

# Simulación de un filtro activo de potencia tipo shunt: un caso de estudio

## *Simulation of a shunt-type active power filter: a case study*

Maykop Pérez Martínez<sup>I,\*</sup>, Josnier Ramos Guardarrama<sup>II</sup>, Cristian Pérez Blanco<sup>III</sup>, José Antonio Rodríguez Valdés<sup>IV</sup>

<sup>I</sup>Universidad de Concepción, Chile

<sup>II</sup>Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE. La Habana, Cuba

<sup>III</sup>Empresa Eléctrica de Mayabeque, Cuba

<sup>IV</sup>UEB Empresa Eléctrica San Juan y Martínez. Pinar del Río, Cuba

\*Autor de la correspondencia: [maykoperez@udec.cl](mailto:maykoperez@udec.cl)

Recibido: 2 de noviembre de 2024

Aprobado: 10 de enero del 2025

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



### RESUMEN/ABSTRACT

El artículo analiza la importancia de la calidad de la energía en sistemas eléctricos modernos, especialmente debido al impacto de las cargas no lineales que generan armónicos y deterioran el factor de potencia. Se presenta a los filtros activos de potencia (FAP) como una solución eficaz para mitigar estos problemas, enfocándose en los FAP tipo shunt. Se describen los principios de funcionamiento de los FAP tipo shunt, incluyendo la detección de armónicos, la generación de corriente de compensación y la inyección en el sistema. Se examinan dos métodos de control: transformadas  $\alpha$ - $\beta$  y  $d$ - $q$ , comparando sus ventajas, desventajas y su impacto en el rendimiento del filtro. A través de un caso de estudio simulado en Matlab/Simulink, se demuestra la efectividad de un FAP tipo shunt en la compensación de armónicos y la mejora del factor de potencia en un sistema industrial.

**Palabras clave:** transformada de Clarke, transformada de Park, filtro activo, Matlab/Simulink, caso de estudio.

*The article analyzes the importance of power quality in modern electrical systems, especially due to the impact of nonlinear loads that generate harmonics and deteriorate the power factor. Active power filters (APF) are presented as an effective solution to mitigate these problems, focusing on shunt-type APFs. The operating principles of shunt-type APFs are described, including harmonic detection, compensation current generation, and injection into the system. Two control methods are examined:  $\alpha$ - $\beta$  and  $d$ - $q$  transformations, comparing their advantages, disadvantages, and impact on filter performance. Through a case study simulated in Matlab/Simulink, the effectiveness of a shunt-type APF in compensating for harmonics and improving the power factor in an industrial system is demonstrated.*

**Keywords:** Clarke's transformation, Park's transformation, active filter, Matlab/Simulink, case study.

### INTRODUCCIÓN

En correspondencia con los autores de la referencia [1], la tecnología ha avanzado considerablemente a lo largo de los años. La implementación de nuevos sistemas se basa en facilitar la realización de tareas por parte de las personas, así como en la posibilidad de expandir y crear nuevos mercados mediante el uso de máquinas, vehículos, industrias y plantas, entre otros. En el ámbito energético, se hizo imprescindible realizar una inversión significativa en mejoras técnicas, dado que la población en general comenzó a acceder a electrodomésticos que funcionan con electricidad.

Varias ciudades empezaron a recibir energía generada en lugares lejanos a través de líneas de transmisión, lo que hizo más viable la instalación de industrias y empresas. Durante el crecimiento del sector eléctrico, la ingeniería busca equilibrar diversas soluciones creativas para abordar problemas económicos, ya que los proyectos financiados por el sector privado tienden a buscar el máximo beneficio posible. La llegada de la electrónica transformó los conceptos relacionados con la electricidad, ya que los dispositivos de medición electrónicos lograron reducir los errores a niveles mínimos en comparación con los equipos electromecánicos. Las microcomputadoras comenzaron a procesar información más rápidamente, se desarrollaron nuevas interfaces, se popularizó la comunicación a distancia y la electrónica permitió disminuir considerablemente el tamaño físico de los dispositivos eléctricos, además de mejorar su eficiencia [2].

Un ejemplo de lo anteriormente planteado es el incremento de los equipos electrónicos desde sus aplicaciones en la pequeña potencia, como alumbrado con balastos electrónicos y ordenadores personales, hasta aplicaciones de gran potencia como los variadores de velocidad, sistemas de alimentación ininterrumpida y los grandes rectificadores de corriente continua usados en la tracción eléctrica. Lo cual ha supuesto una gran diversificación de los equipos diseñados para las necesidades actuales. No obstante, el desarrollo de estos equipos con tecnologías muy económicas ha generado problemas en el sistema eléctrico, ya que están contruidos con elementos no lineales, tales como diodos, tiristores, transistores, triac y diacs. Estos componentes son los causantes, en general, de las perturbaciones eléctricas y en particular de los armónicos [3].

Estas cargas no lineales introducen corrientes distorsionadas en la fuente a la que están conectadas y, al unirse a la red, pueden alterar la forma de onda de tensión en el punto de acoplamiento común donde se conectan diversas cargas de diferentes consumidores. En ese sentido, se puede afirmar que el creciente uso de equipos basados en electrónica de potencia resalta la importancia de la relación entre esta área de la ingeniería eléctrica y la calidad de la energía eléctrica. A pesar de que proporcionan un control eficiente del flujo de energía, estas cargas generan tensiones y/o corrientes armónicas que incrementan las perturbaciones causadas por la distorsión armónica en los sistemas eléctricos, resultando en una disminución de la calidad de la energía eléctrica.

Por otro lado, los autores de [4, 5], resaltan que el aumento de cargas no lineales en sistemas eléctricos modernos ha generado un incremento significativo en las corrientes armónicas y el deterioro del factor de potencia, impactando negativamente la eficiencia, estabilidad y calidad de las redes de distribución. Las corrientes armónicas provocan sobrecalentamiento en transformadores y equipos eléctricos, incrementan las pérdidas en líneas de transmisión, generan resonancias indeseadas, fallos en la operación de dispositivos y reducción de la eficiencia energética. Además, un factor de potencia bajo puede resultar en penalizaciones económicas y en la necesidad de aumentar la capacidad de generación y distribución de energía.

Por lo tanto, es fundamental medir el contenido armónico del sistema para encontrar maneras efectivas de mitigar los problemas de distorsión armónica. Esta distorsión armónica, plantean los autores de la obra de la referencia [6], se expresa en la Distorsión Armónica Total (THD), que es un parámetro para representar el nivel armónico. En ese sentido, en la referencia [7], se plantea que el estándar IEEE-519 establece límites estrictos para la THD tanto en corriente como en voltaje. Para sistemas de media tensión, el límite de distorsión armónica total de voltaje (THD<sub>v</sub>) es del 5%, mientras que para la corriente (THD<sub>i</sub>), los valores aceptables varían dependiendo de la relación de cortocircuito, con valores típicos entre el 5% y el 20% en aplicaciones industriales. La mitigación de estas perturbaciones es fundamental para garantizar el cumplimiento de estándares internacionales, como el IEEE-519, y mantener la integridad del sistema eléctrico.

Los filtros activos de potencia (FAP) han emergido como una solución eficaz para mitigar estos problemas. A diferencia de los filtros pasivos, que son limitados en su capacidad de adaptación a variaciones en las condiciones de carga, los FAP son dispositivos dinámicos que pueden ajustarse en tiempo real para compensar tanto las corrientes armónicas como para mejorar el factor de potencia. Estos filtros utilizan técnicas de control avanzadas y algoritmos de procesamiento de señales para identificar y eliminar las componentes armónicas de la corriente, así como para proporcionar potencia reactiva cuando es necesario [8, 9]. La relevancia de los FAP radica en su capacidad para mejorar la calidad de la energía eléctrica, lo que se traduce en beneficios económicos y operativos.

Al reducir las distorsiones armónicas y optimizar el factor de potencia, se minimizan las pérdidas en el sistema, se prolonga la vida útil de los equipos y se mejora la eficiencia general del sistema eléctrico. Además, el cumplimiento de normativas y estándares de calidad de energía se vuelve más accesible, lo que es esencial para las industrias que dependen de un suministro eléctrico confiable y de alta calidad [10].

En este contexto, surgen los filtros activos de potencia tipo shunt como una solución eficaz para mitigar estos efectos, al proporcionar compensación dinámica de armónicos y potencia reactiva. Los filtros tipo shunt se conectan en paralelo con la carga en el sistema eléctrico. Esto les permite inyectar o absorber corriente en el punto de conexión, actuando como una fuente de corriente controlada que puede ajustarse en tiempo real para compensar las distorsiones en la corriente de la carga.

El primer paso en el funcionamiento de un filtro activo es la detección de las corrientes armónicas presentes en el sistema. Esto se logra mediante el uso de sensores de corriente y voltaje que monitorean continuamente la forma de onda de la corriente en el punto de conexión. Los datos recopilados se utilizan para identificar las componentes armónicas y calcular la corriente de referencia que el filtro debe inyectar para compensar estas distorsiones.

El filtro activo genera la corriente de compensación calculada mediante un inversor de potencia. Este inversor convierte la corriente continua de una fuente de alimentación, como un banco de baterías o un sistema de almacenamiento de energía, en corriente alterna que se inyecta en el sistema. La forma de onda de la corriente generada se ajusta para que sea opuesta a las corrientes armónicas detectadas, lo que permite cancelar sus efectos. La corriente de compensación se inyecta en el sistema eléctrico en paralelo con la carga. Al hacerlo, el filtro activo reduce la cantidad de corriente armónica que fluye hacia la red, mejorando así la calidad de la energía. Además, al inyectar corriente reactiva, el filtro puede mejorar el factor de potencia del sistema.

Los filtros activos de potencia tipo shunt son capaces de adaptarse a cambios en la carga y en las condiciones del sistema en tiempo real. Esto se logra mediante un bucle de retroalimentación que permite al controlador ajustar continuamente la corriente de compensación en función de las variaciones en las corrientes armónicas y en el factor de potencia. Esta capacidad de ajuste dinámico es una de las principales ventajas de los filtros activos en comparación con los filtros pasivos. De acuerdo con los autores de las referencias [11, 12], la estructura fundamental de un filtro activo de potencia paralelo para compensar corrientes no activas y corregir el factor de potencia se compone de cinco bloques principales: el convertidor de potencia, el enlace de corriente, el elemento de almacenamiento de energía, los dispositivos de acondicionamiento de señales y el controlador.

Los primeros cuatro son hardware, mientras que el controlador puede ser un software que opera en un procesador. El convertidor, formado por dispositivos electrónicos de potencia, regula el flujo de energía entre el elemento de almacenamiento y la red, actuando idealmente como interruptores bidireccionales. El enlace de corriente, generalmente una inductancia, facilita la transferencia de energía y afecta el rizado de la corriente de inyección. El controlador asegura que la compensación de corrientes no activas y la corrección del factor de potencia se realicen correctamente, calculando las corrientes de referencia y gestionando la corriente de inyección. También mantiene el nivel adecuado de energía en el elemento de almacenamiento y genera las señales de conmutación para los dispositivos del convertidor, supervisando el estado del sistema que incluye la línea, la carga y el filtro.

Por último, el subsistema de acondicionamiento de señales convierte las tensiones y corrientes instantáneas del convertidor a niveles manejables por el controlador, y permite la aplicación de las señales de puerta del inversor, facilitando así el control de los dispositivos electrónicos de potencia. En la figura 1, se muestra un diagrama unifilar general de un FAP tipo shunt, las corrientes de la carga se denotan con el subíndice L, las de la fuente con el subíndice S y las que inyecta el FAP o las de compensación con el subíndice C.

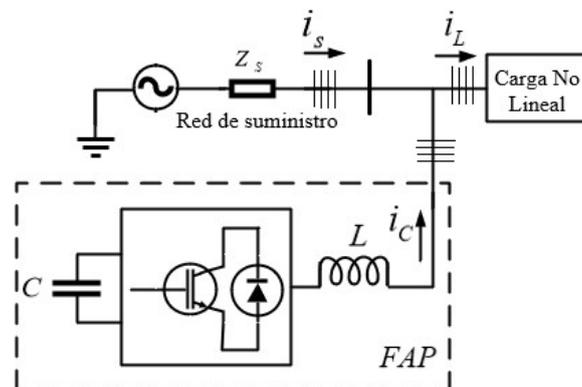


Fig. 1. Diagrama unifilar general de un filtro activo de potencia tipo shunt

De la figura 1, puede deducirse, como ya se mencionó, que el FAP está conformado por un inversor trifásico de tres ramas que se conecta a la red a través de inductancias de acople,  $L$  por fase, y un capacitor  $C$  que se utiliza para mantener constante el voltaje en el lado de corriente directa del inversor. Los algoritmos de compensación se encargan de determinar las corrientes  $i_c$  en cada fase ( $i_{ac}$ ,  $i_{bc}$ ,  $i_{cc}$ ) que debe inyectar el FAP. Las corrientes de la carga se denotan como ( $i_{aL}$ ,  $i_{bL}$ ,  $i_{cL}$ ) y las de la fuente ( $i_{as}$ ,  $i_{bs}$ ,  $i_{cs}$ ). Obtener las corrientes que debe inyectar el FAP para compensar el sistema es una de las principales funciones que debe realizar el sistema de control de los FAP tipo shunt. Estas corrientes, conocidas como corrientes de compensación, se obtienen a través diversos algoritmos, que emplean transformaciones matemáticas buscando desacoplar la potencia activa y la reactiva para facilitar la tarea del controlador [13, 14].

Estos algoritmos de control son fundamentales para el funcionamiento eficiente de los FAP, especialmente en la compensación de corrientes armónicas y la mejora del factor de potencia. Entre los métodos más utilizados se encuentran las transformadas  $\alpha$ - $\beta$  y d-q, que permiten un análisis y control más efectivo de las magnitudes eléctricas en sistemas de corriente alterna. Estas metodologías de control han ganado relevancia por su capacidad para aislar componentes fundamentales y armónicos en tiempo real. La transformación  $\alpha$ - $\beta$  se centra en descomponer las señales en coordenadas estacionarias, mientras que la transformación d-q, empleando un marco de referencia rotante, facilita la identificación y limitación de componentes armónicos.

Cada enfoque presenta ventajas y limitaciones en términos de complejidad computacional, velocidad de respuesta y robustez frente a variaciones de carga. Por todo lo anteriormente planteado el objetivo del presente artículo de investigación es analizar mediante la simulación con Matlab/Simulink los filtros eléctricos de potencia tipo shunt a partir del estudio de las metodologías de control de las transformadas alfa-beta y d-q conectado a un sistema eléctrico de potencia.

## METODOLOGÍA

Las transformadas  $\alpha$ - $\beta$  y d-q son herramientas matemáticas fundamentales en el análisis y control de sistemas eléctricos, especialmente en el contexto de los FAP. Estas transformadas permiten simplificar el tratamiento de las magnitudes eléctricas en sistemas trifásicos, facilitando la compensación de corrientes armónicas y la mejora del factor de potencia [15]. De acuerdo con la referencia [16], la determinación del valor instantáneo de la corriente de referencia para la compensación es una de las funciones básicas que debe realizar un FAP. El método seleccionado para desempeñar esta tarea establece sus características durante la compensación.

Este elemento debe calcular los valores instantáneos de la corriente de inyección de forma que se compense la componente no activa de la corriente de la carga manteniendo la energía en el elemento almacenador del FAP. A continuación, se presentan los métodos de cálculo de la corriente no activa de la carga más empleados en sistemas trifásicos a tres hilos: el basado en la teoría de la potencia reactiva instantánea y en la transformación al marco de referencia rotatorio y síncrono. Estos algoritmos se encargan de determinar para cualquier instante de tiempo, el valor de las corrientes en cada fase que debe inyectar el FPA para realizar la compensación en el sistema. La principal característica de estos algoritmos es el corto tiempo que tarda en obtener las referencias de corriente ante posibles cambios que pueda ocurrir en las condiciones de la carga.

### Método de la potencia reactiva instantánea

La figura 2, muestra de acuerdo a las referencias [13, 16], el esquema general de este método para un sistema trifásico a tres hilos. La técnica se basa en el cálculo de la potencia instantánea consumida por la carga en un marco de referencia estacionario y su posterior utilización para el cálculo de la referencia de corriente.

Este algoritmo, señala [13], fue propuesto en 1984 por Akagi para el control de filtros activos de potencia con capacidad de compensación de corrientes armónicas y de mejora del factor de potencia en sistemas trifásicos a tres y cuatro hilos. Consiste en aplicar la transformada de Clarke a las tensiones y las corrientes que circulan en la carga a un marco de coordenadas estacionario y ortogonal conocido como ( $\alpha$ ,  $\beta$ , 0).

Es importante señalar que la gran ventaja del uso de la transformada a ( $\alpha$ ,  $\beta$ , 0) es que separa las componentes homopolares de las componentes en abc. Esto se debe a que los ejes  $\alpha$  y  $\beta$  no contribuyen a la secuencia homopolar. Entonces, para los sistemas trifásicos balanceados o equilibrados, el término homopolar puede ser eliminado de la transformada, como se muestra en el sistema de ecuaciones (1).

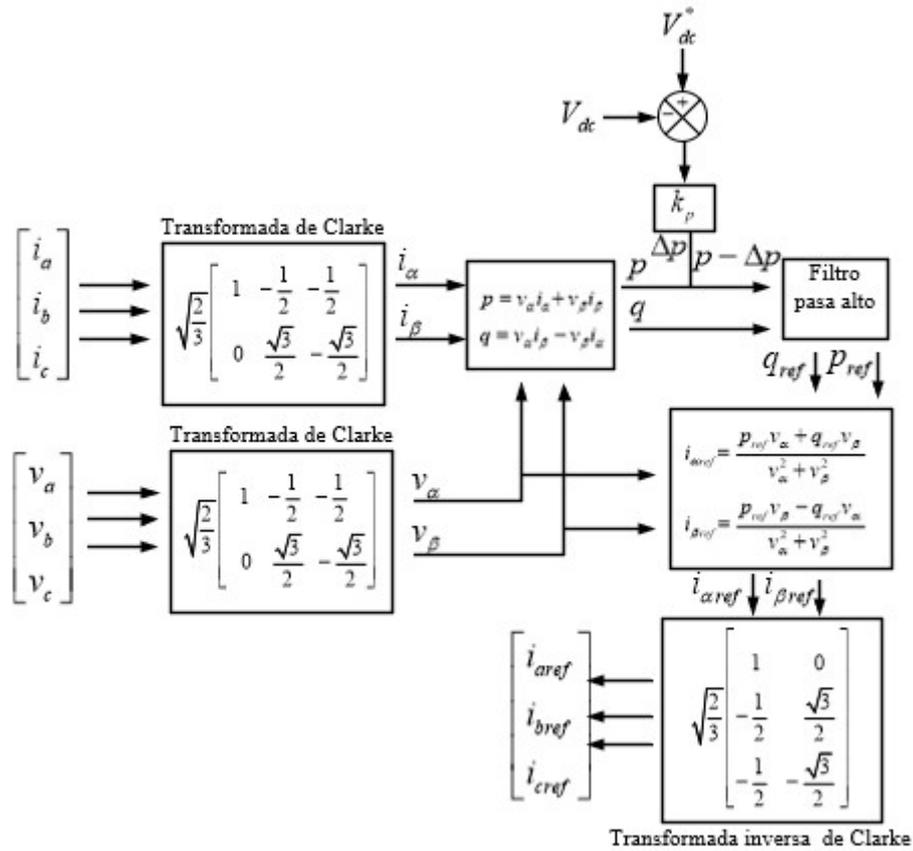


Fig. 2. Diagrama de bloques para el cálculo de las corrientes de referencia usando la transformada  $\alpha - \beta$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Para el sistema de coordenadas en  $\alpha-\beta$ , se define entonces, la potencia real instantánea  $p$  y la potencia imaginaria instantánea  $q$ , como se muestra en la ecuación (2):

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha$$

Mediante el filtrado de las componentes de potencia instantánea calculadas se obtiene la corriente de referencia para la compensación, como se muestra en el sistema de ecuaciones (3):

$$i_{\alpha ref} = \frac{p_{ref} v_\alpha + q_{ref} v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (3)$$

$$i_{\beta ref} = \frac{p_{ref} v_\beta - q_{ref} v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2}$$

En el caso de compensación de armónicos de corriente será necesario aplicar un filtro paso alto a las componentes p y q. La frecuencia de corte de este filtro debe ser superior a la componente fundamental de la red e inferior a la del primer armónico que se pretende compensar. Para la compensación de los armónicos de corriente y la corrección del factor de potencia únicamente será necesario aplicar el filtro paso alto a la componente p [16]. Las corrientes de referencia en el plano  $\alpha$ - $\beta$  se transforman nuevamente al sistema trifásico mediante la transformación inversa de Clarke, como se muestra en el sistema de ecuaciones (4):

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$i_{aref} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{\alpha ref}$$

$$i_{bref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( -\frac{1}{2} i_{\alpha ref} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta ref} \right)$$

$$i_{cref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( -\frac{1}{2} i_{\alpha ref} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta ref} \right)$$

Es importante destacar que la potencia  $\Delta p$  que se requiere para mantener constante el voltaje del bus de continua del inversor se obtiene a través de un controlador proporcional que utiliza la señal de error  $\Delta V_{dc}$ , como se muestra en la ecuación (5), de acuerdo con [13]:

$$\Delta p = k_p \cdot \Delta V_{dc}$$

$$k_p = \frac{2}{3} C \cdot V_{dc}^* \cdot f \quad (5)$$

Donde:

$k_p$ : es la ganancia del controlador proporcional

C: es la capacitancia del bus de continua del filtro activo.

$V_{dc}^*$ : es el voltaje de referencia del bus de continua.

f: es la frecuencia de la red eléctrica.

El signo negativo de  $\Delta p$ , en el diagrama de bloques de la figura 2, significa que esta potencia es absorbida por el filtro [13].

En resumen, este método utiliza la potencia instantánea para generar las corrientes de referencia del FAP. El bloque  $\Delta V_{dc}$ , a través de un controlador proporcional, ajusta la referencia de potencia activa para mantener constante el voltaje del bus de continua del inversor. Este control es fundamental para asegurar la estabilidad del filtro activo y compensar las pérdidas de energía del sistema.

### Método de transformación al marco de referencia rotatorio y síncrono

La figura 3, muestra de acuerdo a las referencias [17, 18], el esquema general de este método para un sistema trifásico a tres hilos. La característica fundamental de este controlador es la utilización de un marco de referencia que gira en el plano complejo sincronizado con la señal de tensión en el punto de conexión. La introducción de esta nueva transformación hace posible el cálculo de las componentes activa y no activa de la corriente de carga sin necesidad de determinar previamente la potencia.

Por otro lado, en [17], se plantea que este esquema presenta una capacidad de seguimiento de señales rápida y precisa. Esta característica evita las fluctuaciones de tensión que deterioran la señal de referencia actual que afecta al rendimiento de compensación. Las señales de referencia actuales se obtienen de las corrientes de carga correspondientes.

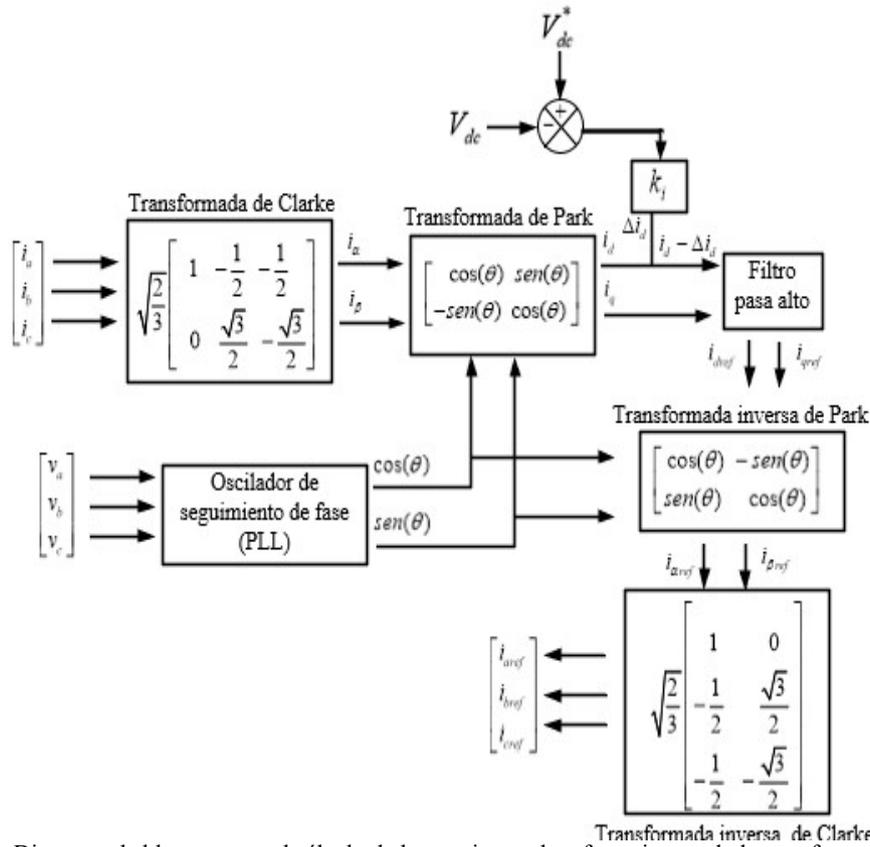


Fig. 3. Diagrama de bloques para el cálculo de las corrientes de referencia usando la transformada d – q

La característica fundamental de este método es la utilización de un marco de referencia que gira en el plano complejo sincronizado con la señal de tensión en el punto de conexión. La introducción de esta nueva transformación hace posible el cálculo de las componentes activa y no activa de la corriente de carga sin necesidad de determinar previamente la potencia [19]. La conversión del marco de referencia estacionario al SRF se realiza mediante la transformación de Park. Esta transformación proyecta las  $\alpha$ - $\beta$  sobre el marco rotatorio según la ecuación (6):

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Siendo  $\cos(\theta)$  y  $\sin(\theta)$  funciones obtenidas a través del oscilador de seguimiento de fase (PLL) sincronizado con la tensión de la red y operando a la frecuencia del marco rotatorio. El ángulo  $\theta$ , plantea [20], sincroniza los voltajes en el punto de acople del FAP con el sistema de referencia en movimiento d-q. El LPF se utiliza principalmente para suavizar la señal de corriente y así obtenerlas referencias de corrientes libre de oscilaciones y ruido, lo que permite una mejor compensación de la potencia reactiva. Además, mejora la respuesta dinámica del sistema y protege el convertidor de potencia. Se debe señalar que la corriente  $\Delta i$  que se requiere para garantizar un voltaje constante en el bus de continua del inversor se obtiene a través de un controlador proporcional que utiliza la señal de error  $\Delta V_{dc}$ , como se muestra en la ecuación (7):

$$\begin{aligned} \Delta i &= k_i \cdot \Delta V_{dc} \\ k_i &= \frac{2}{3} \frac{C \cdot V_{dc}^* \cdot f}{V_m} \end{aligned} \quad (7)$$

Donde:

- $k_p$ : es la ganancia del controlador proporcional
- C: es la capacitancia del bus de continua del filtro activo.
- $V_{dc}^*$ : es el voltaje de referencia del bus de continua.
- f: es la frecuencia de la red eléctrica.
- $V_m$ : es el valor máximo de la tensión de fase de la red.

Para obtener las corrientes de referencia en el sistema  $\alpha$ - $\beta$  se transforman las corrientes de referencia del sistema d-q utilizando la transformación inversa de Park, como se muestra en el sistema de ecuaciones (8):

$$\begin{aligned}i_{\alpha ref} &= i_{d ref} \cdot \cos(\theta) - i_{q ref} \cdot \sin(\theta) \\i_{\beta ref} &= i_{d ref} \cdot \sin(\theta) + i_{q ref} \cdot \cos(\theta)\end{aligned}\quad (8)$$

Finalmente se transforman las corrientes de referencia del sistema  $\alpha$ - $\beta$  al sistema abc, utilizando la transformación inversa de Clarke, como se muestra en el sistema de ecuaciones (9):

$$\begin{aligned}i_{a ref} &= i_{\alpha ref} \\i_{b ref} &= -\frac{1}{2}i_{\alpha ref} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta ref} \\i_{c ref} &= -\frac{1}{2}i_{\alpha ref} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta ref}\end{aligned}\quad (9)$$

En resumen, este método utiliza el sistema de coordenadas d-q para generar las corrientes de referencia del FAP. El bloque  $\Delta V_{dc}$ , a través de un controlador proporcional, ajusta la referencia de corriente en el eje directo ( $i_{d ref}$ ) para mantener constante el voltaje del bus de continua del inversor. Este control permite una compensación precisa de la potencia reactiva y de los armónicos, mejorando la calidad de la energía eléctrica.

### Comparación entre los métodos

Un análisis detallado de comparación entre los dos métodos de control de corriente de referencia (transformación  $\alpha$ - $\beta$  y transformación d-q) incluye aspectos como el propósito, las ventajas y desventajas de cada método, y su impacto en el rendimiento del filtro activo. A continuación, se presenta un desglose comparativo:

#### Propósito de cada método

**Método  $\alpha$ - $\beta$ :** Este método utiliza un marco estacionario. Su principal objetivo es calcular las corrientes de referencia directamente a partir de las componentes de potencia activa y reactiva en el sistema trifásico, sin necesidad de un ángulo de referencia.

**Método d-q:** Se basa en un marco rotacional que desacopla las componentes activa y reactiva. Este desacoplamiento requiere un ángulo de sincronización ( $\theta$ ) proporcionado por un PLL (*Phase Locked Loop*), lo cual lo hace más preciso para sistemas desbalanceados.

#### Comparación de los filtros pasa-bajos (LPF)

**En  $\alpha$ - $\beta$ :** El LPF filtra las potencias activa y reactiva para eliminar las componentes de alta frecuencia. Esto resulta en señales de referencia más estables, pero puede introducir un retardo adicional, lo que impacta la respuesta dinámica.

**En d-q:** El LPF se aplica directamente a las corrientes. Esto permite una mayor precisión al filtrar las componentes indeseadas del sistema, pero también depende críticamente del desempeño del PLL.

#### Implementación computacional

**Método  $\alpha$ - $\beta$ :** Más simple desde el punto de vista computacional, ya que solo requiere transformaciones estacionarias (Clarke). No depende de un PLL, lo cual reduce la complejidad de diseño.

**Método d-q:** Más complejo debido a la necesidad de calcular el ángulo de sincronización ( $\theta$ ) en tiempo real. Mayor carga computacional al realizar las transformaciones adicionales (Park e inversa de Park).

#### Adaptabilidad a sistemas desbalanceados

**Método  $\alpha$ - $\beta$ :** Tiene limitaciones en la compensación bajo condiciones de desbalance porque opera en un marco estacionario. Las corrientes de referencia pueden no ser perfectamente sinusoidales.

**Método d-q:** Mejora significativamente el desempeño en sistemas desbalanceados gracias al desacoplamiento de las componentes activa y reactiva. Las corrientes de referencia generadas son más precisas y efectivas para compensar los armónicos.

### Respuesta dinámica

**Método  $\alpha$ - $\beta$ :** Más rápido debido a la ausencia de un PLL, pero menos robusto frente a perturbaciones del sistema eléctrico.

**Método d-q:** Respuesta más robusta frente a perturbaciones, pero puede introducir mayor retardo debido a los cálculos adicionales.

A modo de conclusiones, si el objetivo es simplicidad y rapidez, el método  $\alpha$ - $\beta$  es adecuado, especialmente en sistemas balanceados. Para aplicaciones que requieren mayor precisión y robustez, particularmente en sistemas desbalanceados o con armónicos significativos, el método d-q es preferible.

### DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Con el objetivo de exponer la metodología aquí propuesta se desarrolla a modo de ejemplo la simulación con Matlab/Simulink, el caso de estudio presentado por [2]. Para la simulación se tomó como referencia el trabajo presentado por [21], en la cual se resuelve el problema de la corriente armónica en el sistema de energía. También compensa la potencia reactiva y equilibra la carga en tres fases (si la carga está desbalanceada). Utiliza la transformación de Clarke para calcular los valores de p y q, filtra la parte constante de p y q, por lo tanto, encuentra la parte compensadora de p y q.

Luego, calcula la corriente compensadora mediante la transformación inversa de Clarke. La corriente compensadora se inyecta a la red a través de un inversor trifásico utilizando el método de control de corriente de banda de histéresis. De esta manera, el componente armónico y reactivo de la carga es suministrado por este filtro activo de potencia en derivación.

### CASO DE ESTUDIO

La figura 4, en correspondencia con [2], presenta el diagrama unifilar general simplificado del sistema eléctrico de la empresa, mostrando las cargas de interés para el análisis de armónicas y las principales características del complejo eléctrico analizado. La alimentación se realiza a través de una línea de transmisión de 15 kV.

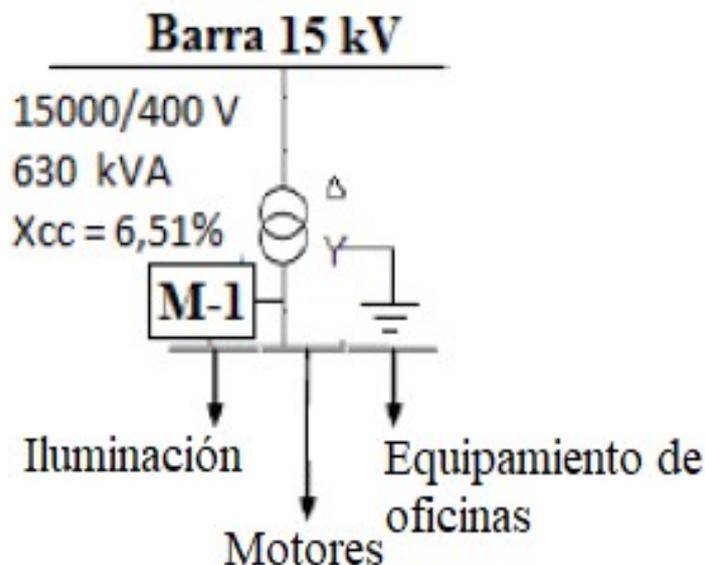


Fig. 4. diagrama unifilar del caso de estudio

Además, se cuenta con la siguiente información:

- Factor de potencia (fp): 0,75
- Potencia total (kW): 243 kW
- Corriente total nominal: 491,4 A
- Tensión: 220 V
- $I_3 = 80,44 \angle 145^\circ$  A
- $I_5 = 38,5 \angle -114,6^\circ$  A
- $I_7 = 31,78 \angle 1,75^\circ$  A

### Implementación en Matlab/ Simulink

En la figura 5, se muestra el sistema industrial modelado en Matlab/Simulink. En la figura 6, se muestran los resultados después de implementado el filtro.

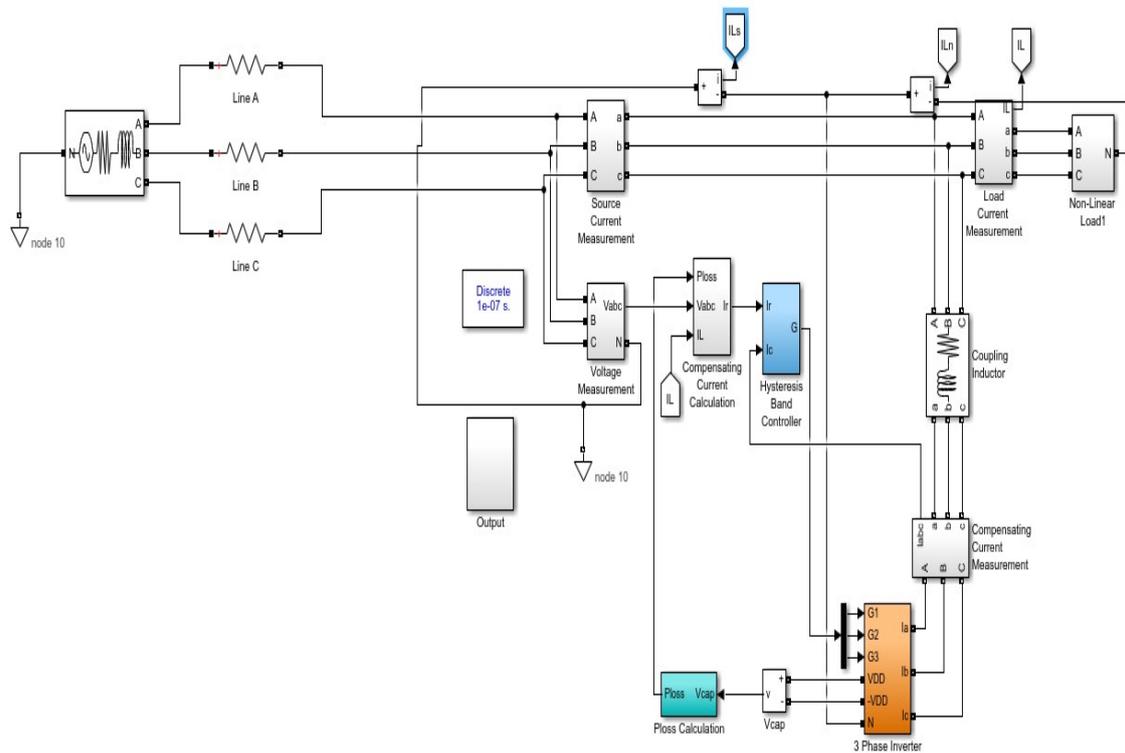


Fig. 5. Modelación en Matlab/ Simulink del caso de estudio

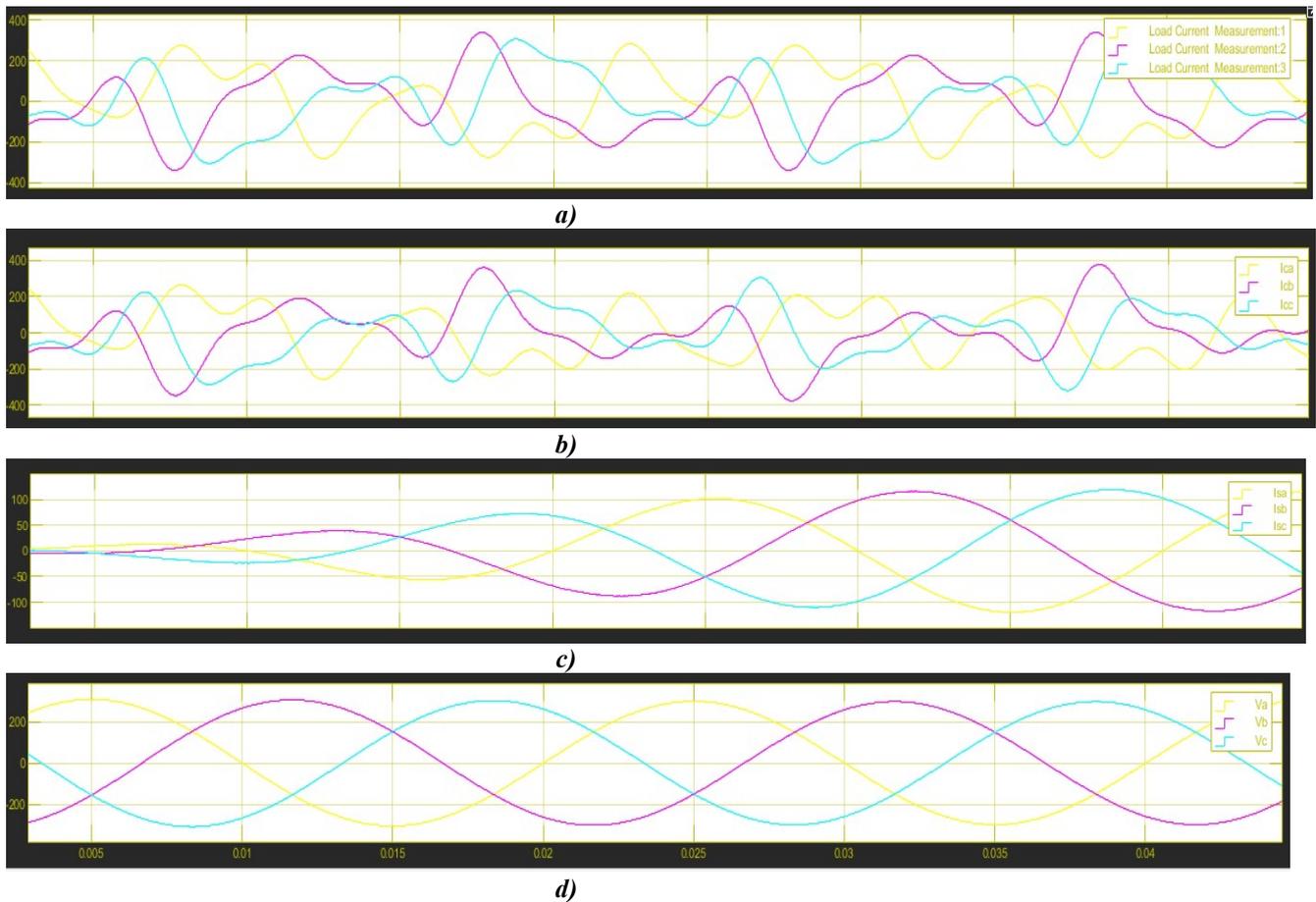


Fig. 6. Resultados de la simulación **a)** representa la corriente del sistema industrial (carga). **b)** representa en la fuente. **c)** representa la corriente que inyecta el filtro activo. **d)** representa el voltaje de la fuente

### Cálculo de componentes del filtro

Para la propuesta de los parámetros del filtro se tuvo en cuenta el filtro de 6 pulsos propuesto por [21], también se tomó como referencia los estudios de [22].

Frecuencias principales, se muestran sistema de ecuaciones (10).

$$\begin{aligned} f_3 &= 3 \cdot f_{fundamental} = 3 \cdot 50 = 150 \text{ Hz} \\ f_5 &= 5 \cdot f_{fundamental} = 5 \cdot 50 = 250 \text{ Hz} \\ f_7 &= 7 \cdot f_{fundamental} = 7 \cdot 50 = 350 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (10)$$

Armónicos iniciales, se muestran sistema de ecuaciones (11).

$$\begin{aligned} I_3 &= 80,44 \text{ A} \\ I_5 &= 38,5 \text{ A} \\ I_7 &= 31,78 \text{ A} \end{aligned} \quad (11)$$

### Cálculo de potencia reactiva total a compensar

La potencia reactiva para compensar los armónicos se calcula como se muestra en la ecuación (12):

$$Q_{\text{filtro}} = \sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)} \cdot V \quad (12)$$

Sustituyendo como se muestra en las ecuaciones (13):

$$\begin{aligned} V &= 800 \text{ V} \\ Q_{\text{filtro}} &= \sqrt{80,44^2 + 38,5^2 + 31,78^2} \cdot 800 \approx 73,26 \text{ kVar} \end{aligned} \quad (13)$$

### Cálculo de los componentes del filtro

**Capacitancia (C):** la capacitancia se calcula para la potencia reactiva total y una frecuencia de referencia, como se muestra en las ecuaciones (14):

$$\begin{aligned} f &= 250 \text{ Hz} \\ C &= \frac{Q_{\text{filtro}} \cdot 1000}{2\pi f V^2} = \frac{73,26 \cdot 1000}{2\pi \cdot 250 \cdot 800^2} \approx 0,00182 \text{ F} \end{aligned} \quad (14)$$

**Inductancia (L):** La inductancia se ajusta para una frecuencia de resonancia promedio, como se muestra en las ecuaciones (15):

$$\begin{aligned} f &= 250 \text{ Hz} \\ L &= \frac{1}{C \cdot (2\pi f)^2} = \frac{1}{0,00182 \cdot (2\pi \cdot 250)^2} \approx 0,00113 \text{ H} \end{aligned} \quad (15)$$

**Resistencia (R):** La resistencia se determina para un amortiguamiento adecuado, como se muestra en la ecuación (16):

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,00113}{0,00182}} \approx 0,79 \Omega \quad (16)$$

### Validación con IEEE 519

Los armónicos compensados se ajustan a los límites permisibles del estándar, el THD<sub>i</sub> total se muestra en la ecuación (17):

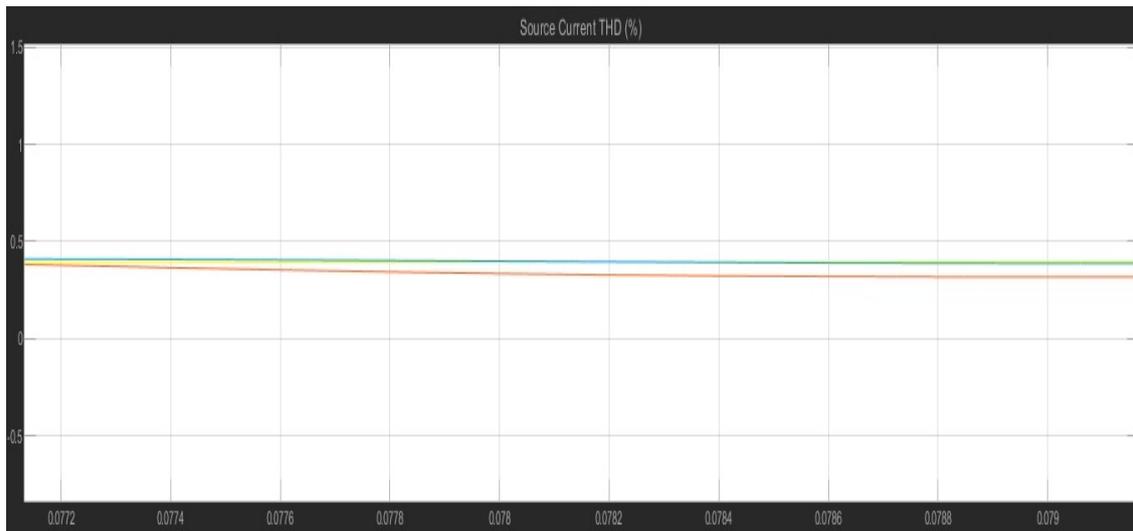
**Nuevo I<sub>3</sub>:** Reducido de 80,44 A a 14,742 A

**Nuevo I<sub>5</sub>:** Reducido de 38,5 A a 14,742 A

**Nuevo I<sub>7</sub>:** Reducido de 31,78 A a 7,371 A

$$THD_i = \frac{\sqrt{14,742^2 + 14,742^2 + 7,371^2}}{368,55} \cdot 100 \approx 4,6\% \quad (17)$$

Esto cumple con el límite de 5% establecido por **IEEE 519** y se comprueba mediante la simulación del caso de estudio como se muestra en la figura 7. De la figura 6, puede observarse que la implementación del filtro activo de potencia tipo shunt demostró ser una solución eficaz para mitigar los armónicos en el sistema industrial, mejorando significativamente la calidad de la energía eléctrica.



**Fig.7.** simulación del cálculo del THD

Los resultados en las simulaciones confirman que el filtro es capaz de compensar los armónicos generados por las cargas no lineales, logrando que las corrientes en la fuente se aproximen a formas de onda senoidales ideales. Con el objetivo de comparar de manera visual se debe señalar que la corriente inyectada por el filtro graficó en la misma fase que la carga, pero en la simulación está en contrafase a la corriente de la carga. En detalle la corriente inyectada por el filtro activo presentó una forma de onda complementaria a las distorsiones armónicas de la carga, lo que permitió neutralizar estas perturbaciones en la fuente.

Además, se observó una mejora en el factor de potencia, optimizando el desempeño energético del sistema y reduciendo las pérdidas relacionadas con armónicos. Estas características confirman la idoneidad del diseño y control del filtro en contextos industriales donde la calidad de la energía es crítica. Los resultados respaldan el uso de filtros activos en aplicaciones prácticas, destacando la importancia de un diseño robusto y adaptativo que permita ajustar las estrategias de compensación para diferentes configuraciones de carga y niveles de distorsión armónica. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a mejorar la eficiencia de los filtros activos y su integración en sistemas energéticos más complejos.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados del trabajo se puede obtener las conclusiones siguientes:

- **Importancia de la calidad de la energía:** El artículo destaca la creciente importancia de la calidad de la energía eléctrica debido a la proliferación de cargas no lineales en los sistemas modernos. Se resalta cómo la distorsión armónica y el bajo factor de potencia pueden afectar negativamente la eficiencia, la estabilidad y la vida útil de los equipos.
- **Filtros activos como solución:** Los filtros activos de potencia, en particular los de tipo shunt, se presentan como una solución eficaz para mitigar los problemas de calidad de la energía. Se enfatiza su capacidad de adaptación dinámica y su eficiencia en la compensación de armónicos y la mejora del factor de potencia, en comparación con los filtros pasivos tradicionales.
- **Beneficios de los FAP:** Se detallan los beneficios de la implementación de FAP, incluyendo la reducción de pérdidas en el sistema, la prolongación de la vida útil de los equipos, la mejora de la eficiencia energética y el cumplimiento de normativas internacionales como la IEEE-519.
- **Profundizando en el control:** El artículo profundiza en los métodos de control de los FAP, comparando las transformadas  $\alpha$ - $\beta$  y d-q. Se describen las ventajas y desventajas de cada método, considerando aspectos como la complejidad computacional, la respuesta dinámica y la adaptabilidad a sistemas desbalanceados.
- **Aporte a la investigación:** El artículo contribuye a la investigación en el área de la calidad de la energía, proporcionando un análisis detallado de los FAP tipo shunt y su aplicación en sistemas industriales. Se presentan resultados de simulación que validan la efectividad de los FAP y se discuten las implicaciones para futuras investigaciones en el campo.

## REFERENCIAS

- [1]. Martínez, M., *et al.* "Estudio por medio de Scilab de los armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia aplicado a un caso de estudio". Monografía, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE. ISBN 978-959-261-605-9, La Habana, 2021. Disponible en: <https://goo.su/izaEbj>
- [2]. Martínez, M., y Lemba, I. "Proposta de estudo das harmónicas no Sistema Industrial Sonangol – Namibe a partir de seu levantamento eléctrico". Revista Ingeniería Energética. 2018, vol. 39, n. 2, p. 123-133. ISSN 1815-5901. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v39n2/rie09218.pdf>
- [3]. Corasaiti, V. "Filtros activos de potencia para la compensación de reactivo y armónicas en media tensión". Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2008. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/44696>
- [4]. Widagdo, R., *et al.* "Harmonic mitigation using passive filters in 3-phase inverters to improve power quality on microgrid". 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA), IEEE, 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/icamimia60881.2023.10427725>
- [5]. Taghvaie, A., *et al.* "A comprehensive review of harmonic issues and estimation techniques in power system networks based on traditional and artificial intelligence/machine learning". IEEE access. 2023, vol. 11, p. 31417-31442. ISSN 2169-3536. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10078390>
- [6]. Srividhya, J., *et al.* "A Review on causes, effects, and detection techniques of harmonics in the power system". 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC), IEEE, p. 680-686, 2016. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/iccpeic.2016.7557309>
- [7]. Duffey, C., y Stratford, R. "Update of harmonic standard IEEE-519-IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems". Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego, USA, 2003. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ias.1989.96858>
- [8]. Widagdo, R., *et al.* "Analysis of the Effectiveness of Using Active Filters and Passive Filters in Reducing Harmonics Using a Power Simulator (PSIM) at PT. Delta Jaya Mas". Wahana : Tridarma Perguruan Tinggi. 2024, vol. 76, n. 2, p. 8 - 28. ISSN 2654-4954. Disponible en: <https://doi.org/10.36456/wahana.v76i2.9283>
- [9]. Assam, Z., *et al.* "Improving the efficiency of a non-ideal grid coupled to a photovoltaic system with a shunt active power filter using a self-tuning filter and a predictive current controller". Electrical Engineering & Electromechanics. 2024, n. 6, p. 33–43. ISSN 2074-272X. Disponible en: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.05>
- [10]. Khandelwal, A., y Joshi, N. "Implementation of fuzzy controller based active filter for harmonic mitigation of grid-connected PV-system". International Journal of Applied Power Engineering. 2024, vol. 13, n. 3, p. 539-545. ISSN 2722-2624. Disponible en: <https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i3.pp539-545>
- [11]. Luo, D., *et al.* "A novel jittered-carrier phase-shifted sine pulse width modulation for cascaded H-bridge converter". The Journal of Engineering. 2024, vol. 6, p. 1 - 10. ISSN 2051-3305. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/tje.12391>
- [12]. Bao, D., *et al.* "Full-Order Sliding Mode Observer Based on Synchronous Frequency Tracking Filter for High-Speed Interior PMSM Sensorless Drives". Energies. 2020, vol. 13, n. 6511, p. 1 - 19. ISSN 1996-1073. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/en13246511>
- [13]. Durango, J., *et al.* "Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia". Tecnura. 2017, vol. 21, n. 52, p. 15-31. ISSN 2248-7638. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a01>
- [14]. Vásquez, L., y Ortega, E. "Localización de Distorsiones Armónicas en Sistemas Eléctricos usando Sensado Comprimido". Ingeniería y competitividad. 2022, vol. 24, n. 1, p. 1-15. ISSN 2027-8284. Disponible en: [https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/11037/14605](https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/11037/14605)
- [15]. Herman, L., *et al.* "Design and Performance Evaluation of a Hybrid Active Power". Energies. 2024, vol. 17, p. 1 -31. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en17112492>
- [16]. López, A. "Compensación de armónicos de corriente y corrección del factor de potencia mediante filtros activos paralelo. Estado del conocimiento". Tesis Doctoral. Repositorio Universidad de Cantabria, España, 2005. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/10632#page=4>

- [17]. Morán, L., *et al.* "Active Power Filters". Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann. 2018, p. 1341-1379. ISBN: 9780128114070. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/active-power-filter>
- [18]. Mysak, T., y Shapoval, I. "A simple control strategy for a three-phase shunt active power filter based on second-order sliding mode". 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Istanbul, Turkey. 2020, p. 27 - 32. Disponible en: [https://www.academia.edu/70789377/2020\\_IEEE\\_4th\\_International\\_Conference\\_IEPS](https://www.academia.edu/70789377/2020_IEEE_4th_International_Conference_IEPS)
- [19]. Yang, J., *et al.* "Comparison of Finite Control Set and Continuous Control Set Model Predictive Control Schemes for Model Parameter Mismatch in Three-Phase APF". Frontiers in Energy Research. 2021, vol. 9, n. 727364, p. 1 -12. ISSN 2296-598X. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.727364>
- [20]. Somkun, S. "High performance current control of single-phase grid-connected converter with harmonic mitigation, power extraction and frequency adaptation capabilities". IET Power Electronics. 2021, vol. 14, p. 352–372. ISSN 1755-4543. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/pel2.12038>
- [21]. Bhujel, N. "Three Phase Shunt Active Power Filter using pq theory". MATLAB Central File Exchange. 2024. [Consultado el 2 de enero de 2024]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/61215-three-phase-shunt-active-power-filter-using-pq-theory>
- [22]. Guardarrama, J., *et al.* "Diseño en el software libre Scilab de una aplicación para el análisis de filtros eléctricos". Pedagogía Profesional. 2024, vol. 22, n. 3, p. 1-10. ISSN 1684-5765. Disponible en: <https://goo.su/ShST1>

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Maykop Pérez Martínez:** <https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Josnier Ramos Guardarrama:** <https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Cristian Pérez Blanco:** <https://orcid.org/0000-0002-6465-990X>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**José Antonio Rodríguez Valdés:** <https://orcid.org/0000-0003-3890-0613>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.