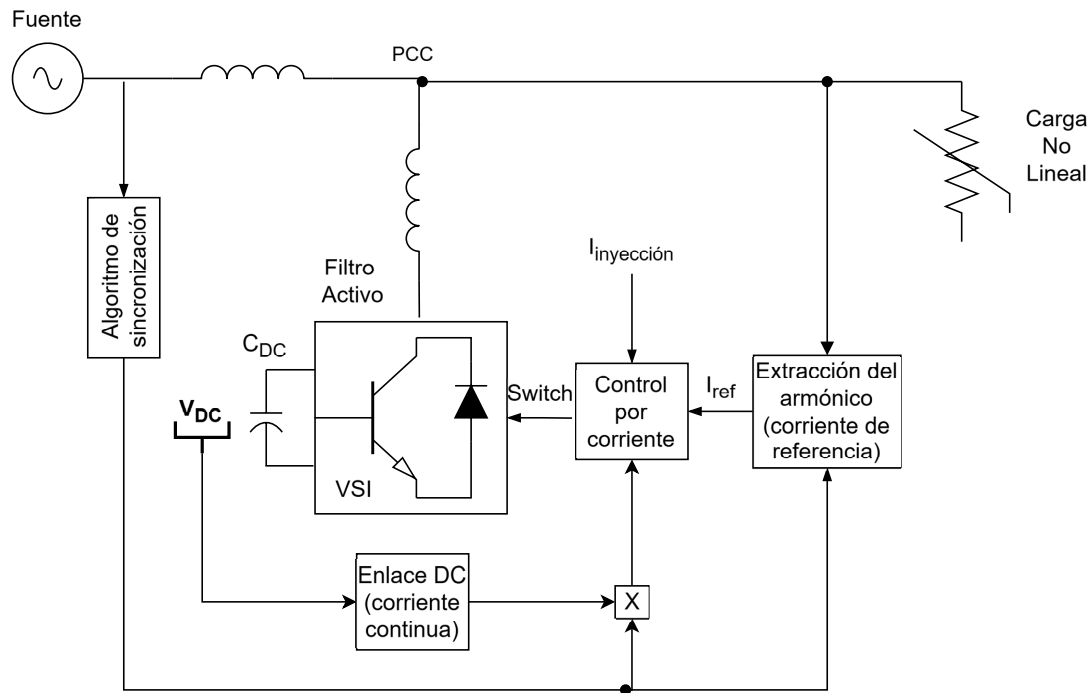


FIGURA 2.12: Sistema de control SAPF basado en VSI

2.4.5. SAPF con *Current Source Inverter CSI*

Esta configuración emplea un inversor que suministra corriente directamente regulada, denominada *Current Source Inverter (CSI)*, así como la inductancia del lado de corriente continua. Además, se utiliza en los casos en los que es de suma importancia regular la corriente. Para la implementación de esta CSI, se necesitarán interruptores que puedan mantener la corriente directa [34].

La principal ventaja se relaciona con la resistencia al cortocircuito y un rendimiento estable en la alta corriente. Sin embargo, no es posible mejorar la respuesta, y es mucho más complicado para los altos armónicos. Por último, se emplean en sistemas eléctricos a gran escala o se mantiene un sistema con alta inductancia [34].

2.4.6. SAPF trifásico híbrido

Esta topología busca aprovechar los beneficios de ambos tipos de filtros, al combinar activos con pasivos sintonizados o de paso bajo. Mientras que el filtro activo descompone los armónicos no compensados y las irregularidades dinámicas, el

filtro pasivo lo realiza atenuando selectivamente los armónicos de bajo orden. De esta manera, se alcanza una solución más eficaz y económica en algunas situaciones [34].

Los beneficios suelen ser el menor costo en comparación con una SAPF 100% activa y la mejor compensación en un rango de frecuencia más amplio. Lo negativo son las resonancias con la red posibles y se necesita un diseño exhaustivo para prevenir la inestabilidad. Se usan en sistemas de distribución que conocen los armónicos predominantes, tales como la instalación de soldadoras industriales o VFD [34].

2.5. Métodos de optimización matemática

2.5.1. Programación lineal

La programación lineal es un método matemático utilizado para maximizar o minimizar una función dado un conjunto de restricciones que limitan las posibles soluciones. En términos generales, se puede describir lo siguiente [35]:

$$\begin{aligned} &\text{Optimizar } Z = CX \\ &\text{s.a. } \begin{cases} AX \leq B \\ X \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.9)$$

- Función Z , que es el objeto a maximizar/minimizar, visto en la ecuación 2.9.
- Un vector de costos unitarios C de n componentes definidos como

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$$

- Las restricciones del problema, con una matriz de coeficientes A (con n columnas y m filas a_{ij} , son elementos de A , para todo $i = 1, 2, \dots, m$ y $j = 1, 2, \dots, n$), que refleja la disponibilidad de recursos B y la limitación dada por el sistema, donde

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$$

- Las condiciones de no negatividad a través de las variables de decisión X que

indican no tener un valor negativo; donde

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

Esto proporciona un sistema que formaliza un problema en ecuaciones que reflejan una situación real y que se pueden resolver utilizando algoritmos de mejora [35].

2.5.2. Algoritmo adaptativo a pasos SSAA

Step Size Adaptive Algorithm (SSAA) es una técnica en la que el tamaño de paso de integración se ajusta dinámicamente en cada punto de simulación en función de la aparición de eventos asincrónicos. La Figura 2.13 presenta el funcionamiento operativo del SSAA aplicado a la simulación en tiempo real de sistemas electrónicos de potencia. El eje de ordenadas es la situación en tiempo recostado por nodos de integración, y en el eje de abscisas es la variable de interés, a saber, la corriente del *switch*. Los cuadrados negros son las soluciones finales encontradas en puntos de muestreo regular y los blancos son intermediarios obtenidos por interpolación en instante cuando se realiza un evento asincrónico [36].

En la primera fase, el proceso de integración se desarrolla normalmente entre los puntos $t(k-1)$, $t(k)$ y $t(k+1)$ utilizando la integración exponencial. Aunque durante ese procedimiento se logra mejorar la precisión y disminuir las oscilaciones numéricas en comparación con los métodos trapezoidales convencionales, si un evento asincrónico tiene lugar temprano dentro del intervalo $[t(k), t(k+1)]$, el valor de las variables en la hora exacta del cambio se debe determinar, se designa como $t_d(k)$. Una interpolación lineal se observa en la Figura 2.13 (ver flechas de color azul).

Luego, se incorpora el paso adaptativo a fin de mantener la sincronización con los verdaderos puntos de muestreo en tiempo real. Desde el tiempo de $t_d(k)$, el SSAA ajusta dinámicamente el tamaño de paso a $(1+x)\Delta t$, lo que implica que se integra directamente para el tiempo $t(k+2)$. Indicado por la ruta que sigue la línea roja punteada, esta operación teniendo en cuenta, no requiere el uso de extrapolación. Además, con la ayuda del parámetro θ , que depende de la duración del tiempo, la matriz de Admitancia del sistema no cambia, lo que disminuye la carga computacional.

Así, la Figura 2.13 muestra que la combinación eficiente de interpolación e

integración adaptativa del SSAA permite al método hacer frente a eventos asincrónicos. Ocasionalmente, la simulación en tiempo real se vuelve mucho más precisa, sin errores numéricos y más estable, ya que la solución se ajusta directamente a los puntos de muestreo, lo que elimina el proceso de extrapolación al promediar las soluciones y garantiza la eficiencia computacional del método.

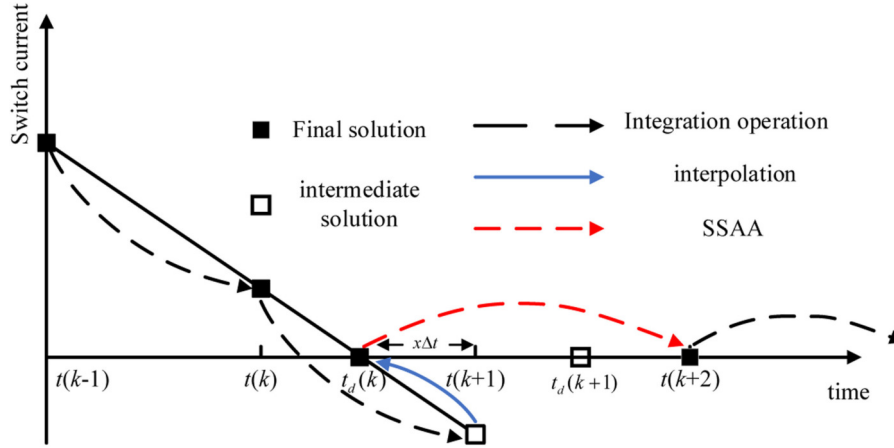


FIGURA 2.13: Algoritmo adaptativo a pasos [36]

2.6. Normativa IEEE 519/2022

El estándar IEEE-519 define los límites permisibles de HD en redes de suministro eléctrico, debido a la gravedad de la incompatibilidad entre equipos y el suministro, y con la finalidad de proteger el equipamiento y la red en general. En la Tabla 2.2 se muestran los límites permitidos de la distorsión armónica, THD e individual IHD para cada barra en cierto rango de tensión [1].

TABLA 2.2: Límites IHD y THD de voltaje

V_{bus} kV	IHD (%)	THD (%)
$V_{\text{bus}} \leq 1$	$IHD_1 = 5$	$THD_1 = 8$
$1 < V_{\text{bus}} \leq 69$	$IHD_1 - 2$	$THD_1 - 3$
$69 < V_{\text{bus}} \leq 161$	$IHD_1 - 3,5$	$THD_1 - 5,5$
$161 < V_{\text{bus}}$	$IHD_1 - 4$	$THD_1 - 6,5$

El estándar define las fuentes de armónicas en función de su nivel de corriente en comparación con la corriente de falla, y las autoriza con reglas dependiendo de dicha relación. Del mismo modo, y en tanto que el nivel de corriente máxima permitida

para cualquier armónico individualmente. En la Tabla 2.3 se visualiza los límites permitidos de la corriente de cortocircuito I_{SC} con relación a la fundamental I_L , para distintos grados en el armónico. *Total Demand Distortion (TDD)* se expresa como porcentaje y se calcula como la razón de los componentes armónicos de corriente en un intervalo no superior a 30 minutos. A diferencia de la distorsión armónica total de corriente (THD_I) el cual mide un valor instantáneo; la TDD normaliza sus armónicos con la intensidad de corriente de demanda máxima del sistema [1].

TABLA 2.3: Distorsión máxima de corriente armónica del sistema entre 0,12 a 69 kV

I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	TDD
< 20	A=4	B=2	C=1,5	D=0,6	E=5
$20 < 50$	A+3	B+1,5	C+1	D+0,4	E+3
$50 < 100$	A+6	B+2,5	C+2,5	D+0,9	E+7
$100 < 1000$	A+8	B+3.5	C+3,5	D+1,4	E+10
> 1000	A+11	B+5	C+4,5	D+1,9	E+15

En relación con proyectos vinculados a los algoritmos como localización y diseño implementados por Abbas et al. [3] y Yang et al. [5], el cumplimiento del estándar IEEE-519 es un requisito fundamental. Esto asegura el cumplimiento ante la disminución de los armónicos, protegiendo la integridad de la RDE y usuarios.

CAPÍTULO 3

CALCULO DEL SAPF

3.1. Algoritmo de mejora con paso adaptativo

Este algoritmo (ver Figura 3.1) busca determinar la ubicación de los SAPF en una RDE para minimizar la distorsión armónica con el menor número de filtros posibles. A continuación, se describen los pasos:

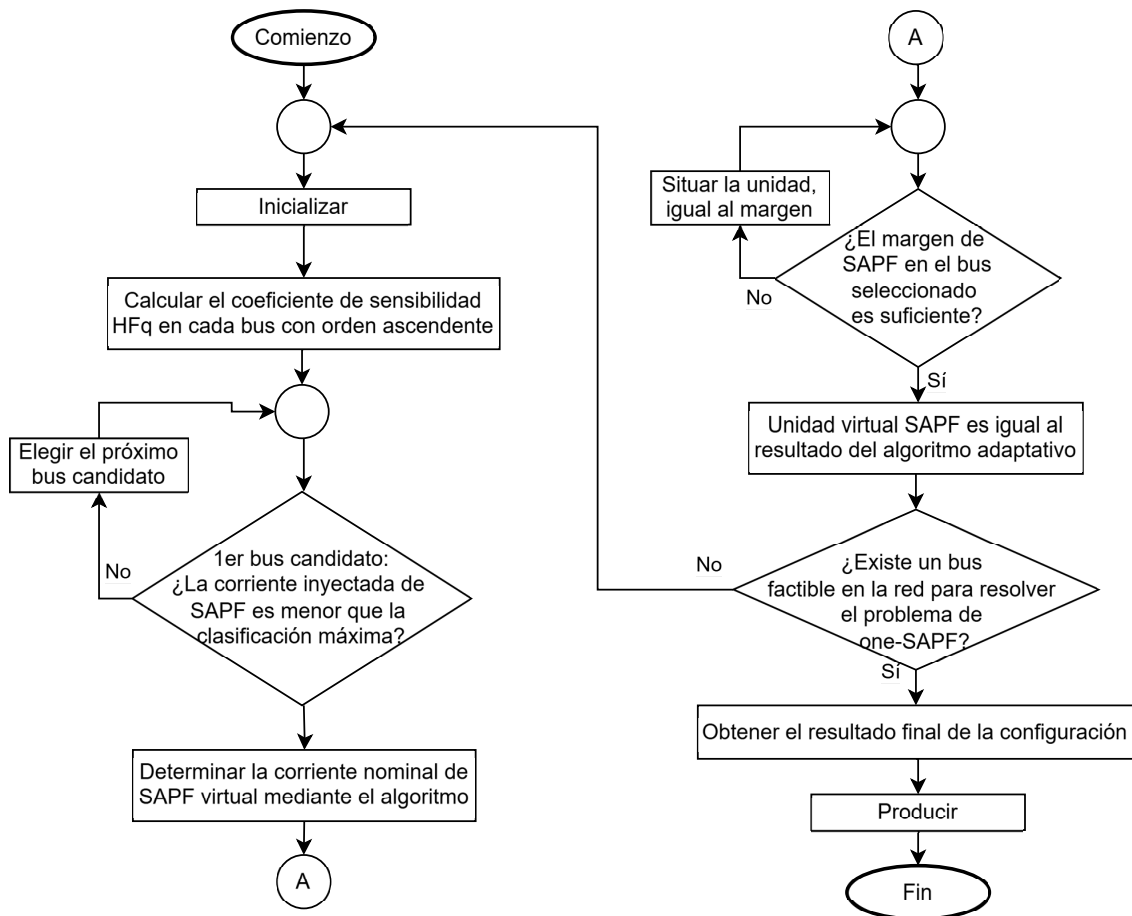


FIGURA 3.1: Procedimiento de ubicación y tamaño de SAPF con paso adaptativo

Pasos 1. Inicializar el modelo.

El proceso comienza sin carga armónica y, luego se generan señales armónicas para simular cargas en 5 barras diferentes. A partir de ese punto, se procede al cálculo de THD e IHD.

Paso 2. Selección del bus candidato.

Se calcula la amplitud y fase de corriente, y se prioriza el bus con mayor sensibilidad.

Paso 3. Dimensionamiento de la unidad.

Se calcula la corriente compensatoria necesaria para mitigar la corriente armónica en la barra seleccionada, con el fin de atenuar la componente armónica objetivo y cumplir los límites de la norma IEEE-519.

Paso 4. Iteración y condición de parada.

Se inyecta el SAPF y se evalúan los nuevos niveles de distorsión. Se repite el proceso hasta que se cumple la norma IEEE-519.

Paso 5. Cumplimiento del estándar.

Al finalizar el proceso iterativo, la red debe cumplir con la normativa IEEE-519.

3.2. Procedimiento

3.2.1. Conversiones y base por unidad

En esta etapa se procede a calcular los valores base de la red eléctrica, ya que a partir de ellos es posible expresar todos los parámetros del sistema en el sistema por unidad (pu). La potencia base se obtiene con la ecuación 3.1, mientras que la tensión base corresponde al valor línea-línea definido en la ecuación 3.2. Finalmente, a partir de estos dos parámetros se determina la corriente base trifásica, tal como se muestra en la ecuación 3.3. El uso del sistema por unidad resulta especialmente

ventajoso porque permite comparar magnitudes de manera directa y, al mismo tiempo, simplifica los cálculos asociados al flujo de potencia y al análisis de armónicos.

Potencia base

$$S_{\text{base}} = \text{baseMVA} \times 10^6 \quad (3.1)$$

- S_{base} : Potencia base trifásica en VA.
- baseMVA : Potencia base en MVA.

Tensión base

$$V_{\text{base}} = V_{LL,\text{base}} \quad (3.2)$$

- V_{base} : Tensión base línea–línea en voltios (V).

Corriente base

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base}}}{\sqrt{3} V_{\text{base}}} \quad (3.3)$$

- I_{base} : Corriente base trifásica en amperios (A).
- S_{base} : Potencia base en VA.
- V_{base} : Tensión base en voltios.

3.2.2. Modelo de Línea (Modelo π en pu)

¿Qué es el modelo π ?

El modelo π se utiliza como una representación equivalente de las líneas de transmisión en los sistemas eléctricos. Su nombre proviene de la semejanza con la letra griega π , ya que consta de una impedancia en serie ubicada en el centro y dos admitancias en derivación colocadas en los extremos.

La admitancia serie de la línea se obtiene a partir de la resistencia y la reactancia expresadas en pu, según la ecuación 3.4. De manera complementaria, la admitancia en derivación o shunt de cada extremo se determina con la ecuación 3.5. Con estos valores es posible construir la matriz de admitancias nodales Y_{bus} , cuya actualización de elementos se describe en las ecuaciones 3.6, 3.7, 3.8, 3.9. Esta matriz resulta fundamental en el análisis del sistema eléctrico, pues permite modelar su comportamiento global a partir de los parámetros de cada línea.

3.2.2.1. Admitancia serie de la línea

$$y = \frac{1}{r + jx} \quad (3.4)$$

- y : Admitancia serie de la línea en pu.
- r : Resistencia de la línea en pu.
- x : Reactancia de la línea en pu.

3.2.2.2. Susceptancia shunt por extremo

$$Y_{sh,ext} = j \frac{b_{sh}}{2} \quad (3.5)$$

- $Y_{sh,ext}$: Admitancia shunt equivalente en cada extremo.
- b_{sh} : Susceptancia total de la línea en pu.

3.2.2.3. Construcción de la Matriz Y_{bus}

Actualización de elementos de Ybus

$$Y_{ii} += y + j \frac{b_{sh}}{2}, \quad (3.6)$$

$$Y_{jj} += y + j \frac{b_{sh}}{2}, \quad (3.7)$$

$$Y_{ij} -= y, \quad (3.8)$$

$$Y_{ji} -= y. \quad (3.9)$$

- Y_{ii} : Elemento diagonal de la barra i (admitancia propia).
- Y_{jj} : Elemento diagonal de la barra j .
- Y_{ij}, Y_{ji} : Elementos fuera de diagonal (acoples entre barras).
- $i = \text{from}, j = \text{to}$: Índices de barras conectadas por la línea.

3.2.3. Matriz de impedancias

La matriz de impedancias nodales Z_{bus} se calcula a partir de la inversa de la matriz de admitancias nodales Y_{bus} , tal como se muestra en la ecuación 3.10. Este procedimiento es fundamental porque permite estudiar cómo se propagan los armónicos en la red y valorar el efecto que generan en aquellas barras donde no se realizó una inyección directa.

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (3.10)$$

Z_{bus} : matriz de impedancias nodales, obtenida como la inversa de Y_{bus} .

3.2.4. Inyección armónica y propagación

La inyección de corrientes armónicas en el sistema produce tensiones que se propagan a través de la red de acuerdo con la relación establecida en la ecuación 3.11.

$$V_h = Z_{bus} I_h \quad (3.11)$$

I_h : vector de corrientes armónicas inyectadas (por barra y orden h).

V_h : vector de tensiones armónicas resultantes.

3.2.5. Conjunto de barras candidatas

El conjunto de barras candidatas está formado por todas las barras del sistema, excepto la primera, que se define como barra de referencia. Al ser la referencia de tensión del sistema, en esta barra no se contemplan armónicos.

$$\mathcal{B} = \{2, 3, \dots, n_{\text{barras}}\}$$

Donde:

- n_{barras} : número total de barras.
- \mathcal{B} (barras_posibles): conjunto de barras candidatas.

3.2.5.1. Selección de barras

Al seleccionar las barras candidatas es importante asegurar que no se repitan las ya escogidas y que, en ningún caso, se incluya la barra de referencia.

$$\{b_1, \dots, b_{n_{\text{iny}}}\} \sim \text{Muestreo uniforme sin reemplazo en } \mathcal{B}$$

Se eligen n_{iny} barras aleatorias donde se inyectarán armónicos.

Donde:

- n_{iny} (n_barras_inyectar): número de barras a excitar.
- b_k (barras_elejidas): barra seleccionada.

3.2.6. Selección de órdenes armónicos

Una vez identificada la barra candidata, se procede a elegir los órdenes armónicos que se van a considerar en el estudio, ya que son los que influyen de manera directa en esa barra y, de forma indirecta, en el resto de la red.

$$\mathcal{H} = \{3, 5, 7, \dots, 23\}$$

$$\{h_{k,1}, \dots, h_{k,n_h}\} \sim \text{Muestreo uniforme sin reemplazo en } \mathcal{H}$$

Se eligen n_h órdenes armónicos para cada barra.

Donde:

- \mathcal{H} (`armonicos_posibles`): conjunto de órdenes armónicos.
- n_h (`n_armonicos`): número de órdenes por barra.
- $h_{k,m}$: orden armónico elegido en la barra b_k .

3.2.7. Amplitudes y fases

La onda de voltaje o de corriente está definida por su amplitud y por su ángulo de fase. Estos dos valores son los que caracterizan al armónico que se inyecta en la barra.

$$A_{k,m}^{(i)} \sim \mathcal{U}[0,08, 0,23), \quad A_{k,m}^{(v)} \sim \mathcal{U}[0,08, 0,23)$$
$$\phi_{k,m}^{(i)} \sim \mathcal{U}[0, 2\pi), \quad \phi_{k,m}^{(v)} \sim \mathcal{U}[0, 2\pi)$$

Las amplitudes (pu) y fases (rad) se eligen aleatoriamente de distribuciones uniformes.

Donde:

- $A_{k,m}^{(i)}$ (`A_i`): amplitud de corriente armónica (pu).
- $A_{k,m}^{(v)}$ (`A_v`): amplitud de tensión armónica (pu).
- $\phi_{k,m}^{(i)}$ (`phi_i`): fase de corriente (rad).
- $\phi_{k,m}^{(v)}$ (`phi_v`): fase de tensión (rad).

3.2.7.1. Fasores de inyección

La corriente armónica de la barra se expresa mediante la ecuación 3.12. De manera similar, la tensión armónica en la barra se representa a través de la ecuación 3.13

$$I_{h_{k,m}}(b_k) = A_{k,m}^{(i)} e^{j\phi_{k,m}^{(i)}} \quad (3.12)$$

$$V_{h_{k,m}}(b_k) = A_{k,m}^{(v)} e^{j\phi_{k,m}^{(v)}} \quad (3.13)$$

Cada armónico se representa como un fasor complejo (amplitud y ángulo).

Donde:

- $I_{h_{k,m}}(b_k)$: corriente armónica en barra b_k para orden $h_{k,m}$.
- $V_{h_{k,m}}(b_k)$: tensión armónica.

3.2.7.2. Representación temporal

En el dominio del tiempo, las señales de corriente y voltaje en cada barra pueden expresarse a partir de la componente fundamental y de los armónicos que se superponen sobre ella. La ecuación 3.14 muestra la forma de la corriente, mientras que la ecuación 3.15 describe la del voltaje

$$i_{b_k}(t) = I_1 \sin(\omega t + \phi_1^{(i)}) + \sum_{m=1}^{n_h} (A_{k,m}^{(i)} I_1) \sin(h_{k,m}\omega t + \phi_{k,m}^{(i)}) \quad (3.14)$$

$$v_{b_k}(t) = V_1 \sin(\omega t + \phi_1^{(v)}) + \sum_{m=1}^{n_h} (A_{k,m}^{(v)} V_1) \sin(h_{k,m}\omega t + \phi_{k,m}^{(v)}) \quad (3.15)$$

Donde:

- $i_{b_k}(t), v_{b_k}(t)$: señales de corriente y tensión en barra b_k .
- I_1, V_1 : amplitudes de la fundamental en pu.

- $\omega = 2\pi f$: pulsación de la fundamental.

3.2.8. Índices de distorsión

El THD se obtiene a partir de la relación entre el valor RMS de las componentes armónicas y el valor RMS de la componente fundamental (E_1 o I_1), expresado en porcentaje.

Según la norma IEEE-519, existen límites específicos tanto para la distorsión armónica de voltaje (THDv) que se determina con la ecuación 3.16, como para la distorsión armónica de corriente (THDi) que se determina con la ecuación 3.17, los cuales deben cumplirse para asegurar la calidad de la energía en el sistema eléctrico.

$$THD_{I,i}(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \in H} |I_i(h)|^2}}{|I_{1,i}|} \quad (3.16)$$

Donde:

$THD_{I,i}$: distorsión armónica total de corriente en la barra i .

$I_i(h)$: corriente en el armónico h .

$I_{1,i}$: corriente fundamental.

$$THD_{V,i}(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \in H} |V_i(h)|^2}}{|V_{1,i}|} \quad (3.17)$$

Donde:

$THD_{V,i}$: distorsión armónica total de voltaje en la barra i .

$V_i(h)$: voltaje en el armónico h .

$V_{1,i}$: voltaje fundamental.

3.2.9. Ubicación del SAPF

Para determinar la barra más adecuada para la instalación del SAPF se empleó el método de sensibilidad por inyección unitaria, basado en la matriz de impedancias nodales Z_{bus} . Este método consiste en inyectar una corriente armónica unitaria en cada barra del sistema y observar cómo se modifican el perfil de tensiones y los niveles de distorsión armónica de voltaje (THDv). La sensibilidad de cada barra se obtiene con la ecuación 3.18, mientras que la potencia armónica correspondiente se calcula mediante la ecuación 3.19. A partir de estos resultados, el índice de sensibilidad definido en la ecuación 3.20 permite identificar la barra más conveniente para ubicar el SAPF, ya que corresponde a aquella que presenta el valor más alto de dicho índice.

$$C_k = \sum_{i=1}^{nb} |Z_{ik}(h_{ref})| \quad (3.18)$$

Donde:

C_k : sensibilidad de la barra k .

$$P_{h,k} = \sum_{h \in H} |I_k(h)|^2 \quad (3.19)$$

Donde:

$P_{h,k}$: potencia armónica en la barra k .

$$SI_k = C_k \cdot P_{h,k} \quad (3.20)$$

Donde:

SI_k : índice de sensibilidad; la barra con mayor valor es candidata para instalar el SAPF.

3.2.10. Compensación con el SAPF

Factor de compensación: El factor de compensación del SAPF se define según la ecuación 3.21, donde la corriente inyectada por el filtro en la barra k depende de la corriente original y del parámetro α , el cual actúa como factor de ajuste. Se parte de un valor inicial del 10 %, equivalente a 0.01 en pu, y se incrementa de manera progresiva en pasos del 10 %. Es decir, primero se aplica un 10 %, luego un 20 %, después un 30 %, y así sucesivamente, hasta que el valor de THDv en todas las barras cumpla con lo establecido en la norma IEEE-519, la cual exige que la distorsión armónica total de voltaje sea menor o igual al 5 %.

En caso de que no se cumpla con los límites establecidos por la norma IEEE-519, la segunda alternativa consiste en instalar un segundo SAPF en la barra que presente el mayor valor de THDv dentro del sistema. De esta manera se garantiza una mayor reducción de la distorsión armónica total de voltaje y se mejora el cumplimiento de la normativa.

$$I_{SAPF,k}(h) = -\alpha I_{orig,k}(h), \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (3.21)$$

Donde:

$I_{SAPF,k}(h)$: corriente inyectada por el filtro en la barra k para el armónico h .

$I_{orig,k}(h)$: corriente original.

α : factor de compensación ajustable.

3.2.11. Dimensionamiento del convertidor SAPF

Para dimensionar el convertidor del SAPF primero se calcula la corriente eficaz total que debe entregar el filtro, la cual se determina con la ecuación 3.22. Con este valor es posible establecer la potencia aparente que requiere el convertidor, expresada en la ecuación 3.23. De esta forma se define la capacidad mínima que debe tener el SAPF para operar adecuadamente dentro del sistema eléctrico.

$$I_{SAPF,rms} = \sqrt{\sum_{h \in H} |I_{SAPF,k}(h)|^2} [A] \quad (3.22)$$

Donde:

$I_{SAPF,rms}$: corriente eficaz total que debe entregar el SAPF.

$$S_{SAPF}[k] = \frac{\sqrt{3}V_{LL}I_{SAPF,rms}}{1000} \quad (3.23)$$

Donde:

$S_{SAPF}[k]$: potencia aparente necesaria del convertidor (en kVA).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Resultados con un SAPF

4.1.1. Inyección de armónicos

Como se puede observar en la Figura 4.1 la inyección de armónicos en varias barras (3, 28, 30, 31 y 38) del sistema tiene la intención de emular condiciones reales de perturbación en la red eléctrica. De esta forma, es posible evaluar las repercusiones de estas distorsiones en el perfil de tensiones, así como la propagación de armónicos a lo largo de la red. De igual manera, se ha establecido como base para validar las estrategias de mitigación por SAPF, garantizando que el sistema cumpla con los porcentajes máximos de distorsión evidenciados en la norma IEEE-519.

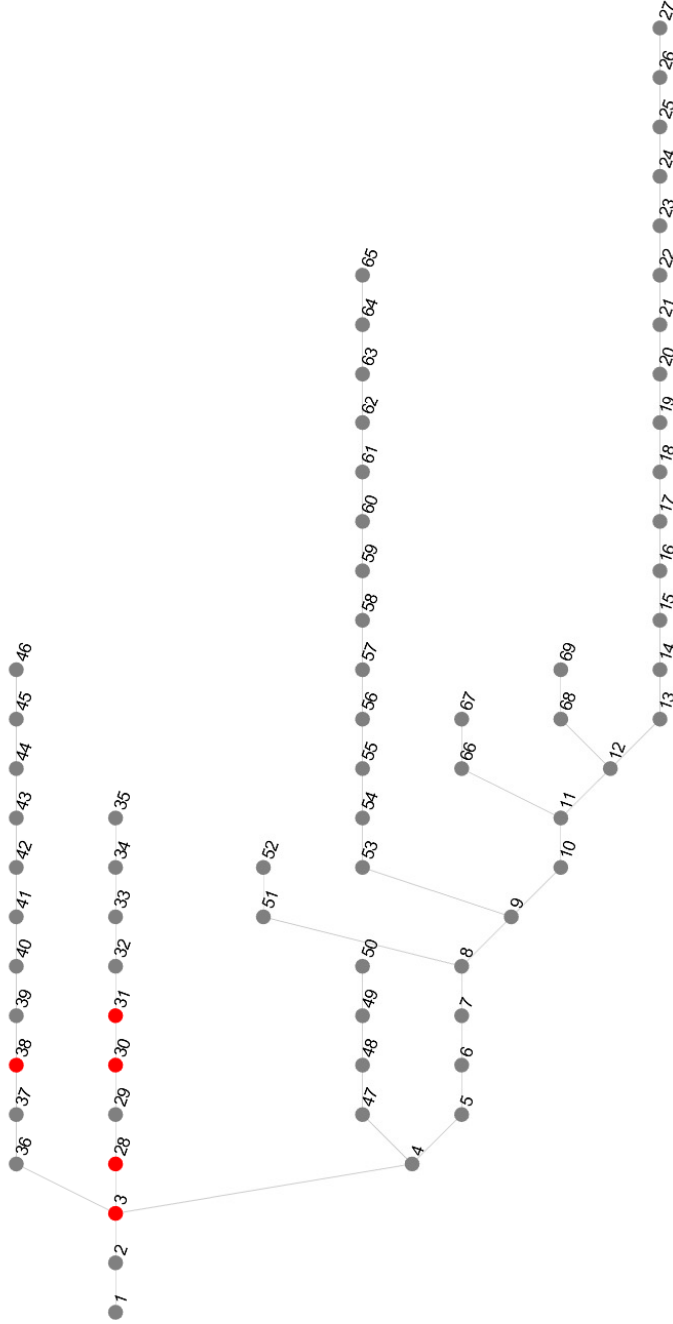


FIGURA 4.1: Barras donde se inyectaron armónicos

4.1.2. Comportamiento THD

El mapa de propagación del THD en la red, representado en la Figura 4.2, ilustra en qué medida los armónicos inyectados se propagan a lo largo de las barras del sistema. La escala de colores representada, desde azul claro para valores bajos a amarillo o naranja para valores altos, representa la magnitud del THD en cada

nodo. Este tipo de análisis es crucial para cuantificar las áreas más afectadas por la distorsión armónica y determinar la intensidad de la perturbación que se disemina.

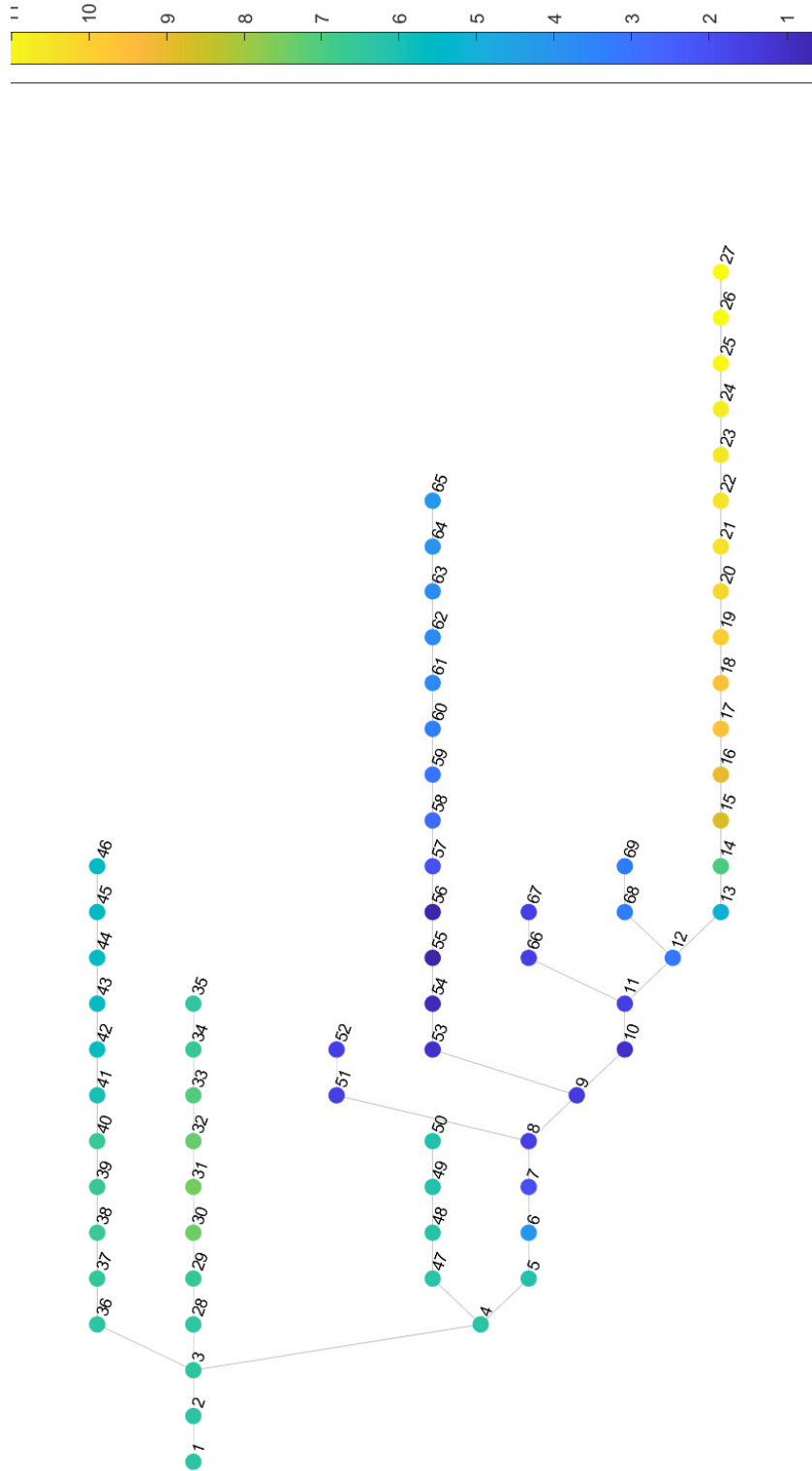


FIGURA 4.2: Mapa de propagación THD en la red

4.1.3. Valor del THD sin SAPF

La Figura 4.3 presenta el comportamiento del THD de voltaje a lo largo de las barras del sistema IEEE de 69 nodos sin la presencia de SAPFs. En ella, al menos 40 barras exhiben niveles superiores al 5%, con concentraciones críticas sobre todo en las barras 14-27 de la red, lo que muestra la mayor susceptibilidad a la presencia de distorsión armónica. Esto obliga introducir mecanismos de mitigación con la finalidad de lograr una mejor calidad de la energía, medida con base en protocolos como IEEE-519.

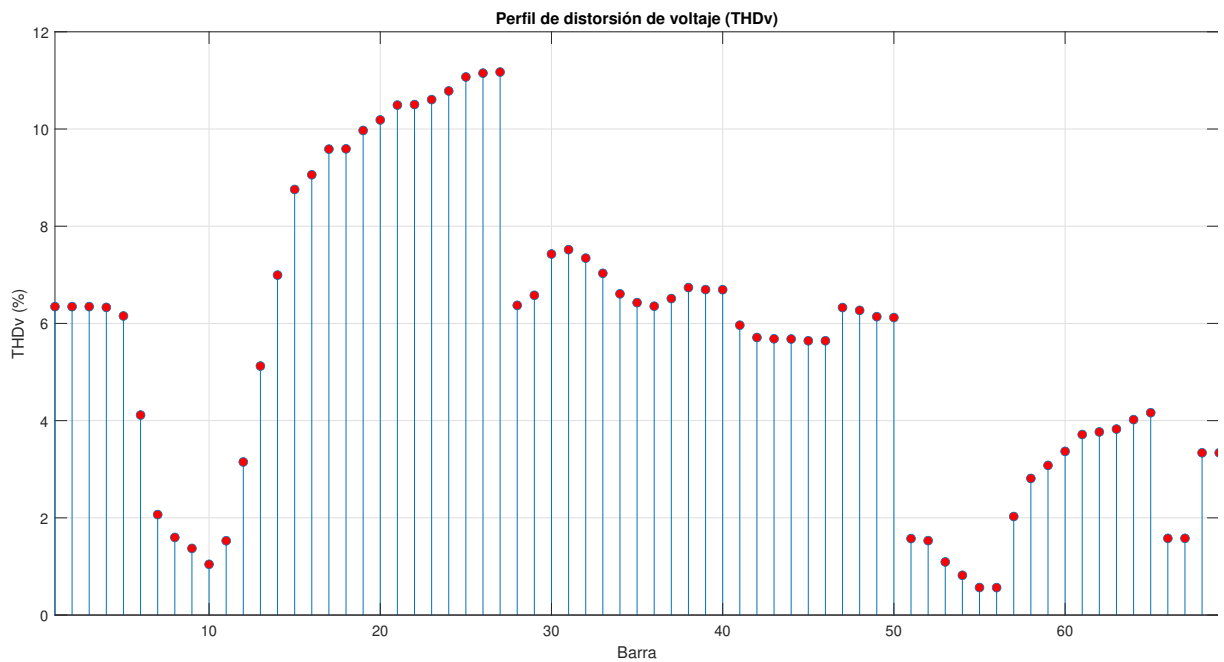


FIGURA 4.3: THD de voltaje sin SAPF

4.1.4. Ubicación del SAPF

En la Figura 4.4 se identifica la barra en la que se implementó el SAPFs. Esta localización fue determinada mediante el método de sensibilidad, el cual permite seleccionar la barra más adecuada, en este escenario es la 38. Mientras mayor sea la sensibilidad de la barra, más efectiva será la distribución de la corriente compensatoria del SAPF hacia el resto de la red eléctrica, mejora así la mitigación de armónicos.

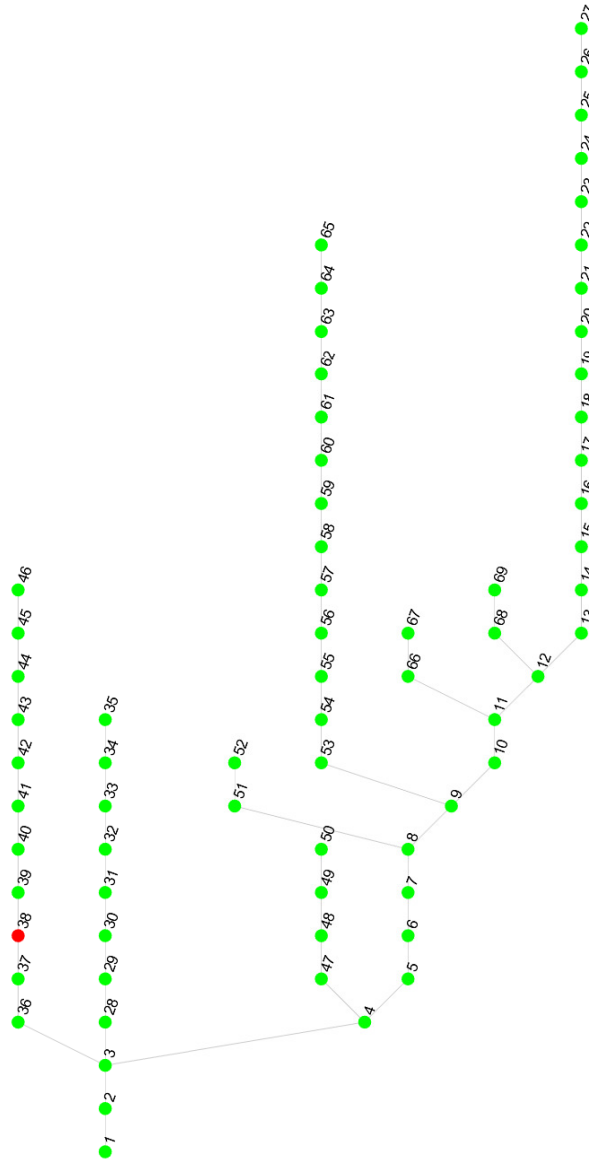


FIGURA 4.4: Ubicación de SAPF

4.1.5. Decrecimiento del THD_v

En la Figura 4.5 se observa que el valor del THD disminuye de manera progresiva a medida que el SAPF inyecta corriente en el sistema eléctrico. Este comportamiento evidencia la efectividad del filtro en la mitigación de armónicos, ya que, al incrementar la compensación inyectada, la distorsión armónica total se reduce de forma paulatina hasta acercarse a los límites establecidos por la normativa IEEE.

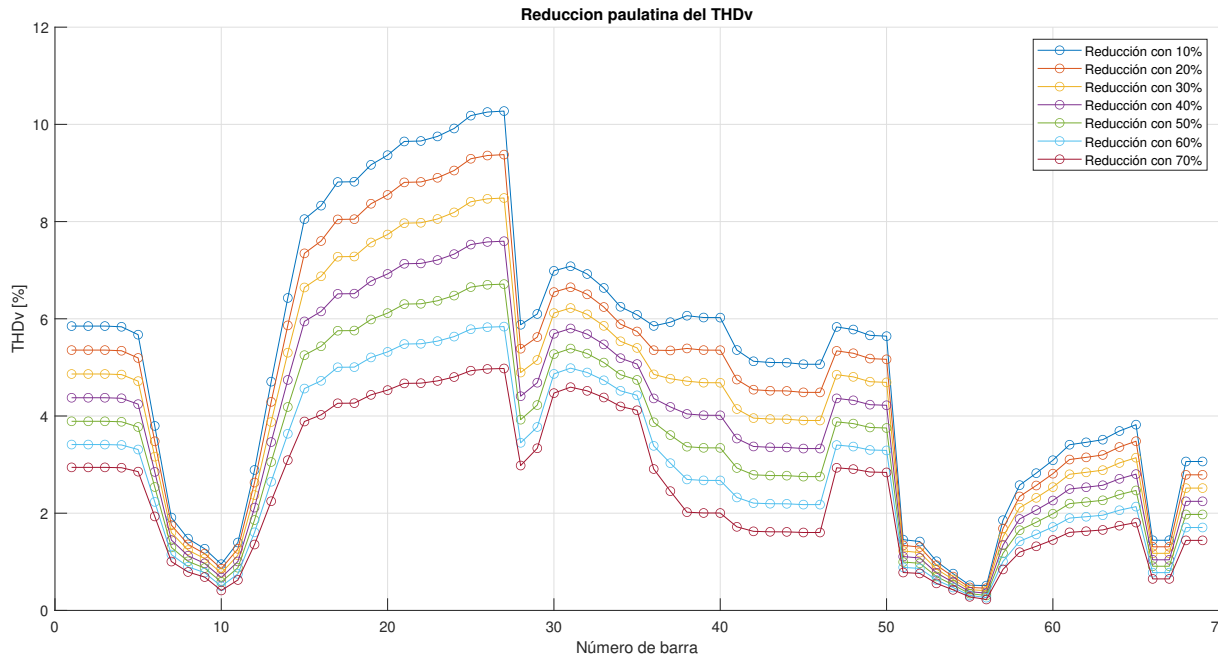


FIGURA 4.5: Decrecimiento del THDv

4.1.6. Comparación del THD antes y después del SAPF

La Figura 4.6 compara el THD de voltaje en cada barra del sistema IEEE de 69 nodos antes y después de la implementación del SAPF.

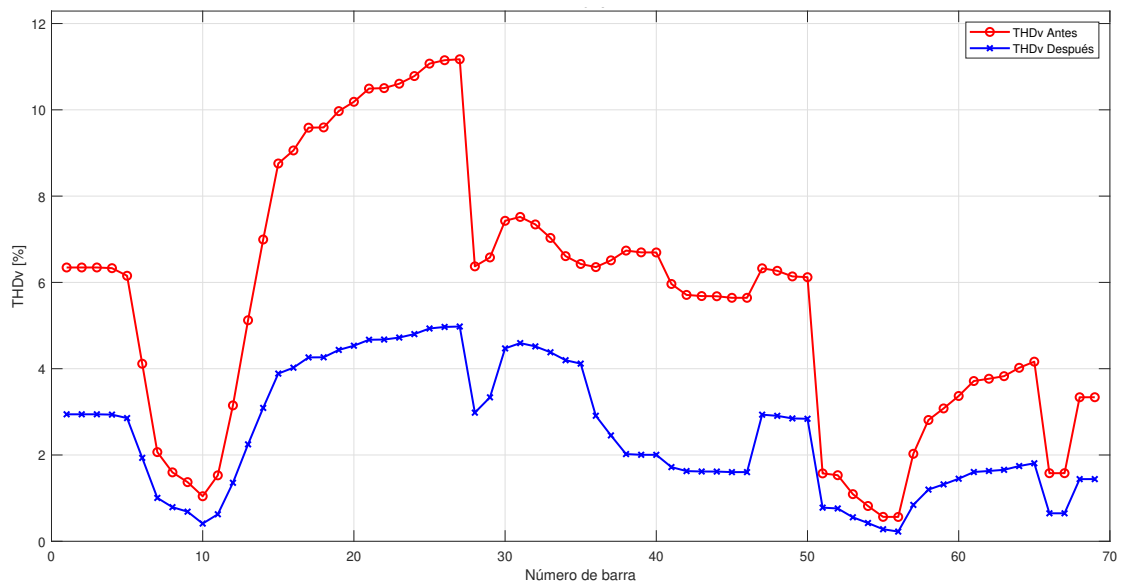


FIGURA 4.6: THD de voltaje antes y después ante el uso del SAPF

Se aprecia una reducción significativa en la distorsión armónica en la mayoría de

las barras, especialmente de las barras 15 a la 27, donde el THD disminuye de 11 % al 5 %. Este resultado evidencia la efectividad del SAPF para mejorar la calidad de energía.

4.2. Resultados con dos SAPFs

4.2.1. Inyección de armónicos

Como se puede observar en la Figura 4.7 la inyección de armónicos en varias barras (2, 11, 21, 30 y 50) del sistema tiene la intención de emular condiciones reales de perturbación en la red eléctrica. De esta forma, es posible evaluar las repercusiones de estas distorsiones en el perfil de tensiones, así como la propagación de armónicos a lo largo de la red.

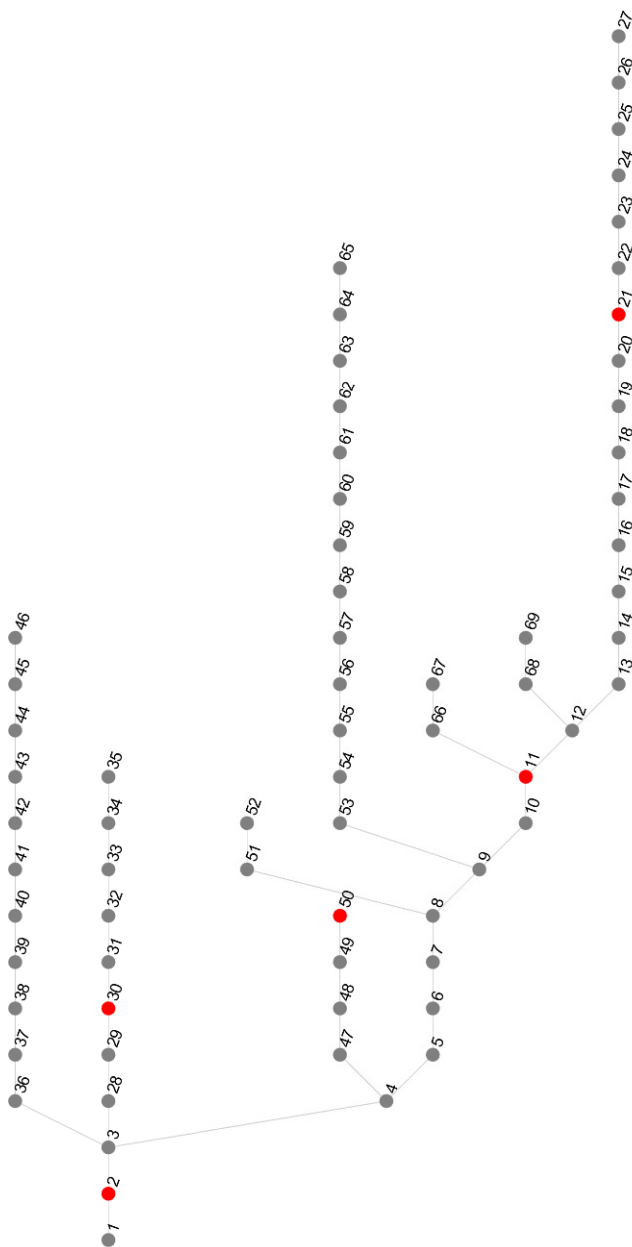


FIGURA 4.7: Barras donde se inyectaron armónicos

4.2.2. Valor de THD_v sin SAPFs

La Figura 4.8 presenta el comportamiento del THD de voltaje a lo largo de las barras del sistema IEEE de 69 nodos sin la presencia de SAPFs. En ella, al menos 24 barras exhiben niveles superiores al 5%, con concentraciones críticas sobre todo en las barras 15-27 de la red, lo que muestra la mayor susceptibilidad a la presencia de distorsión armónica. Esto obliga introducir mecanismos de mitigación con la finalidad de lograr una mejor calidad de la energía, medida con base en protocolos

como IEEE-519.

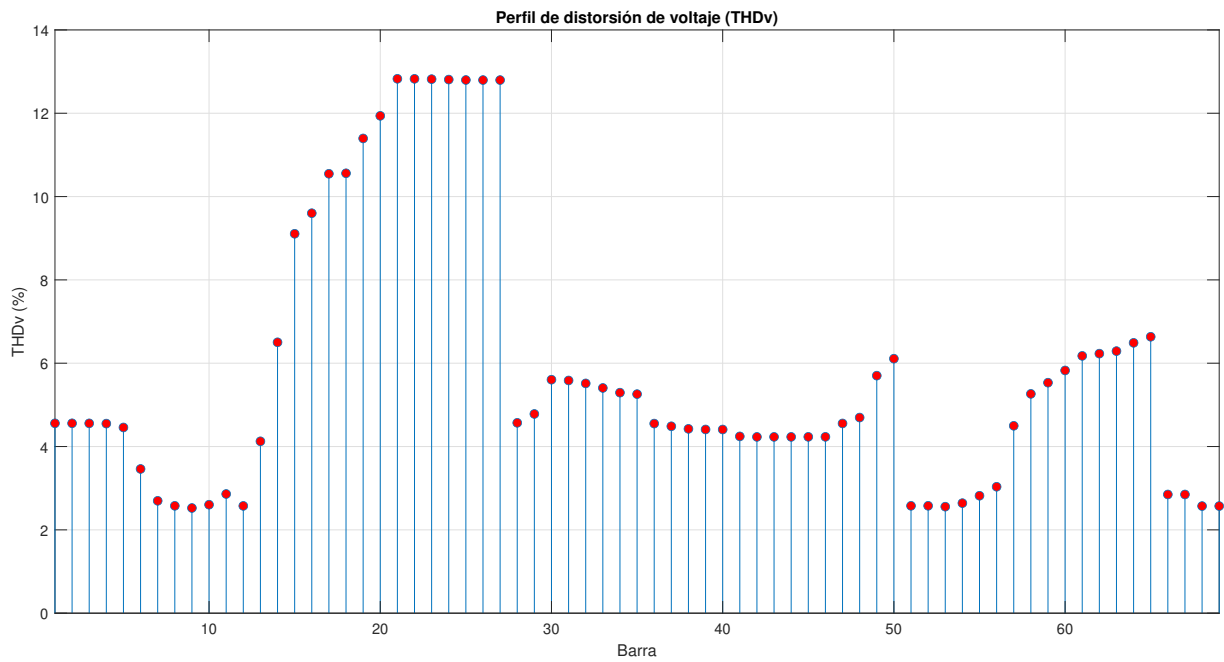


FIGURA 4.8: Valor del THD en todas las barras

4.2.3. Ubicación de los SAPFs

En la Figura 4.9 se identifica las barras en la que se implementó los SAPFs. Esta localización fue determinada mediante el método de sensibilidad, el cual permite seleccionar las barra más adecuadas, en este escenario serian 21 con un indice de sensibilidad de 1.75. Mientras mayor sea la sensibilidad de la barra, más efectiva será la distribución de la corriente compensatoria del SAPFs hacia el resto de la red eléctrica. Para el segundo SAPF escogimos la barra conde menos efecto tiene el primero, por lo que seria la barra que tenga mayor THD después de inyectar el primer SAPF, que en nuestro escenario seria en la barra 65.

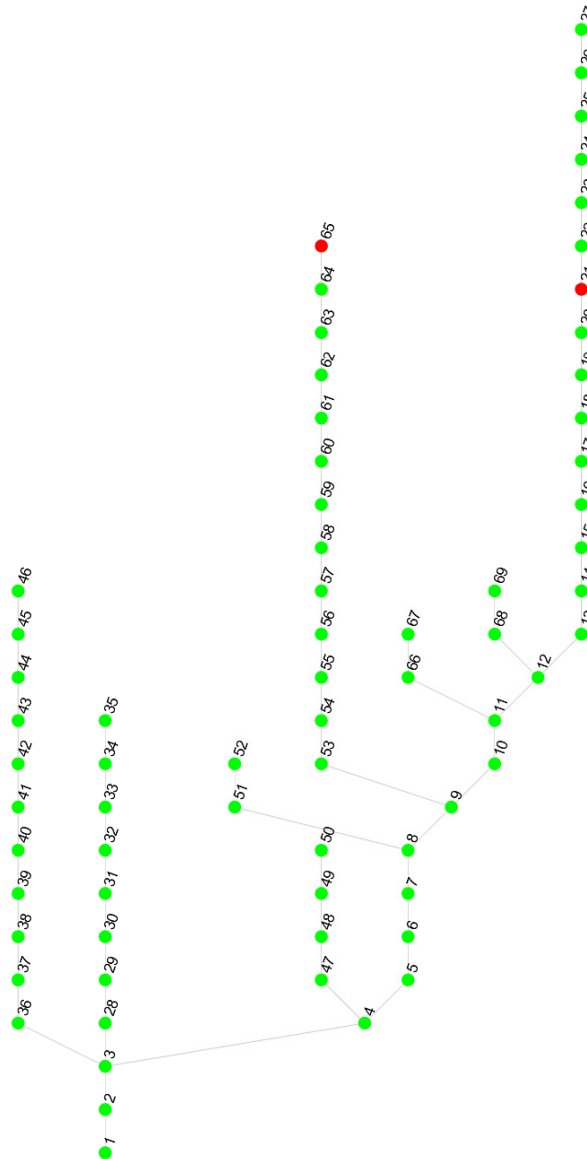


FIGURA 4.9: Ubicación de los SAPFs

4.2.4. Decrecimiento del THDv

En la Figura 4.10 se observa que el valor del THD disminuye de manera progresiva a medida que los SAPFs inyectan corrientes en el sistema eléctrico. Este comportamiento evidencia la efectividad de los filtro en la mitigación de armónicos, ya que, al incrementar la compensación inyectada, la distorsión armónica total se

reduce de forma paulatina hasta acercarse a los límites establecidos por la normativa IEEE.

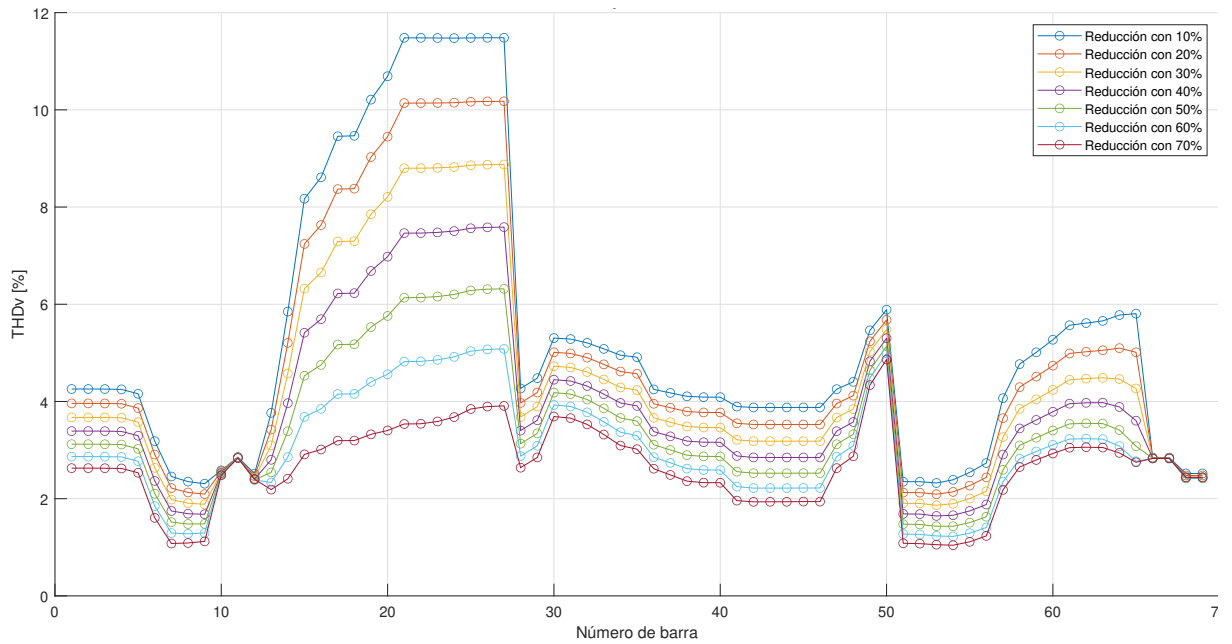


FIGURA 4.10: Decrecimiento del THDv

4.2.5. Comparación del THD antes y después del SAPF

La Figura 4.11 compara el THD de voltaje en cada barra del sistema IEEE de 69 nodos antes y después de la implementación de los SAPFs.

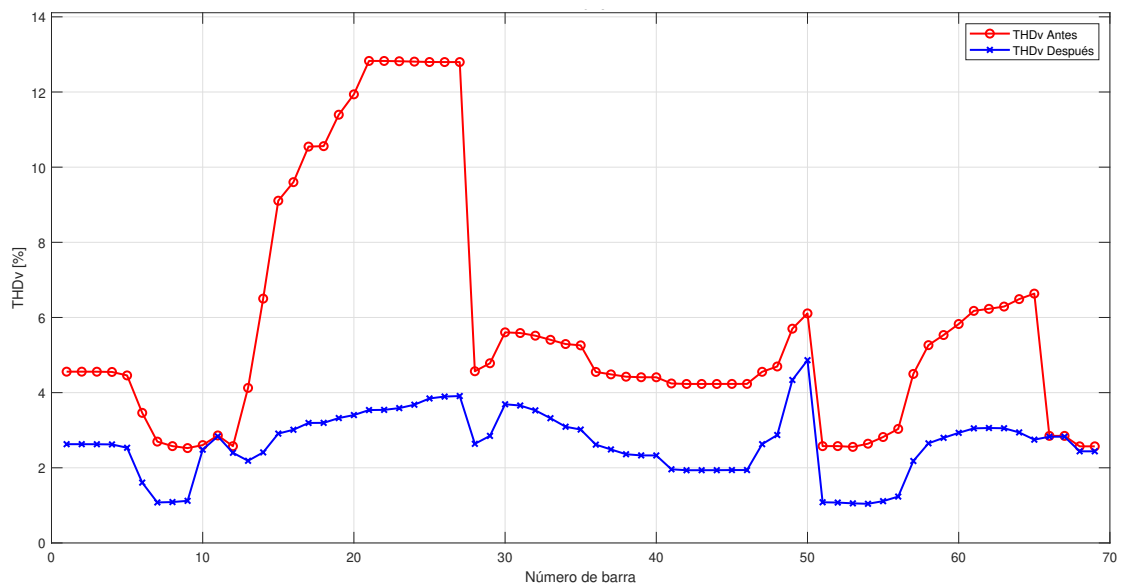


FIGURA 4.11: THD de voltaje antes y después ante el uso del SAPF

Se aprecia una reducción significativa en la distorsión armónica en la mayoría de las barras, especialmente de las barras 15 a la 27, donde el THD disminuye de 12.5 % al 5 %. Este resultado evidencia la efectividad del SAPF para mejorar la calidad de energía.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Discusión

Los resultados presentados para el sistema IEEE de 69 barras confirman una vez más que la actualización del algoritmo permite disminuir significativamente el THD total, las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de voltaje. Este hallazgo concuerda con el de Abbas et al.[3], quienes, al implementar un modelo similar a la presente investigación pero con un rediseño del control del *Thin Film Water Cycle Algorithm*, también descubrieron una reducción sustancial del THD y estabilidad del sistema. No obstante, la disminución de los SAPF en este estudio que logró cumplir con los límites del IEEE-519, evidencia una mayor eficiencia en el dimensionamiento de los filtros.

Este rendimiento es similar al de Guo et al.[4], quienes, a pesar de trabajar con sistemas de menor tamaño, consiguieron una buena eficacia del SAPF en cargas centralizadas y distribuidas. En este estudio, la disminución del THD en las barras críticas fue mayor al 70%. No obstante, aquí se logra una mejora en el perfil de voltaje, probablemente por la selección y reducción de barras ideal. Comparado con el enfoque de compensación multi-barras por sensibilidad armónica de Yang et al. [7], la presente investigación proporciona una reducción del uso de SAPF. El modelo de Yang requiere menos filtros, pero el algoritmo usado en esta investigación es más efectivo para igualar la respuesta según la variación en la distribución de armónicos.

5.2. Conclusiones

En esta investigación, se presentó un procedimiento detallado basado en el algoritmo de paso adaptativo que descubrió barras con la sensibilidad armónica más alta en los términos del sistema IEEE de 69 barras. El análisis matemático, la determinación de los coeficientes de sensibilidad, las restricciones normativas y el método de selección de barras para la instalación de SAPF y su capacidad permiten considerar la elección más eficiente de la ubicación y la cantidad adecuada de SAPF, manteniendo la calidad de energía alta.

La aplicación del procedimiento propuesto en el entorno de Matlab/Simulink[®] probó su factibilidad operativa, a través de la disminución del THD en las barras de mayor sensibilidad de más de 11.5 % a niveles inferiores a 5 %, dentro de los rangos oficialmente aceptables según el estándar IEEE-519.

La realización de la evaluación en escenarios con cargas no lineales centralizadas y distribuidas demuestra que el algoritmo mantiene su efectividad, en promedio reduciendo el THD en el sistema completo en un 30 % y hasta un 50 % en barras más afectadas. La efectividad del programa radica en el uso de bucles, los cuales permiten determinar de manera automática si es necesario instalar uno o más SAPFs, garantizando así el cumplimiento de los límites establecidos por la norma IEEE-519.

5.3. Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo la implementación del algoritmo en una red de distribución real, con el fin de comprobar su funcionamiento en condiciones operativas auténticas y frente a situaciones imprevistas que no pueden ser consideradas en la simulación. Para este propósito, es conveniente iniciar con una prueba piloto en un tramo del circuito donde exista una alta presencia de cargas no lineales, ya que en estos escenarios se podrá evaluar con mayor precisión la capacidad del algoritmo para reducir los niveles de distorsión armónica y garantizar su aplicabilidad práctica. Para analizar el algoritmo propuesto se recomienda a trabajo futuro una evaluación económica basado en los costos de instalación, operación y mantenimiento de los SAPF frente a los beneficios en reducción de pérdidas y mejora de calidad de energía, con el fin de definir estrategias de inversión óptimas para empresas eléctricas.

Bibliografía

- [1] IEEE-519, *IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*, jun. de 2022. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9848440> (visitado 28-06-2025).
- [2] M. Imran, Z. Jianmeng, A. Naveed, M. A. Shehzad y C. Guoqiang, “Grid power quality enhancement by nonlinear control of voltage source inverter”, en, *Journal of Engineering Research and Reviews*, vol. 2, n.º 1, págs. 13-13, ene. de 2025, ISSN: 3041-4822. DOI: [10.5455/JERR.20241202092710](https://doi.org/10.5455/JERR.20241202092710). dirección: <https://www.jerronline.org/?mno=231176> (visitado 28-06-2025).
- [3] A. S. Abbas, R. A. El-Sehiemy, A. Abou El-Ela et al., “Optimal Harmonic Mitigation in Distribution Systems with Inverter Based Distributed Generation”, en, *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 2, pág. 774, ene. de 2021, Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app11020774](https://doi.org/10.3390/app11020774). dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/774> (visitado 28-06-2025).
- [4] M. Guo, Q. Jin y Z. Yao, “Implementation of Adaptive Step-Size Algorithm in Distribution Network for Optimal Location and Sizing of SAPFs”, en *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, jul. de 2020, págs. 1562-1566. DOI: [10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208377](https://doi.org/10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208377). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9208377> (visitado 28-06-2025).
- [5] Z. Yang, H. Yi, Y. You, F. Zhuo, C. Zhan y S. Shi, “Optimal Installation and System-level Control Strategy of SAPF Based on Extended-range Compensation of Multi-bus Harmonic Sources in Distribution Networks”, en *2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe)*, sep. de 2023, págs. 1-9. DOI: [10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264241](https://doi.org/10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264241). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10264241> (visitado 28-06-2025).
- [6] X. Yin, H. Yi, Z. Yang, F. Zhuo, Y. Zhang y W. Wei, “The Optimal Location Algorithm of SAPFs in Distribution Network Based on Harmonic State Estimation”, en *2023 8th International Conference on Power and Renewa-*

- ble Energy (ICPRE)*, ISSN: 2768-0525, sep. de 2023, págs. 612-617. DOI: [10.1109/ICPRE59655.2023.10353794](https://doi.org/10.1109/ICPRE59655.2023.10353794). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10353794> (visitado 28-06-2025).
- [7] Z. Yang, F. Zhuo, R. Tao et al., “Implementation of Multi-objective Particle Swarm Optimization in Distribution Network for High-efficiency Allocation and Sizing of SAPFs”, en *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, ISSN: 2642-5513, ago. de 2019, págs. 1-5. DOI: [10.1109/ICEMS.2019.8922399](https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922399). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8922399> (visitado 28-06-2025).
- [8] H. A. I. Gony, G. I. Rashed, A. Badjan, A. O. M. Bahageel y H. I. Shaheen, “Advanced Harmonic Mitigation in Photovoltaic Grid-Connected Systems: Jellyfish Search Optimization Approach”, en *ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering*, vol. 23, n.º 3, págs. 6-18, dic. de 2024, Number: 3, ISSN: 3083-9394. DOI: [10.11113/elektrika.v23n3.544](https://doi.org/10.11113/elektrika.v23n3.544). dirección: https://elektrika.utm.my/index.php/ELEKTRIKA_Journal/article/view/544 (visitado 28-06-2025).
- [9] Y. Wei, X. Ma, Y. Chen, Y. Chen e Y. Wang, “A Novel Optimization Model for Harmonic Mitigation Based on Residual Capacity of Photovoltaic Inverters”, en *2024 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, ISSN: 2164-0610, oct. de 2024, págs. 351-356. DOI: [10.1109/ICHQP61174.2024.10768812](https://doi.org/10.1109/ICHQP61174.2024.10768812). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10768812> (visitado 28-06-2025).
- [10] M. Ahmed, N.-A. Masood y T. Aziz, “An approach of incorporating harmonic mitigation units in an industrial distribution network with renewable penetration”, *Energy Reports*, vol. 7, págs. 6273-6291, nov. de 2021, ISSN: 2352-4847. DOI: [10.1016/j.egyr.2021.09.072](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.072). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721008775> (visitado 28-06-2025).
- [11] R. Singh, A. K. Singh y P. Kumar, “Comparison of three evolutionary algorithms for harmonic mitigation using SAPF”, en *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, ISSN: 2164-7011, ago. de 2011, págs. 392-397. DOI: [10.1109/ICIINFS.2011.6038100](https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2011.6038100). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6038100> (visitado 28-06-2025).
- [12] G. Arunsankar y S. Srinath, “Optimal controller for mitigation of harmonics in hybrid shunt active power filter connected distribution system: An EGOANN technique”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, n.º 2, pág. 025 507, abr. de 2019, ISSN: 1941-7012. DOI: [10.1063/1.5085028](https://doi.org/10.1063/1.5085028). dirección: <https://doi.org/10.1063/1.5085028> (visitado 28-06-2025).

- [13] P. Manasa, K. N. Rao y D. B. Bhaskar, “Mitigation of harmonics using shunt active power filter in the distribution system”, en, *Journal JETIR*, vol. 5, n.º 7, 2018.
- [14] A. R. Bhowmik y S. Mukherjee, “Harmonic Mitigation Using Shunt Active Power Filter Under Various Loading Condition”, en *2019 4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, dic. de 2019, págs. 291-296. DOI: [10.1109/ICEECCOT46775.2019.9114631](https://doi.org/10.1109/ICEECCOT46775.2019.9114631). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9114631> (visitado 28-06-2025).
- [15] P. Patel, S. Samal, P. K. Mishra, C. Jena, P. K. Barik y A. Mohapatra, “Adaptive Controller With Fuzzy and Modified SRF-Based SAPF for Harmonics Reduction Under Distorted Source Conditions”, en *2024 IEEE 13th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, ISSN: 2473-5655, abr. de 2024, págs. 1-7. DOI: [10.1109/CSNT60213.2024.10545808](https://doi.org/10.1109/CSNT60213.2024.10545808). dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10545808> (visitado 04-08-2025).
- [16] K. S. Flores, “Flores, K. (2024). Planificación de la expansión de los sistemas de transmisión: análisis del estado del arte de la planificación de la expansión de la transmisión. 106 páginas. Quito : EPN, 2024.”, spa, Accepted: 2024-05-10T17:28:36Z, bachelorThesis, Escuela Politécnica Nacional, abr. de 2024. dirección: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25407> (visitado 29-06-2025).
- [17] J. Trashorras, *Desarrollo de redes eléctricas y centros de transformación 2.ª edición 2022*, es. Editorial Paraninfo, mayo de 2022, Google-Books-ID: h9JyEAAAQBAJ, ISBN: 978-84-283-5991-7.
- [18] ARCERNNR-001/20, *Distribución y comercialización de energía eléctrica*, Regulación, 2020. dirección: <https://controlelectrico.gob.ec/regulaciones-2023/>.
- [19] R. R. Stanley, “Chapter 7 - Power quality improvements for renewable power plants”, en *Power Systems Operation with 100 % Renewable Energy Sources*, S. Chenniappan, S. Padmanaban y S. Palanisamy, eds., Elsevier, ene. de 2024, págs. 85-107, ISBN: 978-0-443-15578-9. DOI: [10.1016/B978-0-443-15578-9.00001-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15578-9.00001-7). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443155789000017> (visitado 29-06-2025).
- [20] A. C. Santos y J. L. H. Martín, *Electricidad: Fundamentos y problemas de electrostática, corriente continua, electromagnetismo*, es. Ra-Ma Editorial, jun. de 2012, Google-Books-ID: U6a6EAAAQBAJ, ISBN: 978-84-9964-419-6.

- [21] A. Pérez, “Localización y valoración de fuentes de distorsión armónica y/o desequilibrio en redes eléctricas”, spa, Accepted: 2020-09-17T10:56:19Z, doctoral thesis, Universidad de Huelva, 2020. dirección: <https://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/18636> (visitado 29-06-2025).
- [22] Circutor, *Armónicos eléctricos*, es-ES, 2024. dirección: <https://circutor.com/soporte/formacion/notebooks/armonicos-electricos/> (visitado 29-06-2025).
- [23] C. A. Achilie y C. N. Molina, “Análisis de calidad de la energía orientado a distorsiones armónicas en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana”, spa, Accepted: 2024-03-25T16:00:05Z, bachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2024. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27451> (visitado 12-08-2025).
- [24] C. M. Ayala Criollo, “Modelación de la propagación de armónicos en sistemas de transmisión eléctrica”, spa, Accepted: 2017-07-13T19:58:17Z, bachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito, jul. de 2017. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14348> (visitado 11-08-2025).
- [25] G. E. Constante Flores, “Flujo de potencia de armónicos utilizando Matlab”, spa, Accepted: 2014-09-05T18:37:42Z, bachelorThesis, Escuela Politécnica Nacional, sep. de 2014. dirección: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8562> (visitado 11-08-2025).
- [26] T. S. Group, *Comprensión de los armónicos en sistemas de potencia y sus efectos*, es, 2015. dirección: <https://www.thesnellgroup.com/featured-tips/understanding-power-system-harmonics-and-their-effects> (visitado 11-08-2025).
- [27] J. Malogulko, V. Teptia, N. Ostra, O. Sikorska y K. Povstianko, “Tools for modeling the level of harmonic distortion in power grids and their impact”, inglés, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, vol. 26, n.º 4, págs. 19-44, dic. de 2023, Publisher: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energia Polskiej Akademii Nauk, ISSN: 1429-6675, 2720-569X. DOI: [10.33223/epj/166435](https://epj.min-pan.krakow.pl/Tools-for-modeling-the-level-of-harmonic-distortion-in-power-grids-and-their-impact,166435,0,2.html). dirección: <https://epj.min-pan.krakow.pl/Tools-for-modeling-the-level-of-harmonic-distortion-in-power-grids-and-their-impact,166435,0,2.html> (visitado 29-06-2025).
- [28] J. Lalotra, A. Sharma y P. Lehana, “Evaluation and Reduction of Total Harmonic Distortion in AC Supply System”, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, págs. 510-514, 2016, ISSN: 2301380X. DOI:

- 10.18178/ijeee.4.6.510-514. dirección: <http://www.ijeee.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=65&id=336> (visitado 29-06-2025).
- [29] A. Sannino, J. Svensson y T. Larsson, “Power-electronic solutions to power quality problems”, *Electric Power Systems Research*, Power Quality, vol. 66, n.º 1, págs. 71-82, jul. de 2003, ISSN: 0378-7796. DOI: [10.1016/S0378-7796\(03\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00073-7). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779603000737> (visitado 29-06-2025).
- [30] P. Salmerón Revuelta, S. Pérez Litrán y J. Prieto Thomas, “4 - Shunt Active Power Filters”, en *Active Power Line Conditioners*, P. Salmerón Revuelta, S. Pérez Litrán y J. Prieto Thomas, eds., San Diego: Academic Press, ene. de 2016, págs. 107-147, ISBN: 978-0-12-803216-9. DOI: [10.1016/B978-0-12-803216-9.00004-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803216-9.00004-3). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128032169000043> (visitado 30-06-2025).
- [31] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, en. Butterworth-Heinemann, sep. de 2017, Google-Books-ID: HxdHDgAAQBAJ, ISBN: 978-0-12-811408-7.
- [32] Y. Hoon, M. A. Mohd Radzi, M. A. A. Mohd Zainuri y M. A. M. Zawawi, “Shunt Active Power Filter: A Review on Phase Synchronization Control Techniques”, en, *Electronics*, vol. 8, n.º 7, pág. 791, jul. de 2019, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics8070791](https://doi.org/10.3390/electronics8070791). dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/7/791> (visitado 12-08-2025).
- [33] J. K. Sao, R. T. Naayagi, G. Panda, R. D. Patidar y S. D. Swain, “SAPF Parameter Optimization with the Application of Taguchi SNR Method”, en, *Electronics*, vol. 11, n.º 3, pág. 348, ene. de 2022, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics11030348](https://doi.org/10.3390/electronics11030348). dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/3/348> (visitado 12-08-2025).
- [34] M. Popescu, A. Bitoleanu, C. V. Suru, M. Linca y L. Alboteanu, “Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review”, en, *Energies*, vol. 17, n.º 12, pág. 2867, ene. de 2024, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en17122867](https://doi.org/10.3390/en17122867). dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2867> (visitado 12-08-2025).
- [35] C. E. Roger, *Métodos de solución y análisis de programación lineal*, es. Céspedes Esteban, Roger, ene. de 2021, Google-Books-ID: EioXEAAAQBAJ.

- [36] Z. Yu, Q. Yin, G. Chen y G. Wang, “Real-time simulation of power electronic systems based on step-size adaptive algorithm”, *Electric Power Systems Research*, vol. 246, pág. 111 707, sep. de 2025, ISSN: 0378-7796. DOI: [10.1016/j.epsr.2025.111707](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111707). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779625002998> (visitado 24-08-2025).

TABLA ABET

TABLA 1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:		UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SAPF EN REDES DE DISTRIBUCIÓN		
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad		Estética	
	Códigos		Constructibilidad	
	Costos		Ergonomía	
	Extensibilidad		Funcionalidad	pp. 26–27
	Interoperabilidad		Consideraciones Legales	
	Mantenibilidad		Manufacturabilidad	
	Mercadeo		Política	
	Regulaciones	pp. 17–22	Cronogramas	pp. 26
	Normativas	pp. 24–25	Sostenibilidad	
Impacto Ambiental		Impacto Social		
Usabilidad	pp. 36	Otros:		
Normas relevantes (dos o más)	IEEE 519	pp. 24–25		
	IEC 61000	pp. 8–17		
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	pp. 1,38	Generación de soluciones múltiples	pp. 36
	Desarrollo de requerimientos	pp. 26–34	Evaluación de soluciones	pp. 41–43, 46–48
	Procesos iterativos	pp. 35–36	Consideración de riesgos	
	Realizar compromisos o tratos			
Basado en trabajos anteriores	Protecciones		Iluminación	
	Optimización de sistemas	pp. 29–30	Alta Tensión	
	Energías alternativas		Distribución	pp. 26–36
	Máquinas eléctricas		Otros temas	

ANEXO A

ANEXO SO2

ASPECTOS RELEVANTES

Salud pública y medio ambiente

El proyecto consiste en la instalación de Filtros Activos de Potencia en Derivación en redes de distribución eléctricas, para minimizar la distorsión armónica originada por cargas no lineales. En términos de salud pública, la reducción de los armónicos puede ayudar a los equipos médicos, el alumbrado y equipos comunes comunitarios, ser eficientes y estables, evitando quedarse sin funcionar en situaciones de emergencia, por ende, salvando vidas. Por otro lado, el uso eficiente de la electricidad mediante la optimización de la calidad de la red y la disminución de la energía desperdiciada reducirá la necesidad de generar energía adicional, lo que a su vez disminuirá el impacto ambiental de la generación eléctrica.

Seguridad de personas y bienes

El proyecto también aporta a la seguridad eléctrica, ya que la disminución de armónicos reduce el riesgo de fallas en los bancos de condensadores, evitando sobrecalentamientos que podrían ocasionar explosiones o incendios. Con ello se protege no solo la integridad de las instalaciones, sino también la seguridad de las personas y los bienes que dependen del sistema eléctrico

Bienestar de la población

En cuanto a un beneficio indirecto a la población, el proyecto ayuda a monitorear y proponer mejoras en la calidad del suministro que reduzca la concentración de armónicos. Esta reducción, que puede ser lograda en situaciones reales a través de la implementación de SAPF mejorando así la confiabilidad del suministro y, en consecuencia, mitigar cortes así como el daño de los equipos eléctricos y extender sus

vidas útiles. La población abordada se compone de residentes, usuarios comerciales e industriales.

Factores Globales

La propuesta de implementación de SAPF está en línea con estándares internacionales para la calidad de la energía, tales como IEEE-519. El trabajo está diseñado en un entorno virtual, pero los resultados obtenidos pueden ser una herramienta de soporte para la aplicación de soluciones reales para lograr metas de seguridad energética y sostenibilidad.

Factores Culturales

Dentro de los factores culturales, el desarrollo del proyecto no presenta impacto alguno, ya que se restringe a un estudio computacional que no opera en entornos patrimoniales, lugares sagrados o costumbres locales.

Factores Sociales

No se producen cambios estructurales en la dinámica social, ya que el trabajo tiene un carácter virtual. Sin embargo, dados el enfoque y los resultados, la metodología puede ser utilizada en proyectos certeros para mejorar la provisión de electricidad, lo que refleja positivamente las actividades productivas, educativas y de servicios.

Factores Ambientales

El proyecto aporta al cuidado del ambiente al reducir las pérdidas de energía causadas por los armónicos. Esto significa menos necesidad de generación eléctrica, menor consumo de combustibles y una disminución en las emisiones contaminantes. Además, al evitar sobrecalentamientos en equipos, se reducen riesgos de fallas e incendios que también pueden afectar al entorno.

Factores Económicos

A nivel económico, el proyecto representa un beneficio a futuro tanto para las empresas distribuidoras como para el sector industrial, ya que la reducción de fallos en la red contribuye a mejorar la calidad del servicio eléctrico y evita posibles sanciones o multas por incumplimiento de la normativa vigente.