



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**REDUCCIÓN DE SOBRECARGA ARMÓNICA
MEDIANTE EL FILTRO AC ACTIVO DE
RANGO COMPLETO EMPLEANDO EL
ALGORITMO DE HARRIS HAWS PARA
DETERMINAR LA UBICACIÓN ÓPTIMA**

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

AUTOR: JOSUE WLADIMIR VASQUEZ CAIZA

TUTOR: LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA

Quito -Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Josue Wladimir Vasquez Caiza con documento de identificación N° 1726764978 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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.

Quito, 19 de Marzo del año 2025

Atentamente,



Josue Wladimir Vasquez Caiza

1726764978

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

Yo, Josue Wladimir Vasquez Caiza con documento de identificación No. 1726764978 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico : “Reducción de sobrecarga armónica mediante el filtro ac activo de rango completo empleando el algoritmo de Harris Hawks para determinar la ubicación óptima”, 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.

Quito, 19 de Marzo del año 2025

Atentamente,



Josue Wladimir Vasquez Caiza

1726764978

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara con documento de identificación N° 1717329005, , docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDUCCIÓN DE SOBRECARGA ARMÓNICA MEDIANTE EL FILTRO AC ACTIVO DE RANGO COMPLETO EMPLEANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS PARA DETERMINAR LA UBICACIÓN ÓPTIMA, realizado por Josue Wladimir Vasquez Caiza con documento de identificación 17726764978 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico, que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de Marzo del año 2025

Atentamente,



Ing. Luis Fernando Tipán Vergara, MSc
1717329005

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Sustento teórico.....	3
2.1	Sobrecarga Armónica	3
2.2	Filtros de compensación AC.....	3
2.2.1	Tipos de FAPs.....	4
2.2.2	Teoría de potencia instantánea	4
2.3	Algoritmo de optimización Harris Hawks.....	6
3	Formulación del problema	7
3.1	Función objetivo.....	7
3.1.1	Cómputo del THD	7
3.1.2	Computo del FP	7
3.2	Restricciones del modelo	8
3.2.1	Límite Máximo de THD.....	8
3.2.2	Factor de Potencia Mínimo	8
3.2.3	Límites de Voltaje en los Nodos	8
3.2.4	Límites de Corriente en las Líneas:.....	8
3.3	FAP propuesto.....	8
3.3.1	Algoritmo de control de potencia instantánea propuesto.....	9
3.4	Modelo de optimización Harris Hawks propuesto	11
3.5	Caso de estudio.....	13
4	Análisis de resultados.....	13
4.1	Análisis de la respuesta del HHO	13
4.2	Análisis del contenido armónico	14
4.3	Análisis del factor de potencia	15
4.4	Análisis de la THD	15
4.5	Análisis del voltaje	15
5	Análisis de las ventajas y desventajas del método propuesto con respecto a otros métodos	15
6	Conclusiones	16
6.1	Trabajos futuros.....	17
7	Referencias.....	17
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	23
7.2	Resumen de Indicadores	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de FAPs	4
Figura 2. Filtro activo de potencia propuesto.	9
Figura 3. Teoría de control de potencia instantánea	9
Figura 4. Sistema de prueba propuesto.....	13
Figura 5. Contenido armónico en la barra 7.	14
Figura 6. Contenido armónico en la barra 9.	14
Figura 7. Contenido armónico en la barra 10.	14
Figura 8. Comportamiento del FP en el sistema de prueba	15
Figura 9. Comportamiento de la THD en el sistema de prueba	15
Figura 10. Comportamiento del perfil de voltaje en el sistema de prueba	15
Figura 11. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	25
Figura 12. Indicador de formulación del problema - Estado del arte	25
Figura 13. Indicador de solución - Estado del arte	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados del algoritmo HHO.	14
Tabla 2: Matriz de estado del arte.	23

REDUCCIÓN DE LA SOBRECARGA ARMÓNICA MEDIANTE EL FILTRO AC ACTIVO DE RANGO COMPLETO EMPLEANDO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS PARA DETERMINAR LA UBICACIÓN ÓPTIMA

Resumen

Este estudio propone una estrategia para mitigar armónicos y mejorar la calidad de la energía. La solución se basa en la implementación de un Filtro Activo de Potencia en configuración shunt. La ubicación óptima del FAP se determina mediante el Algoritmo Harris Hawks. Este método minimiza la Distorsión Total Armónica (THD) y optimiza el factor de potencia (FP). Además, cumple con las restricciones de voltaje y los límites de THD según la normativa IEEE 519-2014. El FAP se diseña para compensar corrientes armónicas e inyectar potencia reactiva en la barra seleccionada.

Los resultados muestran que la barra 7 es la ubicación más adecuada. En esta barra, la THD se reduce del 8% al 1.5%. Al mismo tiempo, el FP mejora a valores cercanos a 1.0. Además, los niveles de voltaje en todas las barras se estabilizan. Esto asegura un suministro dentro de los límites operativos. El HHO demuestra su capacidad para identificar soluciones óptimas de manera precisa y eficiente.

Palabras Clave: Filtro Activo de Potencia; Optimización Harris Hawks; Distorsión Armónica Total; Factor de Potencia; Mitigación de Armónicos.

Abstract

This study proposes a strategy to mitigate harmonics and improve power quality. The solution is based on the implementation of a Shunt Active Power Filter (SAPF). The optimal location of the SAPF is determined using the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm. This method minimizes Total Harmonic Distortion (THD) and optimizes the Power Factor (PF). Additionally, it complies with voltage constraints and THD limits as per IEEE 519-2014 standards. The SAPF is designed to compensate harmonic currents and inject reactive power into the selected bus.

The results show that bus 7 is the most suitable location. At this bus, THD is reduced from 8% to 1.5%. Simultaneously, the PF improves to values close to 1.0. Moreover, voltage levels in all buses are stabilized, ensuring a supply within operational limits. The HHO demonstrates its capability to identify optimal solutions accurately and efficiently.

Keywords: Active Power Filter; Harris Hawks Optimization; Total Harmonic Distortion; Power Factor; Harmonic Mitigation.

1 Introducción

Los sistemas eléctricos modernos son cada vez más complejos debido a las cargas no lineales. Este incremento genera un impacto significativo en la estabilidad y eficiencia de dichos sistemas. Las sobrecargas armónicas se presentan como componentes de frecuencia múltiple respecto a la fundamental. Estas armónicas distorsionan las señales eléctricas y deterioran la eficiencia operativa. Además, afectan la calidad del suministro eléctrico y aumentan las pérdidas energéticas [1], [2], [3].

Las armónicas también aceleran el desgaste de equipos sensibles, como transformadores y motores. Este desgaste reduce significativamente la vida útil de estos dispositivos. Consecuentemente, los costos operativos aumentan debido a un mantenimiento más frecuente [4]. Para enfrentar este problema, se han desarrollado estrategias avanzadas de compensación armónica. Estas estrategias buscan mitigar los efectos negativos asociados a las sobrecargas armónicas de manera eficiente [5].

Los filtros activos de potencia son útiles para mitigar armónicas en sistemas eléctricos. A diferencia de los filtros pasivos, se adaptan en tiempo real a las variaciones. Esto permite generar corrientes de compensación precisas y minimizar eficazmente las distorsiones armónicas. Algunos estudios respaldan su eficacia en mejorar la calidad del suministro eléctrico [6], [7], [8].

La ubicación de estos filtros es clave para garantizar su eficiencia. Una colocación incorrecta puede reducir su efectividad y afectar el costo-beneficio. Investigaciones recientes destacan la importancia de estrategias óptimas para su ubicación [9], [10].

Existen algunas técnicas que se perfilan como factibles, entre las que se encuentran, los algoritmos genéticos (GA), así como, el optimizador por enjambre de partículas (PSO). Sin embargo, presentan retos como

la convergencia prematura y ajustes complejos de parámetros. Estas limitaciones se acentúan en sistemas eléctricos más grandes y complejos [11], [12].

Como alternativa a estas limitantes ha surgido El Algoritmo Harris Hawks (HHO). El cual es una herramienta destacada en la optimización multimodal. Este algoritmo se inspira en las estrategias de caza cooperativa de los halcones de Harris. Equilibra eficientemente la exploración y la explotación del espacio de búsqueda. Gracias a estas capacidades, el HHO encuentra soluciones de alta calidad en problemas complejos [13], [14]. Además, supera a métodos clásicos como PSO y GA en diversas aplicaciones. Estudios recientes resaltan su éxito en optimización estructural y control de sistemas eléctricos. Este algoritmo evita óptimos locales y converge rápidamente hacia soluciones globales [15]. Este trabajo presenta un enfoque distinto para mitigar sobrecargas armónicas mediante un filtro AC activo. La metodología trata de ubicar el filtro en la red eléctrica de manera óptima. Esto se realiza con la finalidad de reducir la distorsión armónica total (THD) y mejorar la calidad del suministro [16], [17]. A diferencia de estudios anteriores [18], [19], [20], este trabajo se enfoca en redes más grandes y complejas, como es el sistema de prueba IEEE de 14 barras. Esta solución es completa y está adaptada a las necesidades de sistemas modernos

Este artículo se organiza para facilitar la comprensión de los conceptos clave y los resultados. La Sección 2 explica el marco teórico y desarrolla una base conceptual precisa. Luego, la Sección 3 detalla la formulación del problema. En esta sección se incluye el modelado matemático del filtro activo. Además, se describe la función de optimización usada para determinar su ubicación óptima mediante el algoritmo Harris Hawks. La Sección 4 muestra los

resultados y destaca los hallazgos más relevantes. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones principales y sugiere posibles líneas de investigación futuras.

2 Sustento teórico

Para abordar la mitigación de sobrecargas armónicas, es esencial comprender conceptos fundamentales. Esta sección analiza las sobrecargas armónicas y su impacto en los sistemas eléctricos. También se describen los principios de los filtros AC activos como solución tecnológica clave. Además, se presenta el Algoritmo Harris Hawks (HHO) como una herramienta para la ubicación óptima del filtro.

2.1 Sobrecarga Armónica

La estabilidad de los sistemas eléctricos depende en gran medida de la calidad de las ondas sinusoidales. Estas distorsiones aparecen cuando existen componentes de frecuencia que son múltiplos de la fundamental como se observa en la Ecuación 1 [21].

$$f_n = n - f_1, \text{ donde } n \geq 2 \quad (1)$$

En esta expresión, n corresponde al número de armónica. Dispositivos como los rectificadores y variadores de velocidad generan estas distorsiones [22].

La Distorsión Total Armónica (THD) mide la relación entre las armónicas y la componente fundamental. Esta se representa mediante la Ecuación 2 [23].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} * 100 [\%] \quad (2)$$

En esta expresión, I_n es la amplitud de la n -ésima armónica e I_1 la magnitud de la fundamental. Un THD elevado genera sobrecalentamiento en transformadores y resonancias en redes eléctricas [24].

También afecta dispositivos sensibles y reduce la eficiencia del sistema.

El estándar IEEE 519-2014 recomienda mantener el THD por debajo del 5 % en redes de distribución [25], [26].

2.2 Filtros de compensación AC

Los filtros activos de potencia (FAP) desempeñan un papel importante en la mitigación de armónicas en los sistemas eléctricos. Estos dispositivos generan una corriente compensatoria, llamada $I_c(t)$, que cancela las armónicas presentes en la corriente de carga. Este funcionamiento se describe mediante la Ecuación 3 [27].

$$I_s(t) = I_c(t) + I_h(t) \quad (3)$$

En esta expresión, $I_s(t)$ es la corriente total suministrada por la red. La corriente resultante debe ser sinusoidal y libre de armónicas para asegurar la efectividad del filtro [28].

El control de los FAP se basa en identificar las armónicas mediante herramientas como la transformada rápida de Fourier (FFT) o el método p-q. Una vez detectadas, el filtro genera una corriente compensatoria usando un inversor de potencia. La corriente de referencia para el filtro se calcula mediante la Ecuación 4 [29].

$$I_c^*(t) = I_h(t) = I_s(t) - I_f(t) \quad (4)$$

En esta expresión, $I_f(t)$ es la componente fundamental de la corriente de carga [30]. La capacidad del filtro se determina evaluando la potencia aparente necesaria, que se expresa mediante la Ecuación 5 [31].

$$S_f = V_s * I_c \quad (5)$$

Aquí, V_s es la tensión del sistema e I_c es la corriente compensatoria máxima [32]. Este enfoque asegura una operación eficiente, mejorando la calidad del suministro eléctrico [33].

2.2.1 Tipos de FAPs

La calidad del suministro eléctrico puede verse comprometida por la presencia de armónicas. Para abordar este problema, se emplean FAPs [34]. Existen tres tipos principales de FAPs, como se presenta en la Figura 1, diseñados para enfrentar diferentes distorsiones. El filtro activo shunt (A) se instala en derivación a la carga. Su funcionamiento consiste en la mitigación de armónicas, mediante la producción de corrientes compensatorias. [35]. Asimismo, existe un segundo tipo denominado filtro activo serie (B), el cual, se conecta de forma consecutiva a la carga por medio de un transformador. [36]. Este sistema inyecta voltajes de compensación para corregir distorsiones de tensión. Finalmente, el filtro activo híbrido (C) combina las ventajas de los filtros activos y pasivos. Esta combinación permite una compensación más flexible y eficiente [37][31].

2.2.2 Teoría de potencia instantánea

La teoría P-Q es una herramienta clave para controlar filtros activos en los sistemas

eléctricos. Este se basa en la cuantificación de magnitudes eléctricas (voltaje-corriente). Las cuales sirven para identificar cargas no lineales y medir su contenido armónico [38].

Las expresiones matemáticas que describen las variables eléctricas de voltaje y corriente se expresan usando la Ecuación 6 y Ecuación 7. Luego, estas magnitudes se transforman mediante la transformada $\alpha\beta 0$, también conocida como transformada de Clarke [39]. Esta transformación convierte el sistema trifásico en uno bidimensional equivalente. De esta forma, se simplifica el procesamiento y el análisis de las componentes armónicas presentes en el sistema eléctrico [40], [41].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

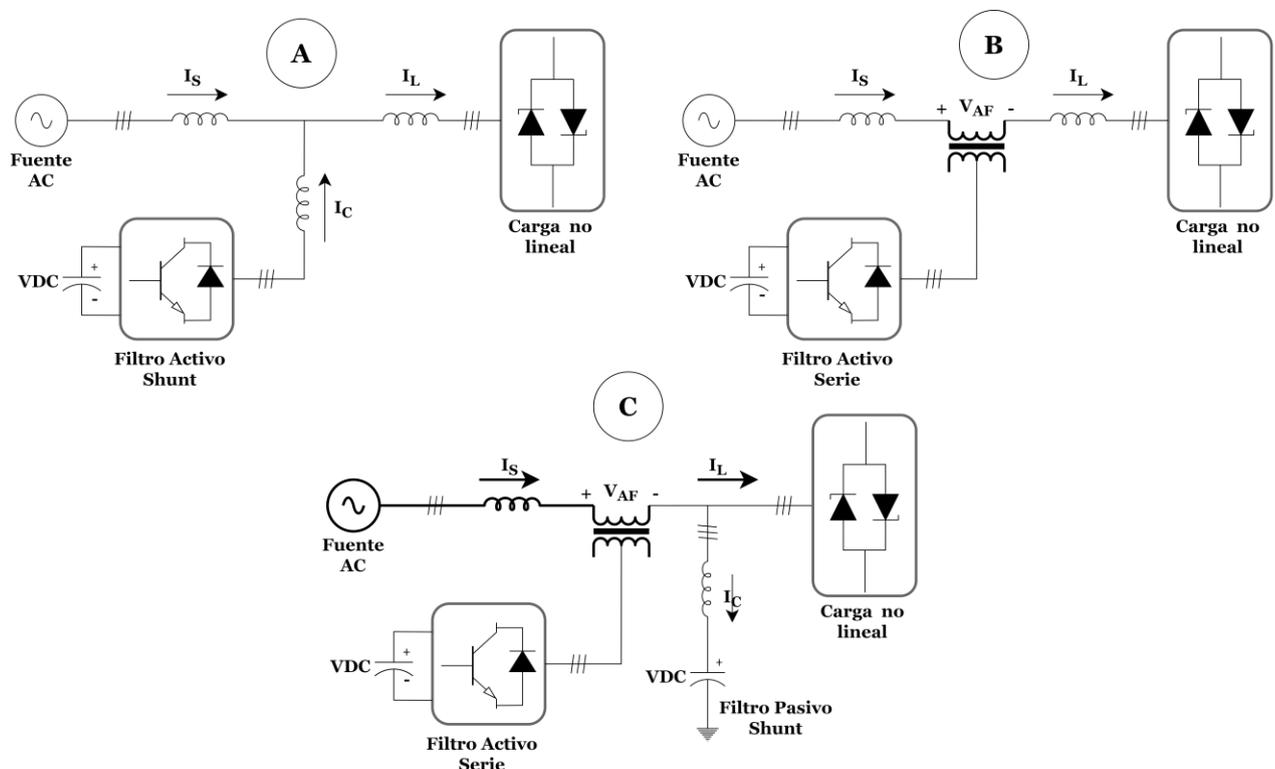


Figura 1. Clasificación de FAPs

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ [I_\alpha] \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ [I_b] \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Las componentes de voltaje V_0 , V_α y V_β corresponden a la secuencia cero y a los ejes α y β [42]. De forma similar, las componentes de corriente I_0 , I_α y I_β representan las mismas referencias [43].

Los valores de voltaje de fase V_a , V_b y V_c provienen del medidor de la generación. Por otro lado, los flujos de corriente entrantes I_a , I_b e I_c corresponden a la carga [44]. La transformada de Clarke convierte estas variables trifásicas en un sistema bidimensional. Este proceso facilita el cálculo y el análisis de las magnitudes transformadas.

Mediante estas transformaciones, es posible representar la potencia instantánea [45], [46]. Es así como, mediante la Ecuación 8 y 9 se expresa la parte activa de la potencia. Por su parte, la potencia reactiva instantánea se describe en la Ecuación 10 [47].

$$p_o(t) = V_0(t)i_o(t) \quad (8)$$

$$p(t) = V_\alpha(t) \cdot i_\alpha(t) + V_\beta(t) \cdot i_\beta(t) \quad (9)$$

$$q(t) = V_\alpha(t) \cdot i_\beta(t) - V_\beta(t) \cdot i_\alpha(t) \quad (10)$$

En estas expresiones se describe tres componentes principales de la potencia: $p_o(t)$, $p(t)$ y $q(t)$. Las cuales corresponde a su componente de secuencia cero, así como, la parte activa y reactiva de la potencia [44]. Cuando existe un equilibrio en las variables eléctricas de corriente y tensión, la componente $p_o(t)$ es igual a cero. Esto también ocurre si no existen armónicos de secuencia cero, como indica la Ecuación 11 [48]. Además, el método P-Q se caracteriza por dividir la componente activa y reactiva de potencia en sus componentes de corrientes continua y alterna. Esta división facilita su análisis, como se observa en la Ecuación 12.

$$\begin{bmatrix} p_o \\ [p] \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ [i_\alpha] \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ [q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ [\bar{q}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ [\tilde{q}] \end{bmatrix} \quad (12)$$

En este contexto, la parte de corriente continua de la potencia activa y reactiva se vincula con la tensión y corriente fundamental. Estas magnitudes se asocian a \bar{p} y \bar{q} , por separado. Por otro lado, los valores oscilatorios de corriente alterna corresponden a los armónicos activos y reactivos. Dichos valores se denotan como \tilde{p} y \tilde{q} [49].

En consonancia, al dividir las componentes de corriente continua (DC) y alterna (AC), se logra mitigar el porcentaje armónico. La Ecuación 13 describe esta separación para los valores DC, mientras que la Ecuación 14 lo hace para los valores AC. Mediante el filtrado de la señal, se obtiene la información oscilatoria requerida. Esta información permite generar la energía compensatoria que se introduce al sistema [50]. Finalmente, para asegurar una compensación reactiva efectiva, se debe incluir la componente media DC. Esta componente forma parte de la potencia reactiva de compensación, como se establece en la Ecuación 15 [49].

$$p_c = -\tilde{p} \quad (13)$$

$$q_c = -q \quad (14)$$

$$q_c = -\bar{q} - \tilde{q} \quad (15)$$

Cuando no hay desbalance en tensión o corriente, la potencia resultante es igual a cero. Lo mismo ocurre si no existe contenido armónico de secuencia cero. Sin embargo, cuando hay armónicos presentes, la potencia de compensación toma un valor distinto de cero. Este comportamiento se describe en la Ecuación 16 [51].

Después de filtrar las señales, estas se reemplazan en la matriz de energía instantánea. La Expresión 17 muestra cómo se realiza este proceso. Finalmente, para calcular las intensidades compensatorias $\alpha\beta 0$, se aplica la Expresión 18.

$$p_{oc} = -p_0 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{oc} \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

El arreglo de Clark se invierte y se resuelve tras simplificar los términos correspondientes. Este proceso genera una nueva expresión matricial, como se indica en la Ecuación 19. En dicha expresión, las corrientes incluyen el subíndice “c”. Este subíndice identifica que corresponden a magnitudes de compensación.

$$\begin{bmatrix} i_{oc} \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & -V_\beta \\ 0 & V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Aquí, la intensidad compensatoria adopta un valor negativo, como se observa en la Ecuación 20. Luego, se calcula la inversa del resultado obtenido. Este paso permite retornar al sistema de referencia inicial, según se indica en la Ecuación 21.

$$i_{oc} = -i_0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{oc} \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Las intensidades compensatorias i_{ca} , i_{cb} e i_{cc} se convierten en punto referente para el esquema PWM. Este proceso resulta esencial porque permite generar pulsos

precisos para controlar el tiempo de activación del inversor [52].

2.3 Algoritmo de optimización Harris Hawks

Inspirado en la naturaleza, esta técnica emula el comportamiento cooperativo de caza de los halcones de Harris. En este modelo, las posiciones de los halcones (X_i) representan soluciones candidatas. Por su parte, la ubicación de la presa se considera el óptimo global (X^*) [53], [54]. El proceso del HHO se organiza en dos etapas principales: exploración y explotación.

Exploración: Durante esta fase, los halcones realizan búsquedas aleatorias para identificar presas. La nueva posición de un halcón se calcula mediante la Ecuación 22.

$$X(t+1) = X_{rand}(t) - r_1 |2r_2 X_{rand}(t) - X(t)| \quad (22)$$

En esta expresión, X_{rand} es una solución seleccionada aleatoriamente. Los parámetros r_1 y r_2 son valores aleatorios dentro del intervalo $[0, 1]$ [55], [56].

Explotación: En esta etapa, los halcones emboscan a la presa. La estrategia seleccionada depende de la capacidad de escape de la presa, representada por el parámetro E . Según su valor, se aplica una de las siguientes técnicas:

Si $|E| \geq 1$: Se implementa una estrategia de persecución lineal, definida por la Ecuación 23 [57].

$$X(t+1) = X^*(t) - E |2rX^*(t) - X(t)| \quad (23)$$

En esta expresión, r es un valor aleatorio [58]. Asimismo, el parámetro E se calcula mediante la Ecuación 24.

$$E = 2 * \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (24)$$

En esta expresión, t es la iteración actual y T el total de iteraciones.

Si $|E| < 1$: Se aplica una estrategia de emboscada parabólica, expresada mediante la Ecuación 25 [59].

$$X(t + 1) = X^*(t) + r(X^*(t) - X(t))^2 \quad (25)$$

En esta expresión, r es un número aleatorio. Estas estrategias aseguran un equilibrio efectivo entre exploración y explotación del espacio de búsqueda. Dicho balance permite que el HHO evite los óptimos locales y alcance con rapidez la solución global óptima [60].

3 Formulación del problema

Cuando existen cargas no lineales, la calidad de energía se afecta significativamente. Estas cargas generan armónicas que distorsionan las ondas de corriente y voltaje. Como resultado, se producen pérdidas energéticas, daños en equipos eléctricos y una menor vida útil de los dispositivos conectados.

Para mitigar este problema, se implementa un Filtro Activo de Potencia (FAP). Este dispositivo funciona con el esquema compensatorio P-Q. Esta metodología calcula, en tiempo real, las corrientes de compensación necesarias. Dichas corrientes se inyectan al sistema para eliminar las armónicas y mejorar la calidad del suministro.

La ubicación óptima del filtro se determina usando el Algoritmo de optimización Harris Hawks (HHO). El proceso comienza con el modelado del sistema eléctrico IEEE de 14 barras. En esta etapa, se identifican las cargas no lineales y se calcula la Distorsión Total Armónica (THD) inicial. Luego, el algoritmo HHO optimiza la ubicación del filtro para minimizar la THD. Durante esta fase, se consideran restricciones técnicas y las normativas del estándar IEEE 519-2014. La implementación y simulación del sistema se realizan en Matlab-Simulink. Para esto, se utiliza el modelo IEEE de 14 barras. Se evalúa el rendimiento del filtro

activo en la ubicación óptima. Finalmente, se compara el sistema antes y después de la compensación. Este análisis considera parámetros como la THD, las corrientes y los voltajes. Esto se realiza con la finalidad de comprobar la eficacia del enfoque propuesto en la investigación.

3.1 Función objetivo

Se propone como propósito principal, reducir la THD, al mismo tiempo que se fortalece el factor de potencia (FP). Ambos criterios se integran en una función ponderada que evalúa cada solución generada por el algoritmo HHO. Esta función se representa mediante la Ecuación 26.

$$\min f(x) = w_1 THD(x) + w_2 (1 - FP(x)) \quad (26)$$

En esta expresión, w_1 y w_2 corresponden a los pesos asignados a cada objetivo según su prioridad.

3.1.1 Cómputo del THD

La THD mide el nivel de armónicas presentes en una señal de voltaje. Su cálculo está definido por la Ecuación 27.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2} * 100 \quad (27)$$

En este sentido,

V_n es la amplitud del n -ésimo armónico, V_1 representa la amplitud de la componente fundamental.

3.1.2 Cómputo del FP

El factor de potencia refleja la eficiencia en el uso de la energía dentro del sistema. La expresión utilizada para calcularlo es la Ecuación 28.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (28)$$

En este sentido,

P es la potencia activa y,

S la potencia aparente. Esta a su vez se determina mediante la Ecuación 29.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (29)$$

En esta expresión, Q es la potencia reactiva. Optimizar el FP permite reducir las pérdidas asociadas a la potencia reactiva y aumentar el rendimiento del sistema.

3.2 Restricciones del modelo

El modelo propuesto funciona bajo restricciones técnicas que garantizan su estabilidad y cumplimiento de estándares. Estas condiciones aseguran un funcionamiento eficiente y seguro del sistema eléctrico. Entre estas se identifican, el límite máximo de THD, el factor de potencia mínimo, los límites de voltaje en los nodos y los límites de corrientes en las líneas.

3.2.1 Límite Máximo de THD

La distorsión armónica total debe mantenerse dentro de los límites definidos por la normativa IEEE 519-2014. Cumplir con esta restricción asegura la calidad del suministro eléctrico. También garantiza un funcionamiento adecuado del sistema. Matemáticamente, la condición se expresa mediante la Ecuación 30.

$$THD(x) \leq THD_{max} \quad (30)$$

Aquí, THD_{max} representa el valor máximo permitido de distorsión armónica.

3.2.2 Factor de Potencia Mínimo

El FP debe ser igual o superior al valor mínimo especificado. Esta restricción permite garantizar un uso eficiente de la energía en el esquema. La condición se muestra en la Expresión 31.

$$\cos(\theta) \geq \cos(\theta_{min}) \quad (31)$$

En este sentido, $\cos(\theta_{min})$ representa el valor límite aceptable. Generalmente, este valor se fija en 0.9.

3.2.3 Límites de Voltaje en los Nodos

El voltaje en cada nodo debe mantenerse dentro de un rango seguro de operación. Esta condición asegura la estabilidad del sistema y previene problemas como sobrevoltajes y subtensiones. La restricción se expresa matemáticamente mediante la Ecuación 32.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (32)$$

Aquí, V_i es el voltaje en el nodo i . Los valores V_{min} y V_{max} definen los límites inferior y superior permitidos.

3.2.4 Límites de Corriente en las Líneas:

La corriente en cada línea o componente debe respetar los valores límite establecidos en el diseño del sistema. Cumplir con esta condición previene sobrecargas y disminuye el riesgo de fallas en la red. La restricción se formula mediante la Ecuación 33.

$$I_{min} \leq I_j \leq I_{max} \quad (33)$$

En este sentido, I_j es la corriente en la línea j . Los valores I_{min} y I_{max} representan los límites mínimo y máximo permitidos, respectivamente.

3.3 FAP propuesto

La propuesta implementa un Filtro Activo de Potencia (FAP) de tipo shunt, conectado en paralelo con la carga no lineal como se presenta en la Figura 2. Este dispositivo inyecta corrientes de compensación con igual magnitud, pero con fase opuesta a las armónicas generadas.

De esta manera, el filtro elimina las distorsiones en la corriente. Esto mejora la calidad de la energía suministrada de forma significativa. Además, la configuración permite reducir la Distorsión Total Armónica (THD). También mejora el factor de potencia del sistema eléctrico.

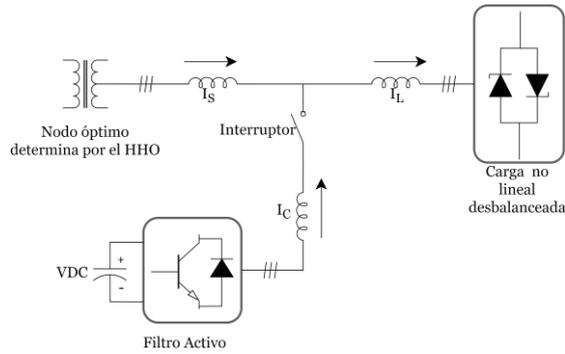


Figura 2. Filtro activo de potencia propuesto.

3.3.1 Algoritmo de control de potencia instantánea propuesto

El enfoque propuesto se basa en el esquema P-Q, mismo que se expresa mediante un algoritmo de control. El cual se organiza mediante bloques interconectados de forma lógica. Esta estructura se ilustra claramente en la Figura 3.

En el primer bloque, las magnitudes eléctricas de corriente y tensión se convierten en un esquema cartesiano. Este proceso es posible empleando la Ecuación 34 [61].

$$\begin{bmatrix} f_\alpha[n] \\ f_\beta[n] \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a[n] \\ f_b[n] \\ f_c[n] \end{bmatrix} \quad (34)$$

En el bloque 2, se cuantifica la magnitud de la potencia y se comprueba su estatus. En este sentido, es necesario realizar el cómputo de la potencia instantánea, misma que se expresa mediante la Ecuación 35.

$$\begin{bmatrix} p[n] \\ q[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha[n] & v_\beta[n] \\ -v_\beta[n] & v_\alpha[n] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha[n] \\ i_\beta[n] \end{bmatrix} \quad (35)$$

Las variables resultantes, de forma consecuente se dividen en sus partes correspondientes. Estas partes se dividen en tres categorías principales. La primera corresponde al armónico fundamental asociado a la secuencia positiva. Por su parte, la segunda corresponde a los armónicos asociados a las intensidades de mayor valor. Finalmente, se consideran las distorsiones de sucesión negativa, según lo establece la Ecuación 36.

$$\begin{bmatrix} p[n] \\ q[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p}[n] \\ \tilde{q}[n] \end{bmatrix} \quad (36)$$

La distorsión fundamental se ajusta a la potencia instantánea \bar{p} . La cual, indica la corriente RMS menor necesaria para entregar la potencia activa hacia la carga. En cambio, \tilde{p} representa las componentes armónicas de serie negativa, así como, las distorsiones de cadena positiva en la fuente de generación.

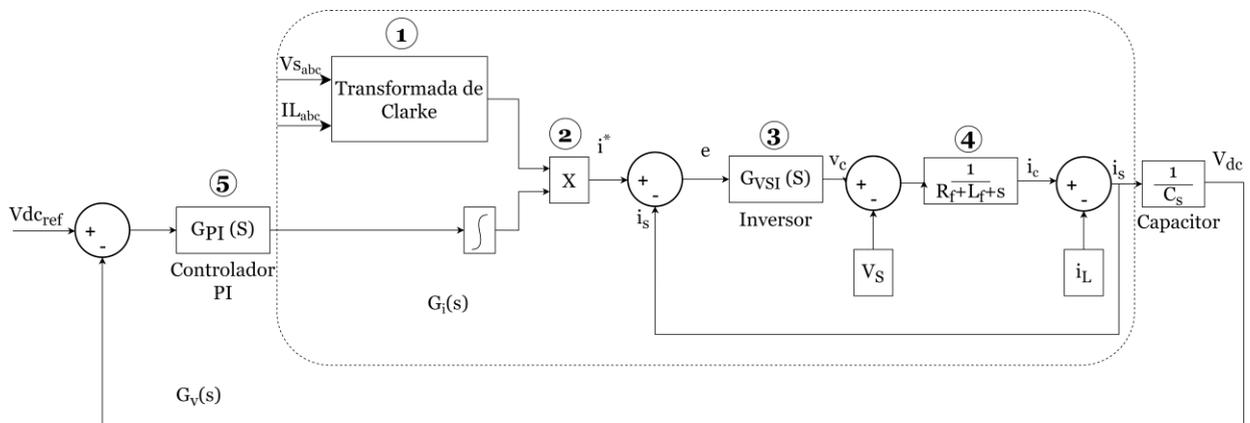


Figura 3. Teoría de control de potencia instantánea.

La constante \bar{q} está relacionada con la potencia imaginaria del armónico fundamental. En cambio, \tilde{q} corresponde al factor imaginario.

Esto proporciona una respuesta teóricamente infinita, como se detalla en el bloque 3. El sistema de coordenadas a-b simplifica las ecuaciones y facilita el cálculo de las intensidades de compensación.

Previo a la conmutación del FAP, la corriente de la fuente se transforma al esquema α - β . Esta transformación se expresa de forma adecuada por medio de la Ecuación 37.

$$= \frac{1}{v_\alpha^2[n] + v_\beta^2[n]} \begin{bmatrix} i_\alpha[n] \\ i_\beta[n] \\ v_\alpha[n] \\ v_\beta[n] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -v_\beta[n] \\ v_\alpha[n] \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} + \tilde{p}[n] \\ \tilde{q} + \tilde{q}[n] \end{bmatrix}$$

Se presenta las variables correspondientes al esquema compensatorio respaldado por la técnica P-Q.

Símbolo	Variable	Unit
V	Voltaje de línea o fase	Voltios
I	Corriente de línea o fase	Amperios
P	Potencia activa instantánea	Vatios
Q	Potencia reactiva instantánea	VAR
p(t)	Componente activa de potencia instantánea	W
q(t)	Componente reactiva de potencia instantánea	VAR
V α	Componente de voltaje en el eje Alpha	V
V β	Componente de voltaje en el eje beta	V
i α	Componente de corriente en el eje Alpha	A
i β	Componente de corriente en el eje beta	A
p~	Componente alterna de la potencia activa	W
q~	Componente alterna de la potencia reactiva	VAR
p _c	Potencia activa compensada	W
q _c	Potencia reactiva compensada	VAR
k _p	Parámetro proporcional del controlador	Adimensional

k _i	Parámetro integral del controlador	Adimensional
n ₀ , n ₁	Coefficientes del sistema	Adimensional
d ₁ , d ₂	Variables relacionadas con el denominador del sistema	Adimensional
i _{ca} , i _{cb} , i _c	Corrientes de compensación en fases a, b, ca, b, ca, b, c	A
I ₀	Diferencia de corriente para el control del inversor	A
I _c	Corriente de referencia del controlador	A
I _{abc}	Corriente trifásica de entrada	A
Pulso	Señal de activación del inversor	Adimensional (1 o 0)

Por último, se presenta el pseudocódigo correspondiente al esquema compensatorio respaldado por la técnica P-Q.

Algoritmo 1. Compensación mediante técnica de potencia instantánea.

Fase 1	Se debe iniciar algunos parámetros: V I P-Q
Fase 2	Determinación de magnitud de potencia Hacer para todo t $p(t) = V_\alpha(t) \cdot i_\alpha(t) + V_\beta(t) \cdot i_\beta(t)$ $q(t) = V_\alpha(t) \cdot i_\beta(t) - V_\beta(t) \cdot i_\alpha(t)$
Fase 3	Descomposición y filtrado de componentes. Hacer para todo t $p_c = -\tilde{p}$ $q_c = -\tilde{q}$
Fase 4	Ajuste de los parámetros del convertidor Hacer para todo n $k_p = \frac{n_1 d_1 - n_0 d_2}{d_1^2}$ $k_i = \frac{n_0}{d_1}$
Fase 5	Implementación de la compensación Hacer para todo t $q_c = -\tilde{q} - \tilde{q}$

Fase 6 Estimación de las corrientes de compensación.
Hacer para todo t
 i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}

Fase 7 Producción de pulsos PWM
Hacer para todo t
 $I_o = I_c - I_{abc}$
Si $I_o \geq 0.02$
Pulso=1
Caso contrario
Si $I_o < -0.02$
Pulso=0
Fin si

Fase 8 Reinicio del ciclo

La fuente de generación es asimétrica y se representa por medio de la Ecuación 38. Esta expresión analiza las diferencias entre fases y evalúa el comportamiento del sistema asimétrico.

En el bloque 4, se establece la intensidad de compensación aplicando la Expresión 39. Esta corriente tiene como objetivo corregir distorsiones y mejorar la calidad de la energía. Su cálculo resulta fundamental para garantizar un funcionamiento equilibrado y eficiente del sistema eléctrico.

$$v_\alpha[n]^2 + v_\beta[n]^2 = 3|V_\alpha|^2 \quad (38)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} i_\alpha[n] \\ i_\beta[n] \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\begin{bmatrix} v_\alpha^2[n] + v_\beta^2[n] \\ v_\alpha[n] & -v_\beta[n] \\ v_\beta[n] & v_\alpha[n] \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} p_k[n] \\ q_k[n] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (39)$$

3.4 Modelo de optimización Harris Hawks propuesto

Las variables del modelo propuesto inician se presenta a continuación

Simbología	Variable	Unit
------------	----------	------

V	Voltajes del sistema eléctrico	Volts (V)
I	Corriente del sistema eléctrico	Amperes (A)
FP	Factor de potencia	Adimensional
THDj	Distorsión armónica total en el nodo j	Porcentaje (%)
N	Tamaño de la población	---
Tmax	Número máximo de iteraciones	Iteraciones
X	Conjunto de posiciones de búsqueda de los halcones	---
Xi(t)	Posición del halcón i en el tiempo t	---
X^*	Mejor posición conocida (presa óptima)	---
Xrand(t)	Posición aleatoria seleccionada en la búsqueda global	---
f(x)	Función objetivo	---
E	Energía de la presa	---
q	Variable aleatoria para seleccionar estrategia de búsqueda	---
J	Variable aleatoria para ajustar el movimiento de la presa	---
Vmin, Vmax	Límite inferior y superior de voltaje	Volts (V)
Imin, Imax	Límite inferior y superior de corriente	Amperes (A)
$\cos(\theta_{min})$	Límite inferior del factor de potencia	Adimensional
THDmax	Límite máximo permitido para la distorsión armónica total	Porcentaje (%)

El pseudocódigo del modelo propuesto inicia se presenta a continuación.

Algoritmo 2. Compensación mediante técnica de potencia instantánea y ubicación óptima mediante HHO.

Fase 1 Configurar parámetros iniciales del sistema eléctrico

	Voltajes V Corriente I Factor de potencia FP	$X_i(t + 1) = mean(X)$ $- E J mean(X)$ $- X_i(t)$
Fase 2	Cálculo del THD en cada nodo. Hacer para todo $j = 1: 14$ $THF_j = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{V_{nj}}{V_{1j}}\right)^2} * 100$	e) Ajustar posición Encontrar la posición válida más cercana. $X_i(t + 1) \leftarrow posiciones\ válidas$
Fase 3	Parametrización de la función objetivo $f(x) = w_1 THD(x) + w_2(1 - FP(x))$	f) Evaluar función objetivo $f(X_i(t + 1))$
Fase 4	Establecer restricciones Hacer para todo nodo $j = 1: 14$ $THD(x) \leq THD_{max}$ $\cos(\theta) \geq \cos(\theta_{min})$ $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$ $I_{min} \leq I_j \leq I_{max}$	g) Actualizar la presa (mejor solución) Si $f(X_i(t + 1)) < f(X^*)$ entonces $X^* = X_i(t + 1)$
Fase 5	Inicializar algoritmo HHO Definir parámetros N Tamaño de la población. T_{max} Número máximo de iteraciones. Generar posiciones iniciales aleatorias $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ Hacer para todo $i = 1: longitud(X)$ Evaluar $f(x_i)$ para cada posición inicial.	Fase 7 Criterio de convergencia Si $t = T_{max}$ $f(X(t)) - f(X(t - 1)) < \varepsilon$ Terminar Bucle
Fase 6	Ejecutar bucle principal de HHO Hacer mientras $t \leq T_{max}$ Hacer para todo halcón $i = 1: N$ a) Calcular la energía de la presa $E = 2 \left(1 - \frac{t}{T_{max}}\right)$ b) Generar valores aleatorios $q = rand(), J = 2(1 - rand())$ c) Si $q < 0.5$ Si $ E \geq 1$ Exploración – búsqueda global $X_i(t + 1) = X_{rand}(t)$ Caso contrario Movimiento de la presa $X_i(t + 1) = X^* - E JX^* - X_i(t) $ d) Caso contrario $q \geq 0.5$ Si $ E \geq 0.5$ Exploración suave $X_i(t + 1) = X^* - E JX^* - X_i(t) $ Caso contrario Exploración dura	Fase 8 Seleccionar la mejor solución $best(X^*)$ THD_{min} FP_{max}
		Fase 9 <u>Fin del algoritmo</u>

El pseudocódigo comienza con la inicialización de los parámetros del sistema eléctrico y del algoritmo HHO. En esta etapa, se definen los valores iniciales de voltajes, corrientes y el factor de potencia. También se calculan los valores iniciales de la Distorsión Total Armónica (THD) en cada nodo. Estos cálculos consideran la suma de las componentes armónicas normalizadas.

Luego, se establece la función objetivo. Su propósito es minimizar la THD y maximizar el FP. La función está sujeta a restricciones técnicas. Estas incluyen los límites máximos de THD, los valores mínimos del FP y los rangos aceptables de voltaje.

El algoritmo HHO inicia generando posiciones aleatorias para los halcones. Cada posición representa una ubicación potencial para el Filtro Activo de Potencia (FAP). Durante el bucle principal, las posiciones se actualizan iterativamente. Este proceso se divide en dos fases: exploración y explotación. En la

exploración, se buscan nuevas ubicaciones dentro del espacio de búsqueda. En la explotación, las posiciones se ajustan usando valores aleatorios y la distancia respecto a la mejor solución.

Las posiciones generadas se evalúan con la función objetivo. Si cumplen las restricciones y reducen la THD, la mejor solución se actualiza. Al finalizar las iteraciones, se selecciona la ubicación óptima del FAP. Finalmente, el filtro activo se implementa en el sistema. Esto permite recalcular la THD y el FP para comparar los resultados antes y después de la compensación.

3.5 Caso de estudio

El sistema IEEE de 14 barras, propuesto como red de prueba, consta de 14 nodos. Incluye 20 líneas de transmisión, 3 barras de generación (barras 1, 2 y 3) y 11 nodos de carga (barras 4 a 14). La barra 1 se define como nodo de referencia o "slack bus". Las barras restantes distribuyen la potencia hacia las cargas conectadas.

Este sistema incluye cargas no lineales que generan distorsiones armónicas. Estas distorsiones se evalúan mediante la Distorsión Total Armónica (THD). Su presencia afecta negativamente la calidad de la energía y puede provocar fallos en los equipos conectados. Para mitigar estos armónicos y mejorar el rendimiento, se propone usar un Filtro Activo de Potencia (FAP). La ubicación óptima del filtro se determina utilizando un algoritmo HHO.

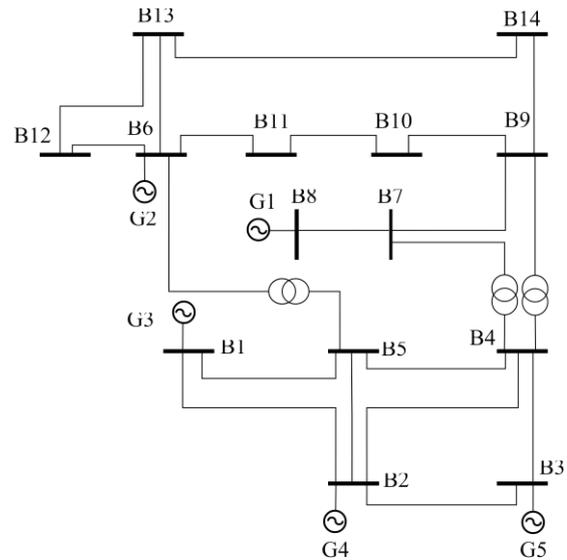


Figura 4. Sistema de prueba propuesto.

4 Análisis de resultados

En esta sección se analiza el desempeño del sistema IEEE de 14 barras propuesto. Este estudio considera la incorporación de un Filtro Activo de Potencia (FAP). La ubicación óptima del filtro se determina mediante el Algoritmo Harris Hawks Optimization (HHO). El análisis se enfoca en indicadores clave de calidad de energía. Estos incluyen la THD, el FP y los niveles de voltaje. Además, se comparan estos parámetros antes y después de aplicar la compensación. Los resultados obtenidos se detallan a continuación.

4.1 Análisis de la respuesta del HHO

La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos al aplicar el Algoritmo Harris Hawks. Este identifica la barra 7 como la ubicación más adecuada, con un valor de 8.38 en la función objetivo. Este resultado evidencia que la barra 7 contribuye significativamente a la Distorsión Total Armónica (THD) y al deterioro del factor de potencia (FP) en el sistema.

Las barras 9 y 10, con valores de 5.23 y 4.27 respectivamente, se identifican como opciones secundarias. Aunque su impacto es menor que el de la barra 7, también presentan niveles importantes de distorsión.

El HHO prioriza la compensación en la barra más crítica, logrando así una reducción notable de la THD y una mejora en el FP.

Tabla 1. Resultados del algoritmo HHO.

Posición óptima	Barra	Valor de la Función Objetivo
Primera	7	8.38
Segunda	9	5.23
Tercera	10	4.27

En consecuencia, el algoritmo demuestra su capacidad para explorar el espacio de búsqueda y converger hacia soluciones óptimas.

4.2 Análisis del contenido armónico

En la Figura 5 se expone el contenido armónico presente en la barra 7. Se observa que, ante la ausencia del filtro, existe contenido armónico en las frecuencias 300 y 400 Hz, las cuales, adoptan un valor de 7230.49 y 3118.38 A respectivamente.

Por el contrario, cuando el filtro esta presente en el sistema, el contenido armónico antes registrado disminuye. Es así como, las armónicas en las frecuencias de 300 y 400 Hz adoptan el valor de 534.42 y 593.47 A respectivamente.

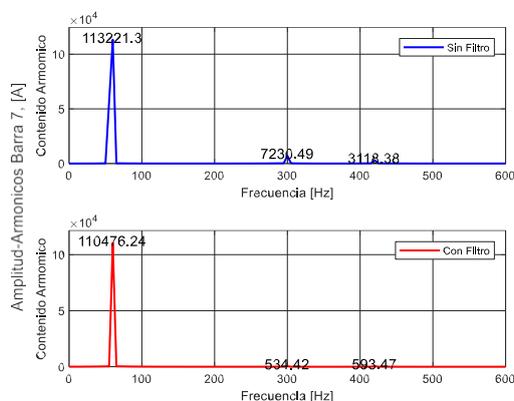


Figura 5. Contenido armónico en la barra 7.

Asimismo, el comportamiento del contenido armónico de la barra 9 se presenta en la Figura 6. En este se evidencia que sin el filtro existe contenido armónico en las frecuencias de 300 y 400 Hz, mismas que poseen una magnitud de 4616.89 y 1969.84 A. En contraste, cuando se coloca el filtro se disminuye el contenido armónico, puesto que, las frecuencias de 300 y 400 Hz adoptan los valores de 339.81 y 375.53 A.

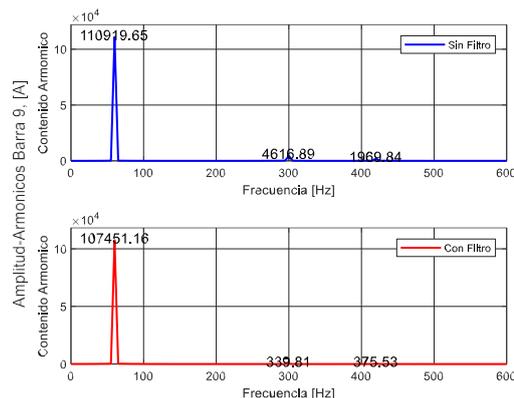


Figura 6. Contenido armónico en la barra 9.

Por último, en la Figura 7 se expone el contenido armónico de la barra 10. En esta se observa que, ante la ausencia del filtro, las frecuencias de 300 y 400 Hz registran valores de 3766.42 y 1606.13 A. No obstante, cuando se incluye el filtro, las frecuencias antes descritas disminuyen su magnitud a 0 y 306.37 A respectivamente.

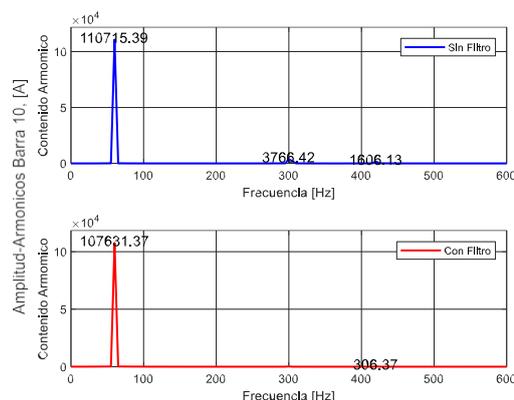


Figura 7. Contenido armónico en la barra 10.

4.3 Análisis del factor de potencia

La Figura 8 analiza el FP en todas las barras del sistema. En el escenario sin filtro (gráfico superior), las barras 6, 8 y 10 presentan valores muy bajos. Estos valores, cercanos a 0.1, 0.5 y 0.8, reflejan una alta demanda de potencia reactiva. Este desequilibrio afecta el uso eficiente de la potencia activa.

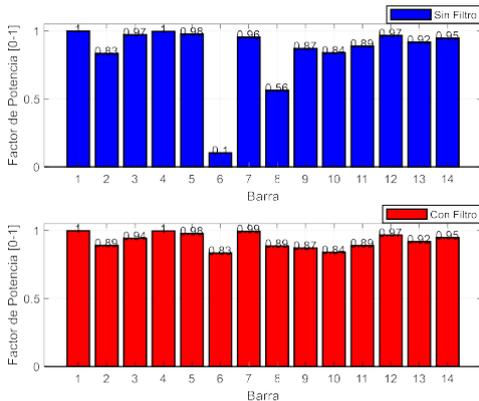


Figura 8. Comportamiento del FP en el sistema de prueba.

Por el contrario, el escenario con filtro (gráfico inferior) evidencia una mejora significativa en el FP. La implementación del FAP eleva los valores a niveles cercanos a 1.0 en todas las barras. Esto demuestra una compensación efectiva de la potencia reactiva.

4.4 Análisis de la THD

La Figura 9 muestra los niveles de THD en las barras del sistema antes y después de implementar el FAP. En el escenario sin filtro (gráfico superior), los niveles de THD exceden el límite del 5% según la normativa IEEE 519-2014. Las barras 7, 9 y 10 presentan valores críticos, alcanzando hasta un 8% en la barra 7.

En el escenario con filtro (gráfico inferior), los niveles de THD disminuyen significativamente gracias a la implementación del FAP. La barra 7 reduce su THD a aproximadamente 1.8%, cumpliendo con los límites normativos. Las barras 9 y 10 también muestran mejoras notables en sus niveles de distorsión. Esto

confirma la eficacia del filtro para mitigar armónicos y mejorar la calidad de la energía en los nodos más afectados del sistema.

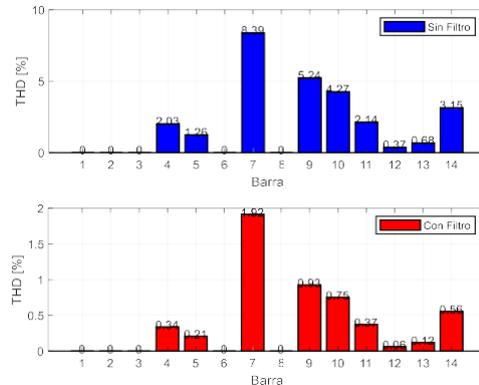


Figura 9. Comportamiento de la THD en el sistema de prueba.

4.5 Análisis del voltaje

Con referencia al perfil de tensión presentado en la Figura 10, se observa que el voltaje ante la ausencia del filtro no varía significativamente cuando el filtro ya se conecta al sistema.

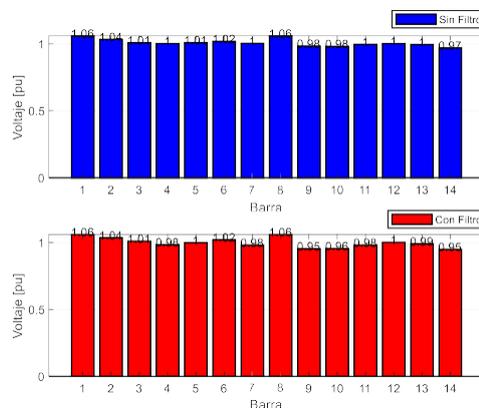


Figura 10. Comportamiento del perfil de voltaje en el sistema de prueba.

5 Análisis enfocado en las ventajas y desventajas del método propuesto con respecto a otros métodos

Este análisis busca resaltar las ventajas y desventajas en base al algoritmo de Harris Hawks y el filtro activo de potencia.

1. Algoritmos de optimización: comparación del HHO con PSO y GA.

garantizar su funcionamiento y esto al hacerse incrementa los costos operativos.

Ventajas del HHO

- Equilibrio entre exploración y explotación
- Encuentra soluciones optimas rápidamente en sistemas complejos
- Menor dependencia de parámetros

Desventajas del HHO

- Mayor tiempo de simulación.
- En redes eléctricas con cambios rápidos en la carga este puede requerir ajustes adicionales.

2. Filtros Activos frente a Filtros Pasivos y Mixtos

Los filtros Pasivos y Mixtos han sido utilizados casi siempre en la mitigación de armónicos debido a sus facilidades y bajo costo. Sin embargo, el método basado en FAP presenta importantes ventajas técnicas.

Ventajas del FAP

- Es capaz de ajustar su comportamiento en función de las condiciones de carga y el espectro armónico.
- Tiene un amplio rango de compensación tanto de armónicos individuales como complejos
- Además de reducir el THD optimiza el factor de potencia.

Desventajas del FAP

- Suelen ser más costosos por su complejidad tecnológica.
- Necesitan vigilancia y mantenimiento periódico para

6 Conclusiones

La modelación del sistema de prueba IEEE de 14 barras en Matlab en mathpower fue exitosa y proporciono una base sólida para la implementación del filtro y el algoritmo de optimización. La identificación de problemas de armónicos iniciales y su posterior mitigación validan la metodología empleada en la investigación.

El factor de potencia del sistema mejoro notablemente después de la implementación del filtro. Los valores promedio aumentaron de 0.75 a 0.90 indicando una mejora del 20%.

El algoritmo de Harris Hawks demostró ser una herramienta efectiva para la optimización de la ubicación del filtro AC activo de rango completo. La curva de convergencia del algoritmo mostro una tendencia descendente consistente, indicando que el algoritmo estaba encontrando soluciones cada vez mejores para minimizar la THD y el FP. Esto se logró con la implementación del filtro AC activo de rango completo sus valores son una distorsión armónica total de los valores promedio de THD se redujeron del 15 % al 7% lo que representa una disminución del 53.33%, esta mejora sustancial confirma la efectividad del filtro y la precisión del algoritmo en identificar la ubicación óptima para su implementación.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones importantes, en lo que a la calidad de la energía se refiere. Puesto que, reduce la distorsión armónica y mejora el factor de potencia, los cuales, contribuyen a un tener sistema más eficiente y estable,

reduciendo los riesgos de fallos en los equipos y mejorando la satisfacción de los usuarios finales

6.1 Trabajos futuros

Se sugiere realizar simulaciones adicionales en otros sistemas de prueba y en condiciones variadas para validar la generalización de los resultados y también investigar otros algoritmos de optimización para comparar su efectividad con el algoritmo de Harris Hawks en la mitigación de armónicos. Además, sería útil explorar la aplicación de esta solución en diferentes tipos de sistemas de energía, como micro redes y sistemas de energía renovable.

7 Referencias

- [1] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo, and O. Duque-Perez, "A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6467, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206467.
- [2] Timsi and D. N. Kumar Yadav, "Harmonics Distortion in Distribution Systems: A Review of Non-Linear Load Effects and Solutions," *Int. J. Enhanc. Res. Sci. Technol. Eng.*, vol. 13, no. 08, pp. 90–95, 2024, doi: 10.55948/IJERSTE.2024.0810.
- [3] A. Taghvaie, T. Warnakulasuriya, D. Kumar, F. Zare, R. Sharma, and D. M. Vilathgamuwa, "A Comprehensive Review of Harmonic Issues and Estimation Techniques in Power System Networks Based on Traditional and Artificial Intelligence/Machine Learning," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 31417–31442, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3260768.
- [4] A. Peerzada, B. Mitra, S. Kundu, and J. P. Ogle, "On the Impact of High-Order Harmonic Generation in Electrical Distribution Systems," pp. 1–8, 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2407.21259>
- [5] J. David, S. Elphick, and D. Robinson, "Management of Harmonic Distortion for Large Renewable Energy Generation," in *2022 32nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, IEEE, Sep. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/AUPEC58309.2022.10215651.
- [6] E. Mudaheranwa *et al.*, "Reduction of harmonics using Active Power Filters in Electric Power System," in *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, IEEE, Dec. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/SPEC52827.2021.9709462.
- [7] P. S. Sanjan *et al.*, "Enhancement of Power Quality in Domestic Loads Using Harmonic Filters," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197730–197744, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034734.
- [8] D. Bernet and M. Hiller, "Integrating Voltage-Source Active Filters into Diode Front-End Rectifiers – Harmonic Mitigation and Power Factor Correction," in *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, IEEE, Sep. 2021, p. P.1-P.9. doi: 10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570531.
- [9] J. Han *et al.*, "Research on Distributed Harmonic Mitigation Strategy for HVDC Systems Based on Optimal Configuration of Active Filters," in *2023 Power Electronics and Power System Conference (PEPSC)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 336–342. doi: 10.1109/PEPSC58749.2023.103947

- 01.
- [10] A. Lakum and V. Mahajan, "A novel approach for optimal placement and sizing of active power filters in radial distribution system with nonlinear distributed generation using adaptive grey wolf optimizer," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 24, no. 4, pp. 911–924, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2021.01.011.
- [11] M. Milovanović, J. Radosavljević, D. Klimenta, and B. Perović, "GA-based approach for optimal placement and sizing of passive power filters to reduce harmonics in distorted radial distribution systems," *Electr. Eng.*, vol. 101, no. 3, pp. 787–803, Sep. 2019, doi: 10.1007/s00202-019-00805-w.
- [12] A. Sunbul, A. Alduraibi, and F. Zare, "Harmonics Mitigation Filter for High-Power Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 111406–111418, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3215142.
- [13] S. H. E. Abdel Aleem, A. F. Zobaa, M. E. Balci, and S. M. Ismael, "Harmonic Overloading Minimization of Frequency-Dependent Components in Harmonics Polluted Distribution Systems Using Harris Hawks Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100824–100837, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930831.
- [14] G. Nalcaci, D. Yildirim, and M. Ermis, "Selective Harmonic Elimination for Light-Rail Transportation Motor Drives using Harris Hawks Algorithm," in *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, IEEE, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160694.
- [15] O. Akdag, A. Ates, and C. Yeroglu, "Modification of Harris hawks optimization algorithm with random distribution functions for optimum power flow problem," *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 6, pp. 1959–1985, Mar. 2021, doi: 10.1007/s00521-020-05073-5.
- [16] N. C. Rani and N. Amuthan, "THD minimization of ZVT -ZCT Quasi Resonant SEPIC Converter with proposed Harris Hawks Optimization Technique," *Proc. 17th INDIACom; 2023 10th Int. Conf. Comput. Sustain. Glob. Dev. INDIACom 2023*, pp. 1149–1154, 2023.
- [17] X. Wang, S. Wang, J. Ren, W. Jing, M. Shi, and X. Zheng, "A Novel Harmonic Detection Method for Microgrids Based on Variational Mode Decomposition and Improved Harris Hawks Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 60797–60807, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394931.
- [18] M. M. Mahmoud *et al.*, "Voltage Quality Enhancement of Low-Voltage Smart Distribution System Using Robust and Optimized DVR Controllers: Application of the Harris Hawks Algorithm," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2022, pp. 1–18, Nov. 2022, doi: 10.1155/2022/4242996.
- [19] A. Selim, S. Kamel, A. S. Alghamdi, and F. Jurado, "Optimal Placement of DGs in Distribution System Using an Improved Harris Hawks Optimizer Based on Single- and Multi-Objective Approaches," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 52815–52829, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980245.
- [20] A. N. A. Saheb, D. Nazarpour, and

- M. Al-Kaabi, "Applications of Harris Hawks Optimization with Capacitor Shunt and Renewable Energy Source to Achieve Technical Benefits on Power Transmission Networks," in *2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 1–9. doi: 10.1109/ECAI61503.2024.10607581.
- [21] K. R. Raguz, M. Miletic, V. Zelenic, D. Sumina, I. Erceg, and Z. Nastasic, "Analysis of current harmonics in data center power system," in *2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, IEEE, May 2022, pp. 153–157. doi: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803460.
- [22] M. A. Sadiq *et al.*, "Prominence of Filtering Techniques for Harmonics Mitigation in Advanced Power Electronics Systems," *Int. J. Innov. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 512–525, Jun. 2022, doi: 10.33411/IJIST/2022040220.
- [23] A. Daoudi, H. Benalla, K. Nabti, and S. Rezgui, "DSOGI_PLL Technique for Improving the Power Quality of an Unbalanced-Distorted Grid Connected PV System Based on Quasi-Z-Source Cascade Multilevel Inverter," in *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)*, IEEE, May 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEEAC61226.2024.10576492.
- [24] A. S. Abbas *et al.*, "Optimal Harmonic Mitigation in Distribution Systems with Inverter Based Distributed Generation," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, p. 774, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11020774.
- [25] S. Dlamini, I. E. Davidson, and A. A. Adebisi, "Design and Application of the Passive Filters for Improved Power Quality in Stand-alone PV Systems," in *2023 31st Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*, IEEE, Jan. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/SAUPEC57889.2023.10057777.
- [26] A. D. T. Prasetyo, E. M. Silalahi, S. Stepanus, B. Widodo, and R. Purba, "Reducing of total harmonic distortion by simulating passive filters to suppress harmonic currents with the case: Faculty of Engineering Building, Universitas Kristen Indonesia Jakarta," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 878, no. 1, p. 012060, Oct. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/878/1/012060.
- [27] S. Vignesh, J. Jaganrupchand, K. Anand, and K. K. Hariharasudhan, "Current Control Approaches for Shunt Active Power Filters," vol. 8, no. 3, pp. 240–243, 2020.
- [28] M. Jauhari, K. Widarsono, A. A. Kurdianto, C. W. Priananda, M. M. Rifadil, and A. Jaya, "Multi-tuned Active Power Filter Based on p-q Theory for Power Harmonic Suppression," vol. 2, no. 3, pp. 2018–2020, 2019.
- [29] X. Yan, W. Shao, Y. Cheng, and N. Li, "Study of Active Power Filter Control Strategy based on Improved P-Q Harmonic Current Detection," in *2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, IEEE, May 2020, pp. 280–284. doi: 10.1109/AEEES48850.2020.9121507.
- [30] S. R. Das, P. K. Ray, and A. Mohanty, "Improvement of Power Quality Using Hybrid Active Filter

- with Artificial Intelligence Techniques,” 2019, pp. 393–402. doi: 10.1007/978-981-13-6772-4_34.
- [31] A. K. Mishra, S. R. Das, P. K. Ray, R. K. Mallick, A. Mohanty, and D. K. Mishra, “PSO-GWO Optimized Fractional Order PID Based Hybrid Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvements,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74497–74512, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988611.
- [32] K. V. Singh, R. Kumar, H. O. Bansal, and D. Singh, “Hardware Realization of a Single-Phase-Modified P-Q Theory-Based Shunt Active Power Filter for Harmonic Compensation,” 2020, pp. 523–529. doi: 10.1007/978-981-13-8618-3_54.
- [33] I. Abouddrar, S. El Hani, H. Mediouni, and A. Aghmadi, “Active Disturbance Rejection Control of Shunt Active Power Filter Based on P-Q Theory,” 2019, pp. 173–182. doi: 10.1007/978-3-030-05276-8_19.
- [34] P. Hariyalayan, “Simulation of Three Phase Transformer-less Shunt Active Power Filter for Harmonic Compensation in Grid Connected Applications,” vol. 7, no. 11, pp. 325–341, 2020.
- [35] Y. Pang, Z. Xiang, and M.-C. Wong, “The Study of Shunt Hybrid Active Power Filter Compensation Range Under Unbalanced Load,” in *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, IEEE, Dec. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994560.
- [36] A. Baliyan, M. Jamil, M. Rizwan, I. Alsaidan, and M. Alaraj, “An Intelligent PI Controller-Based Hybrid Series Active Power Filter for Power Quality Improvement,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–10, Feb. 2021, doi: 10.1155/2021/6565841.
- [37] Y. B.s and D. K. Thippeswamy, “COMPENSATION OF HARMONICS TO IMPROVE POWER QUALITY USING HYBRID ACTIVE POWER FILTER,” *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 162–169, Oct. 2022, doi: 10.33564/IJEAST.2022.v07i06.014.
- [38] A. G. Shetty, R. Naik, and E. Engineering, “HARMONICS MITIGATION USING HYBRID ACTIVE POWER FILTER FOR AN INDUCTION,” vol. 7, no. 8, pp. 670–677, 2020.
- [39] M. Mukherjee and A. Banerjee, “Power Quality Improvement by Active Shunt Filter with Hysteresis Current Controller,” 2019, pp. 89–97. doi: 10.1007/978-981-13-3450-4_11.
- [40] M. Jauhari, A. F. Ilman, L. Prasetyani, and T. Dewi, “Control Strategy For Active Power Filter Based On P-Q Theory Under Non-Ideal Mains Voltages,” in *2020 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 31–35. doi: 10.1109/ICIEE49813.2020.9276891.
- [41] J. Samanta and R. Pudur, “Comparison of p-q and d-q Theory for Shunt Active Power Filter,” in *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, IEEE, Dec. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPRECON55716.2022.10059658.
- [42] D. Bellan, “Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits,”

- Energies*, vol. 13, no. 19, p. 5231, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13195231.
- [43] C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, and J. L. Kirtley, "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2070–2083, Dec. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [44] D. Chatterjee and S. Dalapati, "Single-Phase Average Reactive Power Measurement Using Instantaneous Power Theory in a Fixed Point Processor," in *2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9186953.
- [45] M. Büyük, M. İnci, A. Tan, and M. Tümay, "Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 177, p. 106014, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106014.
- [46] R. Dashti, M. Daisy, S. Javadi, and M. H. Aliabadi, "Proposing a new method to improve the longitudinal differential relay performance using the Clarke transformation: Theory, simulation, and experiment," *Measurement*, vol. 168, p. 108450, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108450.
- [47] F. Casado-Machado, J. L. Martinez-Ramos, M. Barragán-Villarejo, J. M. Maza-Ortega, and J. A. Rosendo-Macías, "Reduced Reference Frame Transform: Deconstructing Three-Phase Four-Wire Systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 143021–143032, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012510.
- [48] D. Chatterjee and S. Dalapati, "Single-Phase Average Power Measurement Using Instantaneous Power Theory in a Fixed Point Processor," in *2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, IEEE, Feb. 2020, pp. 297–301. doi: 10.1109/CALCON49167.2020.9106506.
- [49] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984, doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
- [50] V. Jones and J. C. Balda, "Correcting current imbalances in three-phase four-wire distribution systems," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol. 2016-May, pp. 1387–1391, 2016, doi: 10.1109/APEC.2016.7468049.
- [51] V. Parimala, D. Ganeshkumar, and B. H. A. "Harmonic Reduction Using Shunt Active Power Filter With Pi Controller," vol. 2, no. 4, pp. 85–90, 2014, doi: 10.15662/IJAREEIE.2016.0506053.
- [52] A. A. Imam, R. Sreerama Kumar, and Y. A. Al-Turki, "Modeling and simulation of a pi controlled shunt active power filter for power quality enhancement based on p-q theory," *Electron.*, vol. 9, no. 4, 2020, doi: 10.3390/electronics9040637.
- [53] Q. Fan, Z. Chen, and Z. Xia, "A novel quasi-reflected Harris hawks optimization algorithm for global optimization problems," *Soft Comput.*, vol. 24, no. 19, pp. 14825–14843, Oct. 2020, doi: 10.1007/s00500-020-04834-7.

- [54] C. Li, J. Li, H. Chen, M. Jin, and H. Ren, "Enhanced Harris hawks optimization with multi-strategy for global optimization tasks," *Expert Syst. Appl.*, vol. 185, p. 115499, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115499.
- [55] T. Yang, J. Fang, C. Jia, Z. Liu, and Y. Liu, "An improved harris hawks optimization algorithm based on chaotic sequence and opposite elite learning mechanism," *PLoS One*, vol. 18, no. 2, p. e0281636, Feb. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0281636.
- [56] X. Zhang, K. Zhao, and Y. Niu, "Improved Harris Hawks Optimization Based on Adaptive Cooperative Foraging and Dispersed Foraging Strategies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 160297–160314, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3013332.
- [57] C. Qu, W. He, X. Peng, and X. Peng, "Harris Hawks optimization with information exchange," *Appl. Math. Model.*, vol. 84, pp. 52–75, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.apm.2020.03.024.
- [58] Y. Sun, Q. Huang, T. Liu, Y. Cheng, and Y. Li, "Multi-Strategy Enhanced Harris Hawks Optimization for Global Optimization and Deep Learning-Based Channel Estimation Problems," *Mathematics*, vol. 11, no. 2, p. 390, Jan. 2023, doi: 10.3390/math11020390.
- [59] F. Tian, J. Wang, and F. Chu, "Improved Multi-Strategy Harris Hawks Optimization and Its Application in Engineering Problems," *Mathematics*, vol. 11, no. 6, p. 1525, Mar. 2023, doi: 10.3390/math11061525.
- [60] S. Wang, H. Jia, Q. Liu, and R. Zheng, "An improved hybrid Aquila Optimizer and Harris Hawks Optimization for global optimization," *Math. Biosci. Eng.*, vol. 18, no. 6, pp. 7076–7109, 2021, doi: 10.3934/mbe.2021352.
- [61] Y. Lan, J. Q. Lu, D. Wang, and T. T. Zheng, "Research on APF Improved Control Strategy Under Three-phase Voltage Distortion," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 354, no. 1, p. 012109, Oct. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/354/1/012109.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 2: Matriz de estado del arte.

ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE LA SOBRECARGA ARMÓNICA MEDIANTE EL FILTRO AC ACTIVO DE RANGO COMPLETO EMPLENADO EL ALGORITMO DE HARRIS HAWKS PARA DETERMINAR LA UBICACION ÓPTIMA																					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	DATOS			TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
				Problema; Objetivo	MINIMIZACIÓN DE SOBRECARGA ARMÓNICA	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE ELLOS	EVALUACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN	PREDICCIÓN DE DEMANDA	MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA	MEJORAMIENTO DEL THD	CALIDAD DE LA ENERGIA	DISPONIBILIDAD	COMPLEJIDAD DE LOS METODOS	EFFECTIVIDAD DE SOLUCIONES	MODELO PFM	OPTIMIZACIÓN Y ALGORITMOS AVANZADOS	FILTROS	OPTIMA UBICACIÓN DE FILTROS	INCREMENTO DEL FACTOR DE POTENCIA	REDUCCION DE ARMONICOS	
1	2019	Harmonic overloading minimization of frequency dependent components in harmonic polluted distribution sistem using harris hawks optimization algorithn	1	NO	✘		✘	✘			✘	✘		✘	✘		✘				
4	2018	Comparative evaluation of common passive filter types regarding maximization of transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions	2			✘			✘	✘	✘			✘		✘	✘		✘		✘
5	2022	Mixed Integer Linear Programming Formulation for Optimal Reactive Power Compensation	3			✘		✘		✘	✘			✘		✘					✘
6	2023	A Distributed Hierarchical Structure Optimization Algorithm Based Poly-Particle Swarm for Reconfiguration of Distribution Network	4		✘		✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘	✘	✘	✘		✘		✘
7	2023	A Harmonic and Interharmonic Detection Method for Power Systems Based on Enhanced SVD and the Prony Algorithm	5		✘	✘	✘		✘	✘	✘		✘	✘	✘	✘	✘				✘
8	2022	Compressed Sensing Technique for the Localization of Harmonic Distortions in Electrical Power Systems	6		✘		✘			✘	✘		✘	✘	✘	✘		✘		✘	

9	2018	Accurate estimation of harmonic parameters by interpolation FFT algorithm	7		✘		✘				✘			✘		✘		✘			
		DATOS				TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Problema; Objetivo	MINIMIZACIÓN DE SOBRECARGA ARMÓNICA	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE FILTROS	EVALUACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN	PREDICCIÓN DE DEMANDA	MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA	MEJORAMIENTO DEL THD	CALIDAD DE LA ENERGÍA	DISPONIBILIDAD	COMPLEJIDAD DE LOS MÉTODOS	EFFECTIVIDAD DE SOLUCIONES	MODELO PFM	OPTIMIZACIÓN Y ALGORITMOS AVANZADOS	FILTROS	OPTIMA UBICACIÓN DE FILTROS	INCREMENTO DEL FACTOR DE POTENCIA	REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS	
10	2014	Exploring Detection and Prevention of Harmonics in Electric Power System	8		✘			✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘							
11	2020	Power Quality Improvement with Harmonic Reduction Using P-Q Theory-Based Shunt Active Power Filter	9		✘	✘		✘	✘	✘	✘	✘		✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘
12	2019	Power Quality Improvement Using Harmonic Passive Filter in Distribution System	11		✘			✘	✘	✘	✘	✘	✘			✘	✘	✘	✘	✘	✘
13	2018	Modeling and experimental validation of a single-phase series active power filter for harmonic voltage reduction	12			✘			✘	✘	✘	✘		✘		✘	✘		✘	✘	✘
14	2017	Study of active power filters using quad series voltage source PWM converters for harmonic compensation	13		✘	✘			✘	✘	✘	✘		✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘
16	2021	A review of active filters for power quality improvement	14										✘	✘							✘
17	2022	Improvement of power quality at PCC through grid interfacing photovoltaic system	15					✘		✘	✘	✘			✘	✘			✘	✘	✘
18	2019	Energy Management in Power Systems: Review, Classification, Limitations and Challenges	16					✘		✘	✘	✘			✘			✘	✘	✘	✘
19	2018	State estimation in power distribution systems based on ensemble kalman filtering	17		✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	✘		✘	✘	✘	✘
20	2018	Distribution system state estimation-A step towards smart grid	18					✘			✘	✘			✘	✘					
21	2021	Using Branch Current Measurements for Parameter Identification in Extended Kalman Filter based Distribution System State Estimation	19					✘		✘	✘	✘	✘		✘				✘		

