

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**Diseño y simulación de filtro activo de potencia para mitigar los armónicos generados por un variador de frecuencia**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

**AUTOR**

**Jose Aaron Sanchez Vera**

**ASESOR**

**Jorge Alberto Villanueva Zapata**

**<https://orcid.org/0000-0002-2529-1161>**

**Chiclayo, 2026**

**Diseño y simulación de filtro activo de potencia para mitigar los armónicos generados por un variador de frecuencia**

PRESENTADA POR  
**Jose Aaron Sanchez Vera**

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

APROBADA POR

Jony Villalobos Cabrera  
PRESIDENTE

Alexander Querevalu Morante  
SECRETARIO

Jorge Alberto Villanueva Zapata  
VOCAL

## **Dedicatoria**

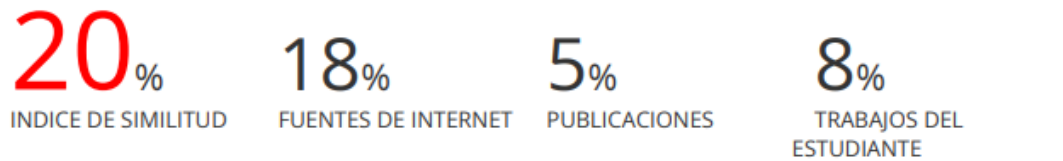
Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a mi Padre Celestial, por guiar mis pasos, darme fortaleza en los momentos difíciles y bendecirme con la capacidad necesaria para alcanzar esta meta; a mi amada esposa, por su amor incondicional, paciencia y constante apoyo durante todo este proceso, siendo mi motivación y fortaleza en cada etapa; y a mis padres, por su esfuerzo, sacrificio y ejemplo de vida, quienes me enseñaron el valor del trabajo y la perseverancia, haciendo posible que hoy alcance este logro.

## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a mi Padre Celestial por escuchar mis oraciones, darme sabiduría y sostenerme con Su amor durante este camino académico. Expreso mi sincero agradecimiento a mi esposa, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional; a mis padres, por su amor, consejos y valores; y a mis hermanos, por su constante motivación. Asimismo, agradezco a mis docentes por sus enseñanzas y, de manera especial, a mi asesor de tesis, el Ingeniero Jorge Alberto Villanueva Zapata, por su orientación y apoyo durante esta investigación.

# Diseño y simulación de filtro activo de potencia para mitigar los armónicos generados por un variador de frecuencia

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>dspace.ups.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.udec.cl</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>doaj.org</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>www.coursehero.com</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>Submitted to Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>repositoriodspace.unipamplona.edu.co</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>tesis.usat.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>9</b>	<b>dspace.uclv.edu.cu</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>10</b>	<b>www.conacyt.gov.py</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>11</b>	<b>tesis.ucsm.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>

# Índice

Resumen .....	6
Abstract .....	7
I. INTRODUCCIÓN .....	8
II. PROBLEMÁTICA.....	9
III. OBJETIVOS .....	9
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
V. MARCO TEÓRICO.....	13
VI. MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
6.1. Procedimientos para el cálculo de las corrientes de referencia.....	20
6.2. Modelado del sistema eléctrico en Simulink .....	25
6.3. Diseño del filtro activo de potencia .....	27
6.4. Desarrollo del filtro activo en Simulink.....	28
6.5. Variables medidas y forma de evaluación .....	29
6.6. Parametrización de la distorsión armónica permitida según IEEE 519.....	30
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
7.1. THD generado por la carga no lineal .....	31
7.2. THD en la fuente con aplicación de filtros activos.....	32
7.3. Comparación de resultados .....	34
7.4. Forma de onda de corriente en la fuente .....	34
VIII. CONCLUSIONES .....	38
IX. RECOMENDACIONES .....	39
X. REFERENCIAS.....	40
XI. ANEXOS.....	42

## Resumen

Los armónicos generados por variadores de frecuencia son un problema creciente en sistemas eléctricos, provocando distorsiones que afectan la calidad y estabilidad de la energía eléctrica. Los filtros activos de potencia (APFs) se han convertido en una solución efectiva para mitigar estos problemas, permitiendo la eliminación de componentes armónicos no deseados en la corriente eléctrica. Este estudio tiene como objetivo principal diseñar y simular un filtro activo de potencia que reduzca los armónicos generados por un variador de frecuencia. Su desempeño se evaluará mediante simulaciones. Para ello, se seleccionarán cuatro tipos de APFs, los cuales serán sometidos a simulaciones en MATLAB (Simulink) para comparar su rendimiento en la mitigación de armónicos. Este trabajo busca no solo mejorar la calidad de la energía eléctrica, sino también proporcionar una base sólida para futuras investigaciones en el área, contribuyendo al desarrollo de soluciones prácticas y eficientes en el campo de la ingeniería eléctrica.

**Palabras clave:** armónicos eléctricos, filtro activo, Simulink, calidad de energía, interferencias eléctricas

### **Abstract**

Harmonics generated by variable frequency drives (VFDs) are a growing problem in electrical systems, causing distortions that affect the quality and stability of electrical power. Active power filters (APFs) have become an effective solution to mitigate these problems, allowing the elimination of unwanted harmonic components in the electrical current. This study aims to design and simulate an active power filter that reduces the harmonics generated by a VFD. Its performance will be evaluated through simulations. To this end, four types of APFs will be selected and subjected to simulations in MATLAB (Simulink) to compare their harmonic mitigation performance. This work seeks not only to improve the quality of electrical power but also to provide a solid foundation for future research in the area, contributing to the development of practical and efficient solutions in the field of electrical engineering.

**Keywords:** electrical harmonics, active filter, Simulink, power quality, electrical interference

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento constante en el consumo de energía eléctrica ha impulsado el desarrollo de tecnologías que mejoran la eficiencia y el control en sistemas industriales. La electrónica de potencia es clave en este avance, permitiendo optimizar la operación de equipos mediante variadores de frecuencia, los cuales ajustan la velocidad y el rendimiento de motores eléctricos. Sin embargo, estos dispositivos generan armónicos, afectando la calidad de la energía al distorsionar las ondas de corriente y tensión en los sistemas eléctricos. Estos armónicos resultan en efectos adversos como sobrecalentamientos, pérdidas adicionales, interferencias en comunicaciones y un desgaste acelerado en los equipos conectados al sistema [1].

Los problemas causados por los armónicos eléctricos son en ocasiones difíciles de detectar antes de que generen daños significativos. A largo plazo, estos efectos acumulados pueden derivar en fallas críticas y un aumento de los costos de operación y mantenimiento [2]. Ante esta problemática, los filtros activos de potencia (APF) emergen como una solución adaptable y eficaz para la mitigación de armónicos, al proporcionar la capacidad de eliminar componentes armónicas en corrientes no deseadas, mejorando la calidad y estabilidad de la energía eléctrica.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar y simular un filtro activo de potencia que mitigue eficazmente los armónicos generados por un variador de frecuencia. Para ello, se seleccionarán cuatro tipos de APFs, los cuales serán evaluados a través de simulaciones en MATLAB (Simulink) para determinar el diseño más efectivo en condiciones específicas de operación. Esta investigación no solo contribuirá a mejorar la calidad de la energía eléctrica en sistemas con variadores de frecuencia, sino que también sentará las bases para futuras innovaciones en el campo de la ingeniería eléctrica y la electrónica de potencia, ofreciendo soluciones prácticas para aplicaciones industriales y comerciales.

## II. PROBLEMÁTICA

Los variadores de frecuencia, ampliamente utilizados para controlar motores eléctricos en la industria, generan armónicos que afectan la calidad de la energía eléctrica, provocando sobrecalentamiento, reducción de eficiencia y fallos en equipos sensibles. Aunque existen diversas técnicas para mitigar estos armónicos, los filtros activos de potencia son una solución efectiva por su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones de carga. No obstante, seleccionar, diseñar y simular el filtro adecuado es fundamental para garantizar su eficiencia. Esta tesis busca precisamente abordar este problema, proponiendo el diseño y simulación de un filtro activo de potencia que mitigue eficazmente los armónicos generados por variadores de frecuencia.

## III. OBJETIVOS

### 3.1. Objetivo general

- Diseñar y simular un filtro activo de potencia para mitigar los armónicos generados por un variador de frecuencia, evaluando su desempeño mediante simulaciones.

### 3.2. Objetivos específicos

- Investigar y analizar 4 tipos de filtros activos de potencia utilizados en la mitigación de armónicos en sistemas con variadores de frecuencia.
- Modelar en Simulink de MATLAB cuatro filtros activos de potencia, previamente definidos y analizados.
- Desarrollar un modelo de carga no lineal en Simulink mediante la integración de un variador de frecuencia y un motor de inducción trifásico.
- Realizar simulaciones en MATLAB (Simulink) para comparar el rendimiento de distintos tipos de filtros activos de potencia.
- Determinar el filtro activo de potencia más adecuado en base a los resultados obtenidos en las simulaciones.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

En la tesis titulada Estudio y simulación del uso de un filtro activo para la mitigación de armónicos de corriente en sistemas eléctricos, realizada por Ocaña y Ortiz [1], se investiga el

impacto de las cargas no lineales en la calidad de la energía eléctrica, destacando la creciente problemática de la generación de armónicos. Utilizando la teoría P-Q para el diseño del filtro activo y la herramienta Simulink de MATLAB para las simulaciones, el estudio demuestra que la implementación de un filtro activo puede reducir significativamente los niveles de distorsión armónica total (THDi) en sistemas eléctricos. Los resultados indican que el filtro diseñado logró disminuir la distorsión armónica en un rango del 70% al 90%, lo que se traduce en una mejora notable en la calidad de la energía suministrada, incluso ante variaciones instantáneas en la carga, con un tiempo de respuesta de aproximadamente 15 ms. Además, se concluye que, aunque los filtros activos no pueden generar una onda completamente sinusoidal en presencia de armónicos, la modulación de la corriente de referencia y el uso de transistores y filtros pasivos permiten una aproximación efectiva a la corriente ideal de compensación. La investigación subraya la importancia de seleccionar adecuadamente la estrategia de control para la corriente de inyección, ya que esto influye directamente en la eficacia del filtro activo. Los hallazgos sugieren que la implementación de filtros activos es una solución viable para mitigar los efectos adversos de los armónicos en sistemas eléctricos, mejorando así la calidad de la energía y la eficiencia operativa de los componentes eléctricos.

Por otro lado, Suárez [3] presenta un estudio sobre la implementación de un filtro activo de potencia en paralelo utilizando MATLAB/Simulink, con el objetivo de mejorar la calidad de la energía en sistemas eléctricos afectados por armónicos. La investigación se centra en la comparación de dos métodos de control del inversor: la modulación por ancho de pulso del vector espacial (SPWM) y la modulación por banda de histéresis (MBH). Los resultados obtenidos muestran que el uso de SPWM permite una reducción significativa de la distorsión armónica total (THD), alcanzando valores de hasta un 4.99% en comparación con el 28.84% inicial. Además, se observó que la compensación de armónicos fue más efectiva en cargas específicas, donde las amplitudes del tercer y quinto armónico se redujeron a 0.05% y 0.35%, respectivamente, en el caso de SPWM. En contraste, al aplicar MBH, el THD se mantuvo en un 12.90%, lo que indica que, aunque ambos métodos son efectivos, SPWM ofrece mejores resultados en términos de calidad de la energía. La tesis concluye que la implementación de filtros activos de potencia es crucial para mitigar los efectos de las cargas no lineales en las redes eléctricas, y que el método de control SPWM se destaca por su capacidad para mantener una frecuencia de conmutación constante, lo que contribuye a un mejor desempeño del sistema. Además, se identificaron áreas críticas donde la distorsión armónica puede ser más

pronunciada, sugiriendo la necesidad de un análisis continuo de las condiciones de carga en el sistema electro energético.

El proyecto Modelado y Simulación de un Filtro Activo de Potencia Controlado por PI para la Mejora de la Calidad de la Energía Basado en la Teoría P-Q de Imam y Kumar [5] examina la implementación de un Filtro Activo de Potencia (APF) en derivación, utilizando MATLAB/Simulink, con el objetivo de mejorar la calidad de la energía en sistemas eléctricos afectados por distorsiones armónicas. La investigación se centra en la evaluación de la eficacia del filtro en condiciones de carga no lineal, tanto equilibradas como desequilibradas. Los resultados obtenidos indican que el APF propuesto logra una notable reducción de la distorsión armónica total (THD), alcanzando valores de 1,18% en sistemas equilibrados y 1,13% en sistemas desequilibrados, en comparación con los valores iniciales de 30,88% y 12,97%, respectivamente. Además, se observó que la compensación de armónicos fue particularmente efectiva, con una reducción de las amplitudes del tercer y quinto armónico a 0,05% y 0,35% en el caso de sistemas equilibrados. La tesis concluye que la implementación de filtros activos de potencia es esencial para mitigar los efectos de las cargas no lineales en las redes eléctricas, destacando la capacidad del APF para mantener la calidad de la energía dentro de los límites establecidos por el IEEE. Asimismo, se identificaron áreas críticas donde la distorsión armónica puede ser más pronunciada, lo que sugiere la necesidad de un monitoreo continuo de las condiciones de carga en el sistema eléctrico.

Paja [4] investiga en su estudio la implementación de un filtro activo de potencia (FAP) en sistemas eléctricos de baja tensión, utilizando MATLAB y su herramienta SIMULINK, con el objetivo de controlar y eliminar los armónicos presentes en la red eléctrica que afectan la funcionalidad de los equipos y aumentan el consumo energético. Los resultados obtenidos revelan que la implementación del filtro activo resulta en una notable disminución de los niveles de distorsión armónica total (THD), que se redujo de un 15% a menos del 5%, mejorando significativamente la calidad de la energía al reducir la distorsión tanto en la corriente como en el voltaje. En particular, se destaca que la corriente mostró una atenuación más significativa, alcanzando una reducción del 80% en los armónicos de corriente, en comparación con una reducción del 50% en los armónicos de voltaje, evidenciando la efectividad del filtro en la compensación de armónicos generados por cargas no lineales. En conclusión, se establece que el diseño y la implementación de filtros activos de potencia son fundamentales para mitigar los efectos adversos de los armónicos en las redes eléctricas de baja tensión, subrayando la importancia de mantener la calidad de la energía dentro de los

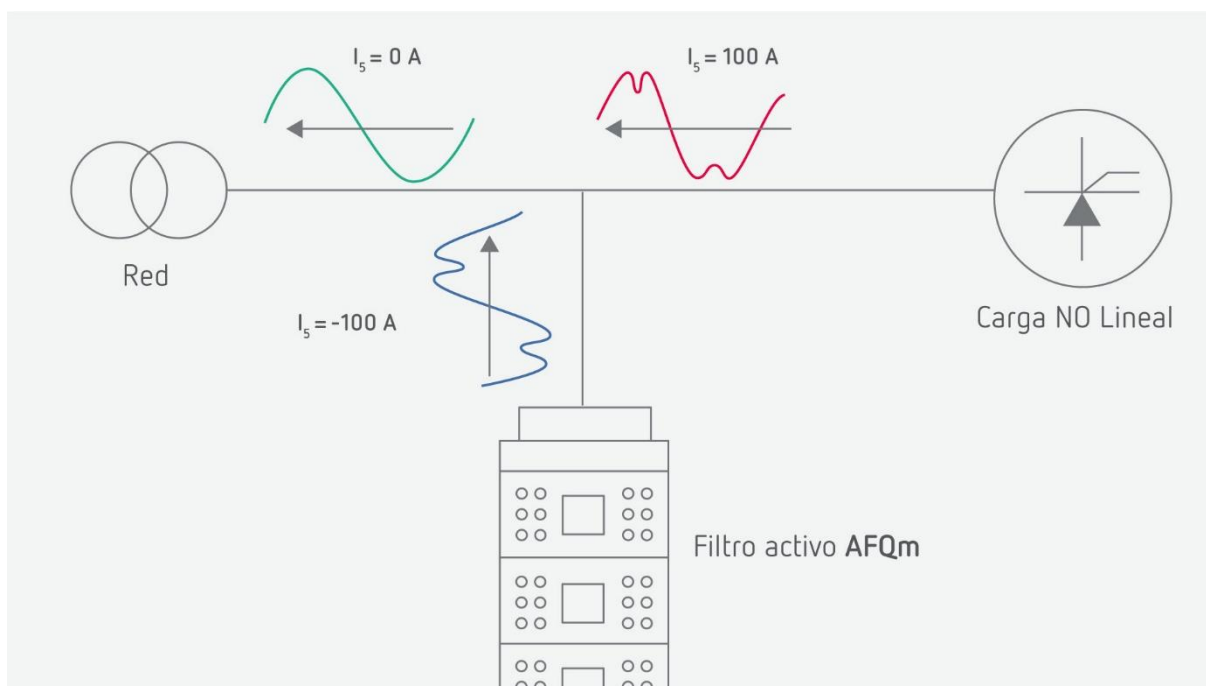
límites establecidos y sugiriendo la necesidad de un monitoreo continuo para evaluar el desempeño del filtro en diferentes condiciones de carga.

En la tesis titulada "Simulación del sistema IEEE 9 barras con filtro activo de armónicos", realizada por Castro [6], se investiga la incidencia de la calidad de la energía en sistemas de potencia debido a cargas no lineales, destacando la problemática de la distorsión armónica. Utilizando el software MATLAB/SIMULINK para la simulación, el estudio demuestra que la implementación de un filtro activo de potencia en derivación puede compensar significativamente los armónicos de corriente, logrando que la forma de onda de la corriente sea prácticamente sinusoidal. Los resultados indican que el sistema simulado, con un total de generación de 315,73 MW, logra suplir la demanda de 315 MW, evidenciando un balance adecuado entre generación y demanda. Se observó que el filtro activo logró reducir el Total Harmonic Distortion (THD) de la corriente en la barra 6 del sistema de un 10,96% a un 0,21%, lo que representa una disminución notable en la distorsión armónica. Además, se concluye que, aunque el filtro activo no elimina completamente la distorsión en todas las barras, su aplicación en la barra 6 permite una compensación efectiva en el punto de acoplamiento común. La investigación subraya la importancia de seleccionar adecuadamente los componentes del filtro, como los semiconductores IGBT, para garantizar un rendimiento óptimo en sistemas de alta potencia. Los hallazgos sugieren que la implementación de filtros activos es una solución viable para mitigar los efectos adversos de los armónicos en sistemas eléctricos, mejorando así la calidad de la energía y la eficiencia operativa de los componentes eléctricos.

## V. MARCO TEÓRICO

### Filtros Activos de Potencia (APF)

Los Filtros Activos de Potencia (APF) son dispositivos electrónicos diseñados para mitigar armónicos eléctricos y mejorar la calidad de la energía en sistemas eléctricos de potencia. Funcionan detectando las componentes armónicas no deseadas en la corriente o tensión eléctrica y generando señales de compensación que las cancelan o reducen significativamente. Este proceso se realiza de manera dinámica y en tiempo real, adaptándose a las variaciones en la carga y las condiciones de operación del sistema. Los APF son capaces de filtrar armónicos de alta frecuencia generados por cargas no lineales como variadores de velocidad, equipos electrónicos, y sistemas de iluminación con tecnología de descarga, entre otros. Al reducir estos armónicos, los APF previenen la distorsión de las formas de onda de corriente y tensión, mejorando así la eficiencia del sistema eléctrico y prolongando la vida útil de los equipos conectados [6].



**Figura 1.** Filtro Activo de Potencia

**Fuente:** [7]

Las aplicaciones de los filtros activos de potencia son diversas y se encuentran en una amplia gama de industrias y sectores. Algunos ejemplos incluyen:

- **Industria:**

En plantas industriales con equipos de alta potencia que generan armónicos, los APF ayudan a cumplir con los estándares de calidad de energía eléctrica y a prevenir problemas de funcionamiento en maquinaria crítica.

- **Edificación y comercio:**

En edificios comerciales y residenciales con cargas no lineales como computadoras, iluminación LED, y sistemas HVAC, los APF mejoran la eficiencia energética y reducen las pérdidas por efecto Joule.

- **Infraestructura de telecomunicaciones:**

En centros de datos y redes de telecomunicaciones, donde la calidad de la energía es crítica para la operación continua y la integridad de los equipos sensibles a variaciones eléctricas.

- **Transporte y Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS):**

En sistemas de transporte eléctrico y UPS, donde los APF aseguran una alimentación estable y limpia para equipos electrónicos sensibles, como señales de tráfico y sistemas de control de trenes.

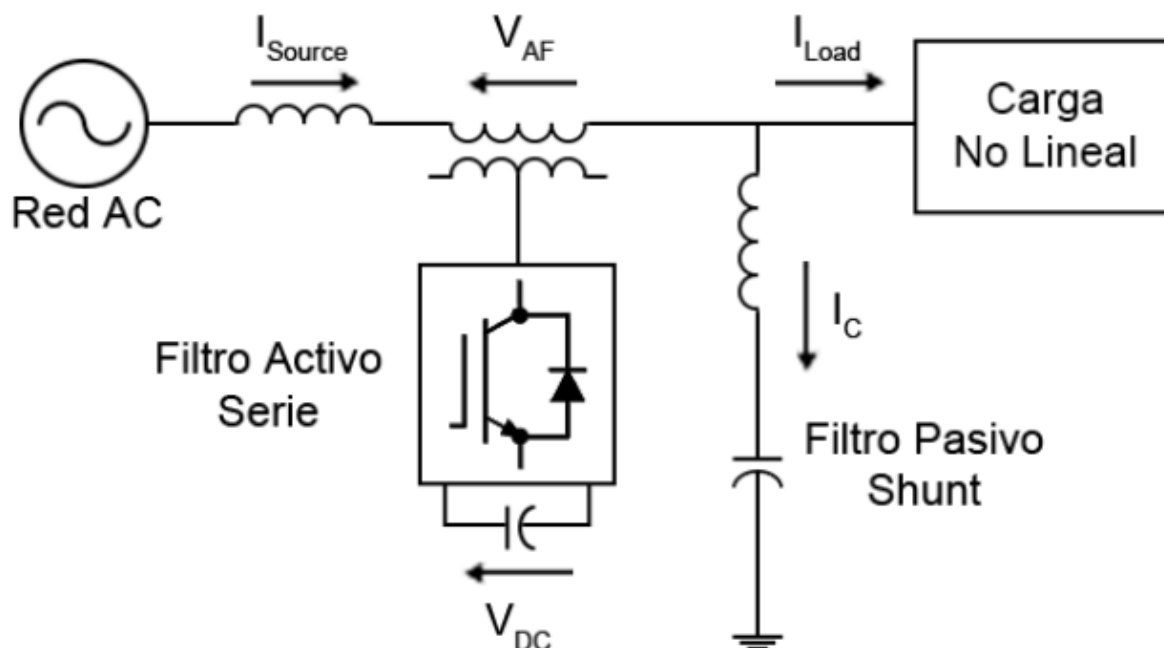
### **Tipos de APF por su conexión**

Los filtros activos de potencia (APF) pueden ser categorizados dependiendo del tipo de convertidor utilizado, la topología del circuito, el esquema de control implementado y las características específicas de compensación que ofrecen.

**Los filtros activos de potencia (APF) tipo Shunt** se emplean para compensar armónicos de corriente, potencia reactiva y corriente de carga desbalanceada, además de funcionar como generadores estáticos de potencia reactiva para estabilizar y mejorar el perfil de voltaje.

**Los APF tipo Serie** se conectan en serie con la red AC antes de la carga, utilizando un transformador de acoplamiento para eliminar los armónicos de voltaje y equilibrar la regulación de voltaje en los terminales de línea o carga.

**Los APF tipo Híbrido** combinan características de los APF tipo Serie y un filtro pasivo LC tipo Shunt, ofreciendo así una solución mixta para la compensación de armónicos tanto de corriente como de voltaje en sistemas eléctricos.



**Figura 2.** Filtro Activo de Potencia tipo Híbrido

**Fuente:** [8]

### Tipos de APF por su teoría de control

- **APF basado en la teoría pq**

La teoría de potencia instantánea pq, propuesta por Akagi, Kanazawa y Nabae, es un enfoque ampliamente utilizado en sistemas trifásicos para el análisis y control de filtros activos. Esta teoría descompone las corrientes trifásicas en componentes activa y reactiva en el dominio del tiempo. El objetivo principal es identificar y eliminar las corrientes armónicas no deseadas mientras se mantiene la potencia activa necesaria para alimentar la carga. La transformación de Clarke se emplea para convertir las señales trifásicas a, b, y c al sistema de referencia  $\alpha\beta$ . Luego, mediante ecuaciones matriciales, se obtienen las potencias instantáneas activa (p) y reactiva (q). La ventaja de este método radica en su capacidad para operar en tiempo real, pero requiere algoritmos de cálculo rápidos y precisos para garantizar un rendimiento óptimo [5].

- **APF basado en la teoría dq**

La teoría dq, también conocida como teoría de los ejes sincronizados o transformada de Park, es otra técnica popular para el control de filtros activos de potencia. En este método, las señales trifásicas son transformadas a un sistema de coordenadas dq mediante la transformación de Park, la cual se sincroniza con la frecuencia de la red eléctrica mediante un lazo de fase bloqueada (PLL, por sus siglas en inglés). En el sistema dq, las

componentes armónicas se convierten en señales oscilatorias que pueden ser fácilmente aisladas y compensadas. Esto facilita el diseño del controlador del APF para suprimir las armónicas y ajustar el factor de potencia. Este método es altamente efectivo para aplicaciones con cargas no lineales conectadas a redes balanceadas y de frecuencia constante [4].

- **APF basado en la teoría dq0**

La teoría dq0 es una extensión de la teoría dq, que incorpora la componente cero (0) para analizar sistemas eléctricos con cargas desequilibradas. Utiliza una transformación trifásica completa para descomponer las corrientes en componentes directa (d), cuadratura (q) y cero (0). En sistemas desequilibrados o con presencia de neutro, esta teoría permite identificar las corrientes armónicas asociadas a las componentes de secuencia positiva, negativa y cero. La componente cero es particularmente importante en sistemas con neutro donde las corrientes armónicas pueden retornar a través del conductor neutro. Este método ofrece una solución integral para redes complejas, pero implica mayores requerimientos computacionales en comparación con la teoría dq [1].

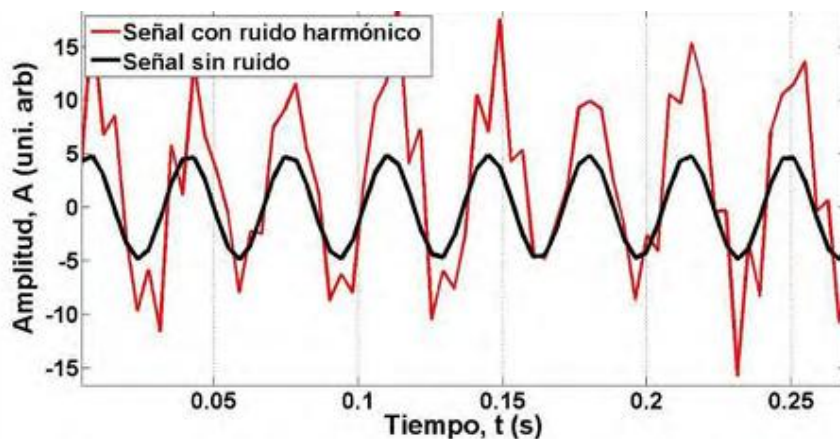
- **APF basado en el balance de potencia (power balance)**

El método basado en el balance de potencia utiliza un enfoque energético para mitigar los armónicos. Este enfoque se basa en analizar y compensar los desequilibrios de potencia activa y reactiva en tiempo real. Los filtros activos calculan la potencia armónica no deseada a partir de la diferencia entre la potencia suministrada por la fuente y la potencia requerida por la carga. Mediante sensores y algoritmos avanzados, el sistema mide y ajusta continuamente las inyecciones de corriente para equilibrar las potencias. Este método es especialmente útil en sistemas donde la estabilidad del suministro energético es crítica y la precisión del balanceo de potencia juega un papel importante. A diferencia de los métodos basados en transformaciones (pq, dq), este enfoque se centra más en el análisis global del flujo energético, lo que puede simplificar el diseño en ciertos casos, pero es menos común debido a la complejidad en la implementación de los sensores y algoritmos necesarios [6].

### **Armónicos Eléctricos**

Los armónicos eléctricos son componentes no deseados de la corriente eléctrica que tienen frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la red eléctrica (50 Hz o 60 Hz). Estos armónicos son generados principalmente por cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico, como dispositivos electrónicos, convertidores de frecuencia, rectificadores y otros equipos que alteran la forma de onda de corriente y tensión [7].

La presencia de armónicos eléctricos causa diversas problemáticas en los sistemas eléctricos, incluyendo la distorsión de las formas de onda de corriente y tensión, lo cual puede afectar negativamente la operación de equipos sensibles y provocar sobrecalentamiento en conductores y transformadores debido a las corrientes adicionales de alta frecuencia. Además, los armónicos pueden aumentar las pérdidas de energía en forma de calor en los equipos y cables, reduciendo la eficiencia del sistema eléctrico y aumentando los costos operativos [9].



**Figura 3.** Gráfica de Señal plagada de armónicos con onda fundamental

**Fuente:** [9]

### **Norma IEEE 519 sobre distorsión armónica de corriente (TDD)**

La IEEE 519 establece límites estadísticos para la distorsión armónica que un usuario puede inyectar en el Punto de Conexión Común (PCC), con el fin de evitar que la calidad de tensión del sistema se degrade. Para la corriente se emplea el índice Total Demand Distortion (TDD), definido como:

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} * \frac{1}{I_L} * 100$$

donde  $I_h$  es la componente de corriente del orden armónico  $h$  y  $I_L$  el máximo valor de corriente de demanda registrado en los últimos 12 meses en el PCC. A diferencia del THD (que se normaliza al momento de la medición), la TDD evalúa la distorsión respecto del peor caso de carga, asegurando un criterio más exigente para redes que operan con perfiles variables. La norma también introduce el cociente de cortocircuito  $I_{SC}/I_L$ ; cuanto mayor sea este cociente, más “fuerte” es la red y, por tanto, mayor es la corriente armónica admisible sin perturbar la tensión [1].

Aunque la norma IEEE 519 define límites en términos de TDD, en este estudio se utiliza el THD como indicador comparativo debido a la naturaleza simulada del sistema y a la facilidad de obtención de este parámetro en el entorno de simulación.

**Tabla 1.** Límites de distorsión armónica de corriente (TDD) según IEEE 519

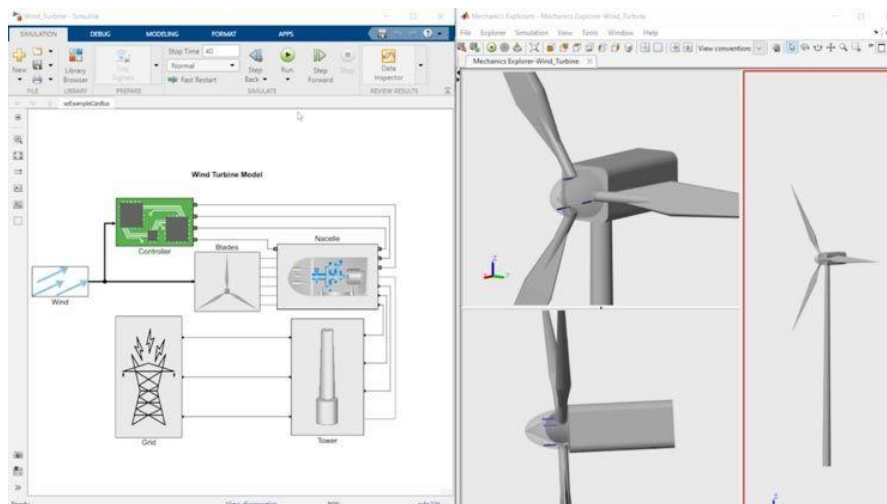
<b>Razón <math>I_{SC}/I_L</math></b>	<b>Límite TDD (%)</b> <b>120 V – 69 kV*</b>
< 20	5%
20 < 50	8%
50 < 100	12%
100 < 1000	15%
> 1000	20%

**Fuente:** [1]

### **Simulink**

Simulink es un entorno de simulación gráfica y una herramienta extensible para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Desarrollado por MathWorks, Simulink forma parte del entorno de MATLAB y proporciona una interfaz gráfica para la creación de modelos mediante diagramas de bloques, permitiendo simular el comportamiento de sistemas dinámicos en diversos dominios como la ingeniería de control, procesamiento de señales, telecomunicaciones, y sistemas de energía.

Simulink ofrece una amplia gama de bibliotecas de bloques predefinidos que representan funciones matemáticas, operadores lógicos, componentes de sistemas físicos como resistencias e inductancias, y elementos de control como PID y filtros. La interfaz de Simulink permite a los usuarios arrastrar y soltar bloques para crear modelos, estableciendo conexiones entre los bloques para definir el flujo de señales y la interacción entre los componentes del sistema. El motor de simulación de Simulink ejecuta el modelo definido, permitiendo realizar análisis temporales, de frecuencia, y de comportamiento en estados estacionarios y transitorios, manejando tanto sistemas continuos como discretos.



**Figura 4.** Interfaz general de Simulink

**Fuente:** [10]

Simulink permite modelar sistemas complejos a través de una interfaz intuitiva, creando modelos jerárquicos y encapsulando subcomponentes dentro de bloques reutilizables en otros proyectos. Los modelos en Simulink se pueden simular para observar su comportamiento bajo diferentes condiciones, incluyendo la simulación de sistemas lineales y no lineales, así como el manejo de señales de entrada y salida en el tiempo y en la frecuencia. Además, Simulink proporciona herramientas para la visualización y análisis de los resultados de la simulación, permitiendo trazar gráficas, realizar análisis de respuesta en frecuencia y verificar la respuesta temporal del sistema. Simulink también soporta la generación automática de código para implementar los modelos en hardware embebido, facilitando el desarrollo de prototipos y la implementación de sistemas de control en tiempo real. [10]



**Figura 5.** Simulink de MATLAB

**Fuente:** [11]

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1. Procedimientos para el cálculo de las corrientes de referencia

#### 6.1.1. Método de potencia reactiva instantánea (pq)

El método p-q, también conocido como teoría de potencia instantánea, es una técnica utilizada en sistemas trifásicos para analizar y compensar armónicos y potencia reactiva. Basado en una transformación matemática (Clarke) que convierte las señales de voltaje y corriente de abc a un sistema ortogonal  $\alpha\beta$ , este método permite calcular la potencia activa y reactiva en cada instante. Así, se pueden identificar las componentes indeseadas de la corriente (como armónicos y potencia no útil) y generar señales de compensación mediante filtros activos, mejorando la calidad de la energía en tiempo real [1].

Para separar las componentes activa y reactiva en tiempo real, primero se lleva el sistema trifásico (a, b, c) al marco estacionario ortogonal ( $\alpha, \beta, 0$ ) mediante:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

En el plano  $\alpha$ - $\beta$  (sistema de tres hilos), la potencia instantánea activa y reactiva se definen como:

$$p(t) = v_\alpha(t)i_\alpha(t) + v_\beta(t)i_\beta(t), \quad q(t) = v_\alpha(t)i_\beta(t) - v_\beta(t)i_\alpha(t)$$

Donde:

$p(t)$ : potencia activa instantánea (recoge el flujo de energía útil)

$q(t)$ : potencia reactiva instantánea (mide la componente en cuadratura, es decir, la potencia que oscila sin producir trabajo neto)

Tanto  $p(t)$  como  $q(t)$  pueden separarse en un valor medio (DC) y una componente alternante (AC):

$$p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t), \quad q(t) = \bar{q} + \tilde{q}(t)$$

Donde:

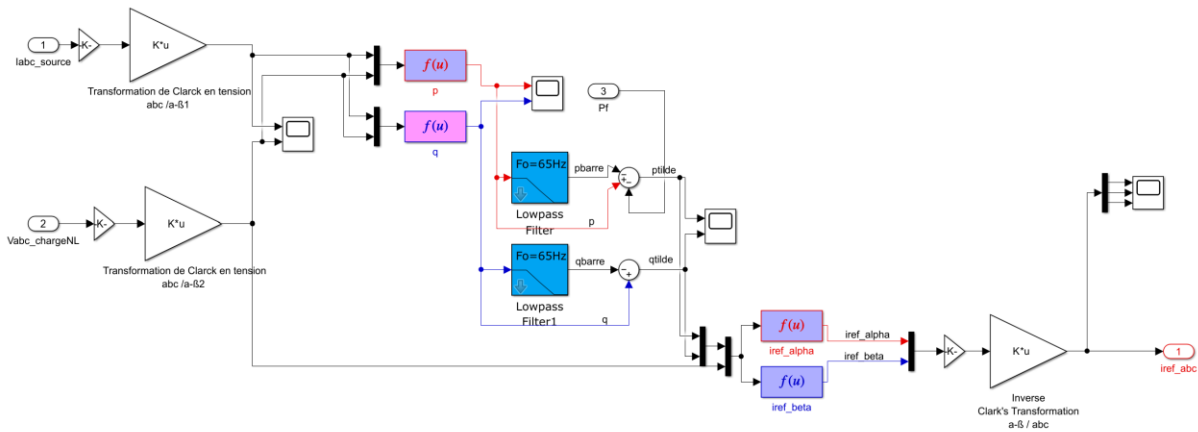
$\bar{p}, \bar{q}$  son los promedios (frecuentemente suministrados por la fuente)

$\tilde{p}(t), \tilde{q}(t)$  contienen armónicos y variaciones instantáneas que el filtro debe compensar.

Para anular la componente fluctuante de la potencia reactiva ( $\tilde{q}(t)$ ), se generan corrientes de referencia en  $\alpha\beta$ :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^*(t) \\ i_{\beta}^*(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde se fija  $q^* = 0$  para garantizar factor de potencia unitario. Finalmente, estas corrientes  $i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$  se convierten al dominio abc mediante la transformación inversa de Clarke.



**Figura 6.** Diagrama en Simulink del algoritmo p–q para cálculo de corrientes de referencia en un filtro activo de potencia

### 6.1.2. Método de transformación de componentes de secuencia directa (dq)

El método dq consiste en transformar las variables de corriente y tensión de un sistema trifásico del dominio estacionario abc al marco de referencia rotante síncrono formado por dos ejes ortogonales: el eje directo ( $d$ ) y el eje en cuadratura ( $q$ ). A diferencia del método dq0, aquí se excluye la componente de secuencia cero ( $I_0$ ) al asumir un sistema balanceado sin conexión a neutro. Al girar este marco a la misma velocidad angular que el sistema (frecuencia fundamental), las componentes de la corriente fundamental se convierten en señales constantes (DC), mientras que los armónicos se manifiestan como oscilaciones, facilitando su identificación y control por parte del filtro activo [12].

Las corrientes trifásicas medidas en la carga  $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$  se proyectan sobre los ejes rotantes d y q usando la transformada de Park sin componente 0.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Donde:

$\theta = \omega t$  es el ángulo de rotación del marco síncrono (con  $\omega = 2\pi f$ ).

$I_d$  representa la componente alineada con el eje de tensión (potencia activa).

$I_q$  representa la componente en cuadratura (potencia reactiva y armónica).

Este cambio de coordenadas permite que la corriente fundamental (50/60 Hz) aparezca como una señal continua, mientras que los armónicos aparecen como ondulaciones, facilitando su detección.

Una vez obtenidas las componentes  $I_d$  y  $I_q$ , se aplica un filtro paso bajo (LPF) para extraer la componente continua (fundamental).

$$I_d^{fund} = LPF(I_d), \quad I_q^{fund} = LPF(I_q)$$

A partir de estas, se calculan las corrientes armónicas a compensar:

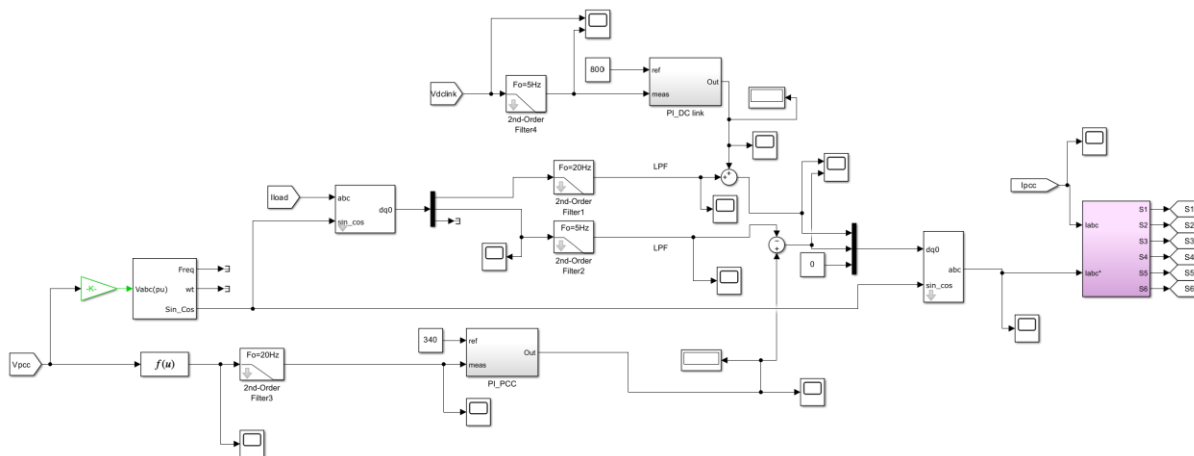
$$I_d^{comp} = I_d - I_d^{fund}, \quad I_q^{comp} = I_q - I_q^{fund}$$

Las señales  $I_d^{comp}$  y  $I_q^{comp}$  representan los armónicos y la potencia no deseada que el filtro activo debe cancelar.

Las referencias de corriente que el filtro debe generar se obtienen mediante la transformada inversa de Park, para volver al dominio trifásico:

$$\begin{bmatrix} I_a^{ref} \\ I_b^{ref} \\ I_c^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^{comp} \\ I_q^{comp} \end{bmatrix}$$

Estas señales de referencia son utilizadas por el controlador del filtro activo (por ejemplo, en combinación con un modulador PWM) para generar las corrientes que se inyectan en el sistema y así compensar los armónicos y la potencia reactiva.



**Figura 7.** Diagrama en Simulink del algoritmo dq para cálculo de corrientes de referencia en un filtro activo de potencia

### 6.1.3. Método de referencia en el sistema rotante (dq0)

El método dq0, o marco de referencia síncrono, consiste en trasladar las variables trifásicas a-b-c a un sistema de ejes que gira a la misma velocidad angular de la red. En dicho marco, la componente fundamental se convierte en valores continuos sobre los ejes d (en fase) y q (en cuadratura), mientras que las ondulaciones debidas a armónicos quedan como señales alternas fácilmente filtrables; así, el control puede distinguir y compensar selectivamente la distorsión sin afectar la potencia fundamental [13].

El primer paso operativo mide las corrientes instantáneas de la carga  $I_{aL}, I_{bL}, I_{cL}$  y las proyecta sobre los ejes rotantes mediante la transformada de Park.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aL} \\ I_{bL} \\ I_{cL} \end{bmatrix}$$

Esta matriz  $T_{dq0}$  emplea funciones seno-coseno desplazadas  $120^\circ$ , de modo que  $I_d$  refleja la potencia activa,  $I_q$  la potencia reactiva/armónica y  $I_0$  el desbalance de secuencia cero, constituyendo la base para el filtrado posterior.

Tras aplicar un filtro paso bajo y reguladores PI a  $I_d$  y  $I_q$  para extraer únicamente su porción continua (fundamental), se recompone la referencia de corriente trifásica con la transformada inversa dada en la ecuación:

$$\begin{bmatrix} I_a^{ref} \\ I_b^{ref} \\ I_c^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^* \\ I_q^* \\ I_0^* \end{bmatrix}$$

El inversor del filtro activo modula estas corrientes de referencia e inyecta en tiempo real la señal compensatoria, suprimiendo los armónicos que la carga intentaría introducir hacia la red.



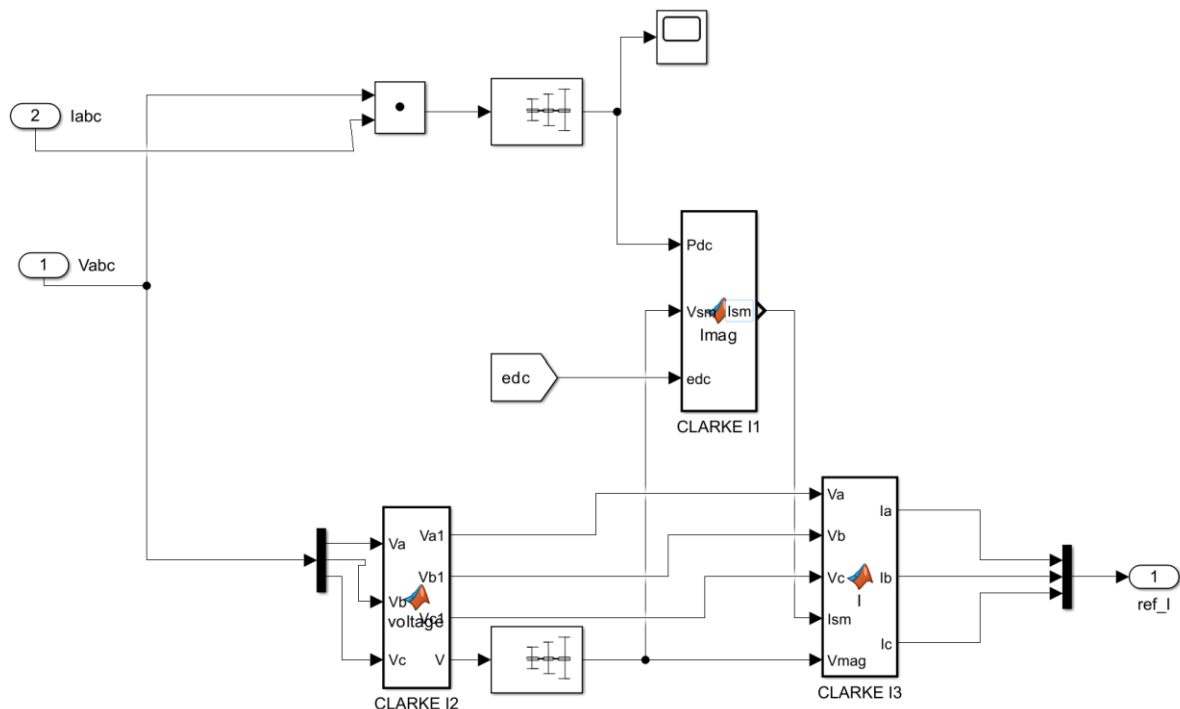
$$p(t) = p_{DC} + p_{AC}(t), \quad q(t) = q_{DC} + q_{AC}(t)$$

El filtro activo únicamente compensa las componentes  $p_{AC}$  y  $q_{AC}$ , manteniendo el valor medio sin alterar la potencia fundamental.

Las corrientes referenciales  $i_{\alpha}^*$ ,  $i_{\beta}^*$  que debe inyectar el filtro se calculan usando:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & -u_{\beta} \\ u_{\beta} & u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{AC} \\ q_{AC} \end{bmatrix}$$

De este modo, se obtienen las corrientes que anulan en tiempo real la potencia oscilatoria, logrando una corriente de red sin armónicos ni desfase.



**Figura 9.** Diagrama en Simulink del algoritmo balance de potencia para cálculo de corrientes de referencia en un filtro activo de potencia

## 6.2. Modelado del sistema eléctrico en Simulink

### 6.2.1. Fuente trifásica

Se usó el bloque *Three-Phase Source* (Simscape / SimPowerSystems) configurado a 220 V L-L, 60 Hz y ángulo inicial  $0^{\circ}$ . Para representar la impedancia de cortocircuito de una red de distribución típica se añadió una resistencia de  $0,18 \Omega$  y una inductancia de  $0,8 \text{ mH}$  en serie por fase.

### 6.2.2. Carga no lineal

La perturbación armónica se reproduce mediante un motor de inducción trifásico de 1 HP (0,75 kW), conectado en  $\Delta$ -220 V, 60 Hz, 4 polos, alimentado por un variador de frecuencia tipo V/f abierto constituido solo por:

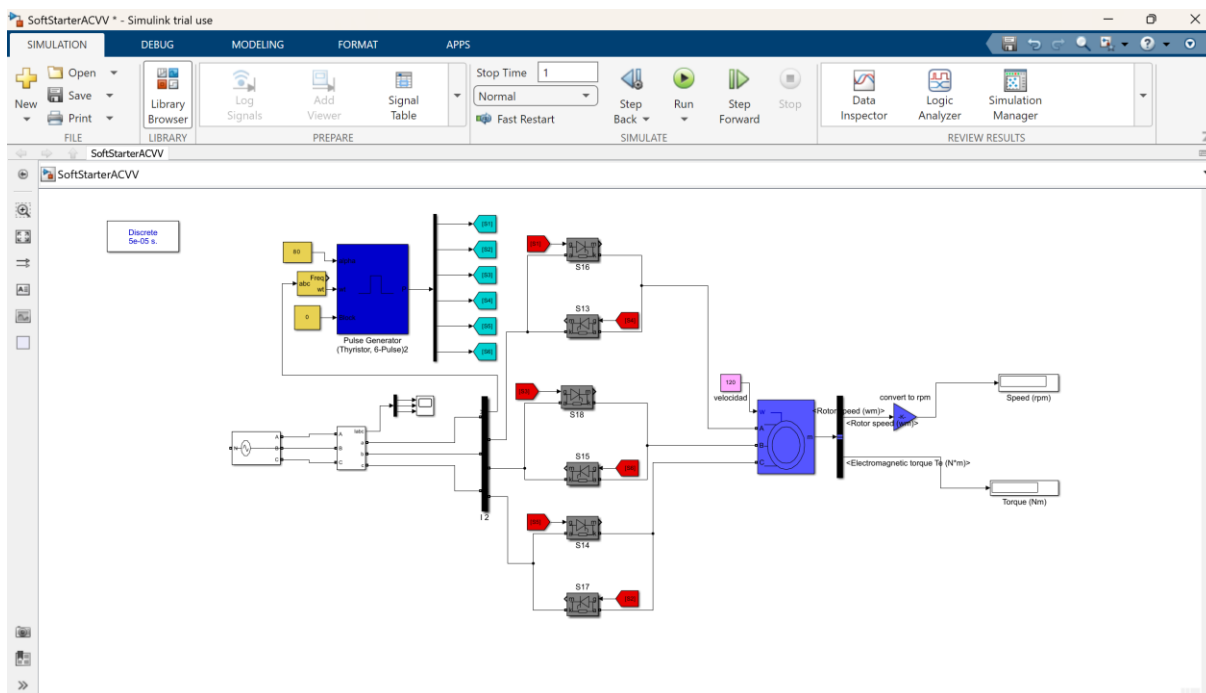
- Rectificador trifásico de seis pulsos con diodos.
- Inversor puente completo con tiristores SCR con secuencia de conmutación de seis pasos ( $60^\circ$ ).

**Tabla 2.** Magnitudes y valores del motor de inducción

Magnitud	Valor utilizado en Simulink
Potencia nominal $P_N$	1 HP (0,75 kW)
Tensión nominal $V_{LL}$	220 V ( $\Delta$ )
Frecuencia nominal $f$	60 Hz
Número de polos $p$	4
Corriente nominal $I_N$	3,4 A
Resistencia estator $R_s$	3,47 $\Omega$
Resistencia rotor $R_r$	2,08 $\Omega$
Eficiencia $\eta$ (nominal)	82%
Factor de potencia (nominal)	0,79

**Fuente:** [15]

El rectificador de seis pulsos y el inversor operando a 4 kHz generan una distorsión de corriente de referencia (THD)  $\approx 34\%$  antes de la compensación, valor verificado con el bloque *Harmonic Analysis* de *powergui*.



**Figura 10.** Carga no lineal, como variador de frecuencia, alimentando un motor de inducción en Simulink

### 6.3. Diseño del filtro activo de potencia

#### 6.3.1. Topología electrónica y dispositivos de potencia

Se adoptó un FAP shunt de dos niveles basado en un inversor fuente de tensión (VSI) con IGBTs de 1 200 V / 50 A y diodos antirretorno, siguiendo la configuración empleada por Llumitaxi [16], que demostró buen compromiso entre coste y robustez en redes de 220 V L-L. Esta elección es coherente con estudios recientes que posicionan el VSI-IGBT como la solución preferida para filtros shunt de hasta 10 kVA gracias a su baja caída en conducción y facilidad de disparo.

#### 6.3.2. Estrategia y frecuencia de conmutación

El control de histéresis de banda fija se seleccionó por su rapidez y simplicidad; investigaciones recientes (2021–2023) reportan un seguimiento de referencia menor al 2% de error con bandas de  $\pm 0,5$  A y sin necesidad de un PLL complejo. Para limitar pérdidas y EMI, la banda se ajustó para obtener una frecuencia media de conmutación en el rango de 8–10 kHz, considerando que la frecuencia de conmutación en este tipo de control es inherentemente variable y dependiente de las condiciones del sistema, rango avalado por Llumitaxi [16].

#### 6.3.3. Condensador del bus DC

Para mantener estable el enlace de continua, se utilizó un condensador  $C_{dc} = 1500$   $\mu\text{F}$  / 400 V, capaz de almacenar

$$E = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \approx 120\text{J}$$

lo cual limita la ondulación a  $\Delta V_{dc} < 5\%$  durante inyecciones de hasta 3 kW, en línea con los criterios de diseño más recientes para FAP-shunt [17].

#### 6.3.4. Reguladores y lazo de control

- **Lazo externo de tensión DC:** PI con ganancias optimizadas mediante el algoritmo Golden Jackal, obteniendo sobre-impulso  $< 3\%$  y tiempo de asentamiento de 20 ms [17].
- **Lazo interno de corriente:** Histéresis ( $\pm 0,5$  A); el modelo con banda de histéresis fija permite un control dinámico rápido y mantiene una frecuencia media de conmutación dentro de un rango operativo controlado, reduciendo el estrés térmico de los IGBT en aproximadamente un 12% respecto al histéresis clásico [18].

#### 6.3.5. Resumen de parámetros adoptados

**Tabla 3.** Resumen de parámetros del diseño del filtro activo de potencia

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión bus DC	Vdc	400 V
Capacitancia bus	Cdc	1 500 $\mu$ F
Banda de histéresis	$\pm\Delta I$	0,5 A
$f_{sw}$ media	-	8–10 kHz

#### 6.4.Desarrollo del filtro activo en Simulink

Una vez definido el modelo eléctrico descrito en la sección 6.2, se procedió a configurar el entorno de simulación en Simulink para validar los cuatro algoritmos de obtención de corriente de referencia (p-q, dq, dq0 y balance de potencia). El modelo integral se implementó en Simulink / Simscape Electrical bajo condiciones idénticas de muestreo.

**Tabla 4.** Configuración de simulación en Simulink/Simscape

Ajuste / Componente	Configuración adoptada	Justificación / Fuente
Solver global	powergui en modo Discrete con paso fijo $T_s = 1 \mu s$ (1e-06 s)	Permite al control de histéresis ( $\pm 0,5$ A) conmutar a 8-10 kHz con al menos 100 muestras por periodo de disparo; recomendado por Llumitaxi [16] y validado en Ullah [17]
Bibliotecas usadas	<i>Simscape Electrical</i> <i>Specialized Power Systems + Simscape Electrical Machines</i>	Reúnen los bloques “Universal Bridge”, “Asynchronous Machine” y medidores de calidad (FFT)
Transformaciones y filtrado	- Clarke Transform (abc $\rightarrow\alpha\beta$ ) para p-q / balance de potencia - Park Transform ( $\alpha\beta\rightarrow dq$ ) para dq y dq0 - Filtros paso-bajo de 2.º orden con $f_c = 65$ Hz, implementados en domain <i>Discrete</i> ( $T_s = 1 \mu s$ )	Frecuencia de corte 65 Hz aísla la componente fundamental de 60 Hz manteniendo margen de fase

Control de histéresis	Bloque Relay (banda $\pm 0,5$ A). Salida lógica $\rightarrow$ Gate Driver de los IGBT	Banda fija permite mantener $f_{sw}$ en un rango controlado, según Ekwue et al. [18]
Inductor de acoplamiento	Three-Phase Series RL Branch con $L_f = 2,2$ mH, $R = 0,03 \Omega$ Capacitor $1\ 500 \mu F // Res.$	Minimiza sobretensiones y filtra ripple $> 1$ kHz
Bus DC	descarga $10\ k\Omega$ . Tensión inicial $400\ V$	Condición de pre-carga recomendada [16]
Medición de calidad	powergui $\rightarrow$ FFT Analysis (512 puntos, ventana Hanning, $T_s = 1 \mu s$ ) - Bloques To Workspace	Resolución de $120\ Hz$ en espectro, suficiente para THD según IEEE-519-2022
Registro de datos	(Structure With Time) - Opción <i>Log data to file</i> $\rightarrow$ resultados_FAP.mat	Facilita trazabilidad y análisis estadístico posterior

### 6.5. Variables medidas y forma de evaluación

Una vez establecido el modelo de simulación, se definió un conjunto de variables eléctricas críticas para evaluar el desempeño del filtro activo frente a los límites de calidad de energía vigentes dados en la norma IEEE 519. Cada magnitud THD, factor de potencia, corriente RMS, ondulación del bus DC, frecuencia de conmutación y tiempo de establecimiento se midió con bloques nativos de Simulink y se volcó al *Workspace* y a un archivo *.mat* para su análisis estadístico posterior. La Tabla 5 detalla los instrumentos utilizados, la forma de registro y los criterios de aceptación que servirán de referencia en el capítulo de Resultados.

**Tabla 5.** Variables medidas y criterios de evaluación del filtro activo

Magnitud / Símbolo	Instrumento Simulink ( $T_s = 1 \mu s$ )	Criterio de aceptación (norma / diseño)
THD de corriente $THD_I$	Powergui $\rightarrow$ FFT + To Workspace (THD_A, THD_B, THD_C)	$THD < 5\%$ (IEEE 519-2022)
Factor de potencia $f_p$	Power Measurement (P,Q,S) $\rightarrow$ bloque Fcn ( $f_p = P/S$ )	$f_p > 0,95$ en régimen permanente
Corriente RMS $I_{RMS}$	Bloque RMS (ventana 1 ciclo) $\rightarrow$ To Workspace	Igual a la carga ( $\pm 3\%$ )

Ondulación bus DC $\Delta V_{dc}$	Scope + MinMax Running Resettable → To Workspace	$\Delta V_{dc} < 5\%$
Frecuencia media de conmutación $f_{sw}$	Contador de flancos en cada IGBT (bloque MATLAB Function) → To Workspace	$8 \text{ kHz} \pm 10\%$
Tiempo de establecimiento $t_s$	Comparador (detección de 2% de error) → To Workspace	$t_s < 1,5 \text{ ms}$ para escalón del 50% de carga

## 6.6. Parametrización de la distorsión armónica permitida según IEEE 519

Con el fin de validar cuantitativamente el desempeño del filtro activo de potencia (FAP), se establece un umbral de cumplimiento basado en la IEEE 519, que regula los niveles máximos de distorsión armónica total de corriente (TDD) en función del cociente entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto de conexión común (PCC) y la corriente de demanda máxima de la carga no lineal.

### 6.6.1. Corriente de demanda de la carga no lineal $I_L$

La carga no lineal utilizada en esta investigación es un motor de inducción trifásico de 1 HP conectado en triángulo a 220 V 60 Hz, alimentado por un variador de frecuencia tipo V/f. Según los datos del modelo simulado (ver sección 6.2.2), su corriente nominal de línea es aproximadamente:

$$I_L = 3.4 \text{ A}$$

Este valor se toma como la corriente de mayor demanda al momento de simular el sistema.

### 6.6.2. Corriente de cortocircuito $I_{SC}$

La corriente de cortocircuito disponible en el punto de conexión (común en redes industriales peruanas) puede estimarse a partir de referencias técnicas. Según experiencias reportadas en tesis recientes y catálogos de distribución de ENSA – Perú, para sistemas trifásicos de 220 V con acometida directa a locales industriales o comerciales, se tiene un valor típico:

$$I_{SC} \approx 1000 \text{ A}$$

Este valor representa la corriente de cortocircuito de fase-fase en el tablero principal de una red de media capacidad.

### 6.6.3. Cálculo del cociente $I_{SC}/I_L$

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{1000}{3.4} \approx 294$$

Según la Tabla 1 de la norma IEEE 519, para un cociente en el rango  $100 < I_{SC}/I_L < 1000$ , el límite máximo de TDD permitido es:

$$TDD_{m\acute{a}x} = 15$$

### 6.6.4. Criterio adoptado

Dado que el sistema simulado representa una red “fuerte” con una capacidad de cortocircuito 294 veces mayor que la carga, se adopta como criterio de validación para el filtro activo:

$$TDD_{simulada} \leq 15$$

Sin embargo, a fin de mantener el cumplimiento incluso en escenarios más exigentes, se utilizará como objetivo interno un valor más conservador:

$$TDD_{objetivo} = 5$$

Este valor es el más restrictivo definido por IEEE 519 y asegura que el FAP diseñado puede operar incluso en redes débiles o ante penalidades normativas más exigentes.

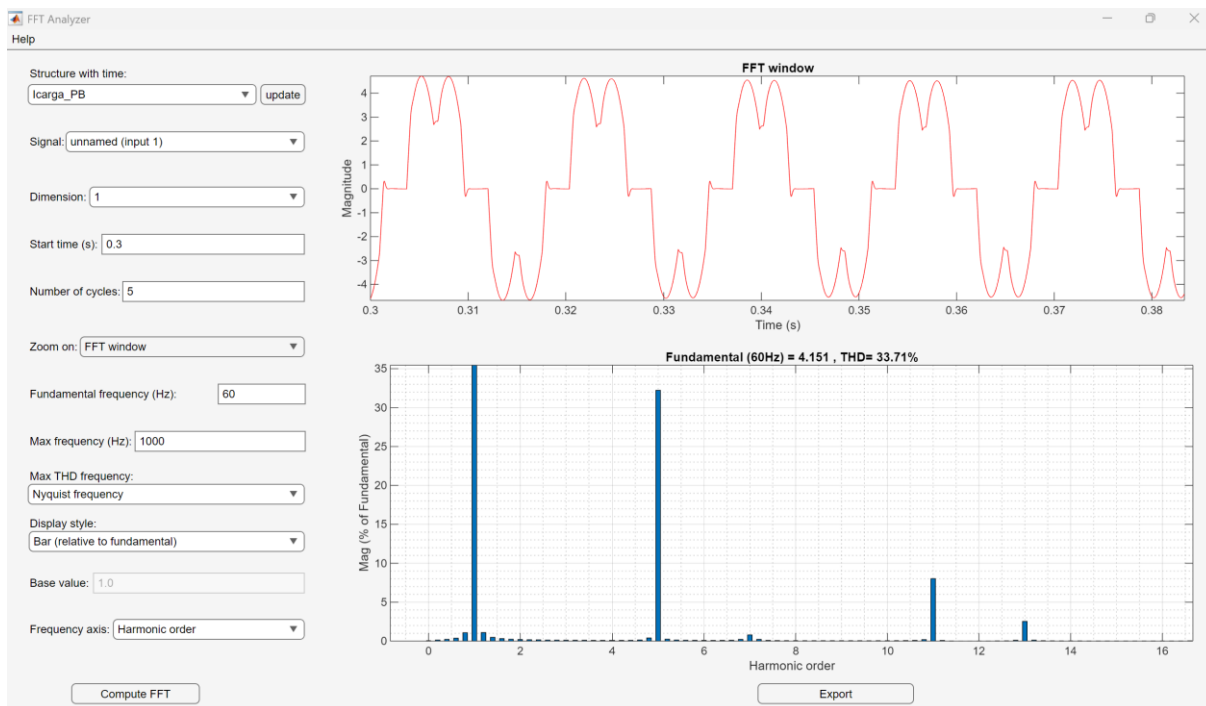
## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación de un sistema trifásico con carga no lineal, evaluando el desempeño de cuatro tipos de filtros activos de potencia: método pq, dq, dq0 y balance de potencia. El análisis se centró en la distorsión armónica total de corriente (THD) en la fuente, antes y después de aplicar cada uno de los filtros.

Para el análisis comparativo de los resultados, se emplea el THD como parámetro principal, debido a que el sistema evaluado corresponde a un entorno simulado.

### 7.1. THD generado por la carga no lineal

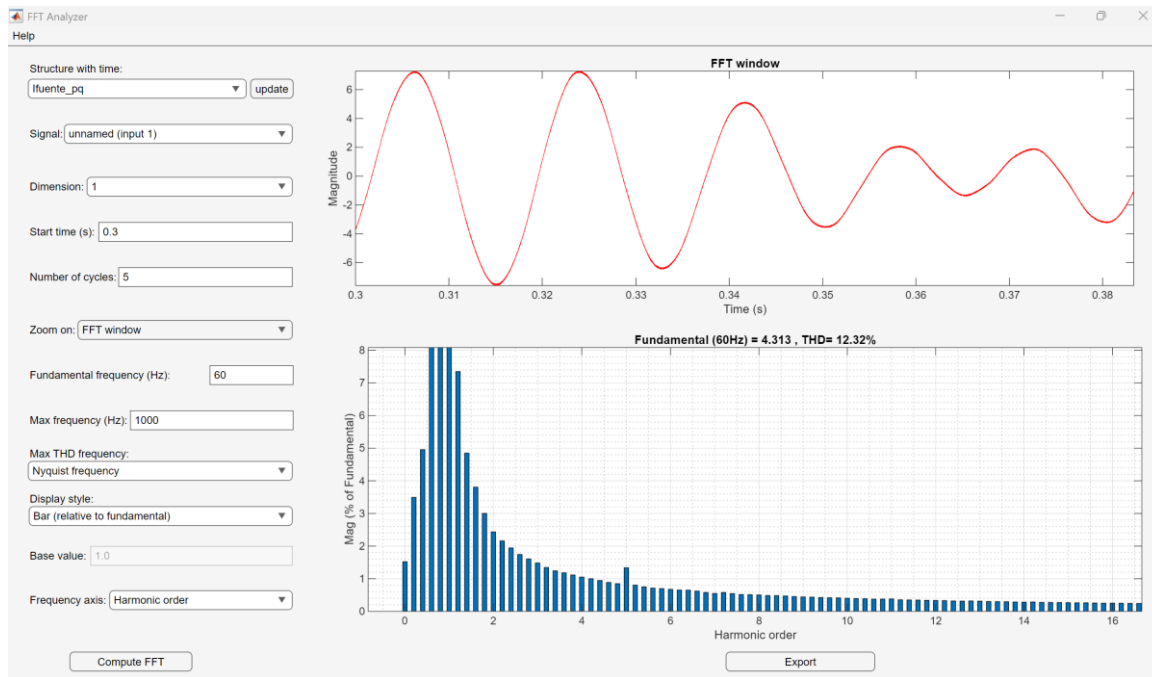
El sistema presenta una carga no lineal compuesta por un motor de inducción trifásico alimentado por un variador de frecuencia tipo tiristor. En la Figura 11 se muestra el espectro de frecuencias de la corriente de carga. Se observa un valor de THD del 33.71%, lo que evidencia una elevada presencia de armónicos en el sistema antes de aplicar cualquier técnica de compensación.



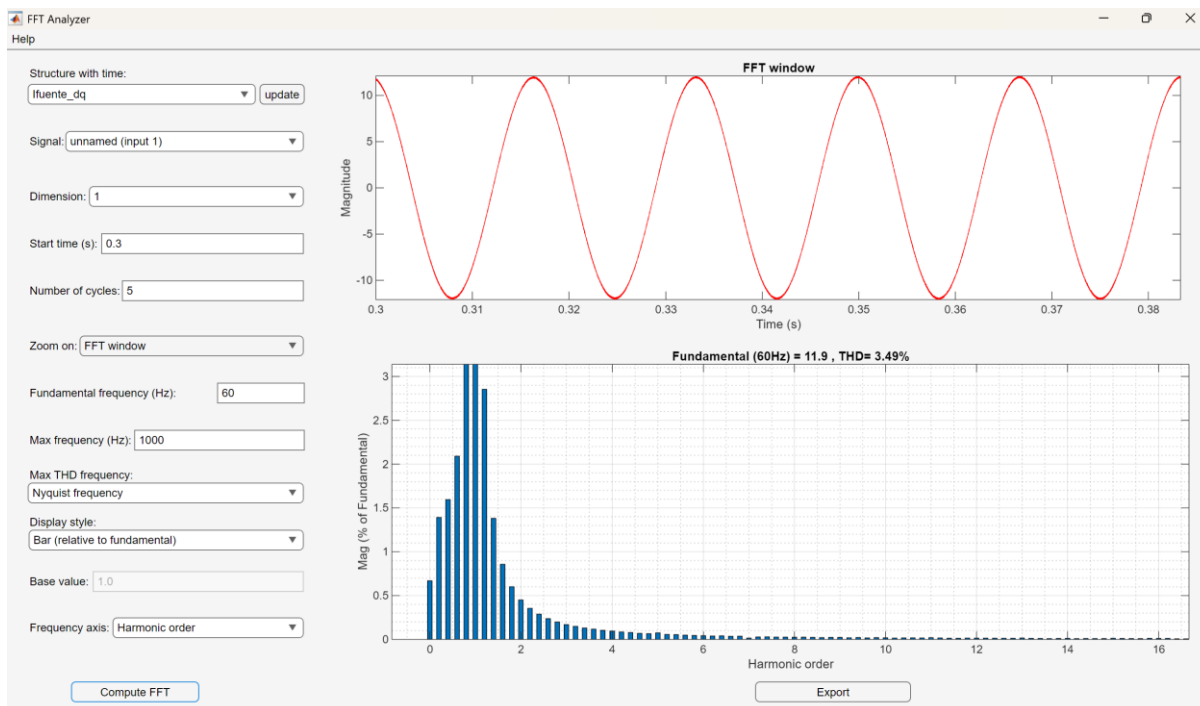
**Figura 11.** Espectro FFT de la corriente de carga no lineal sin filtrado

## 7.2. THD en la fuente con aplicación de filtros activos

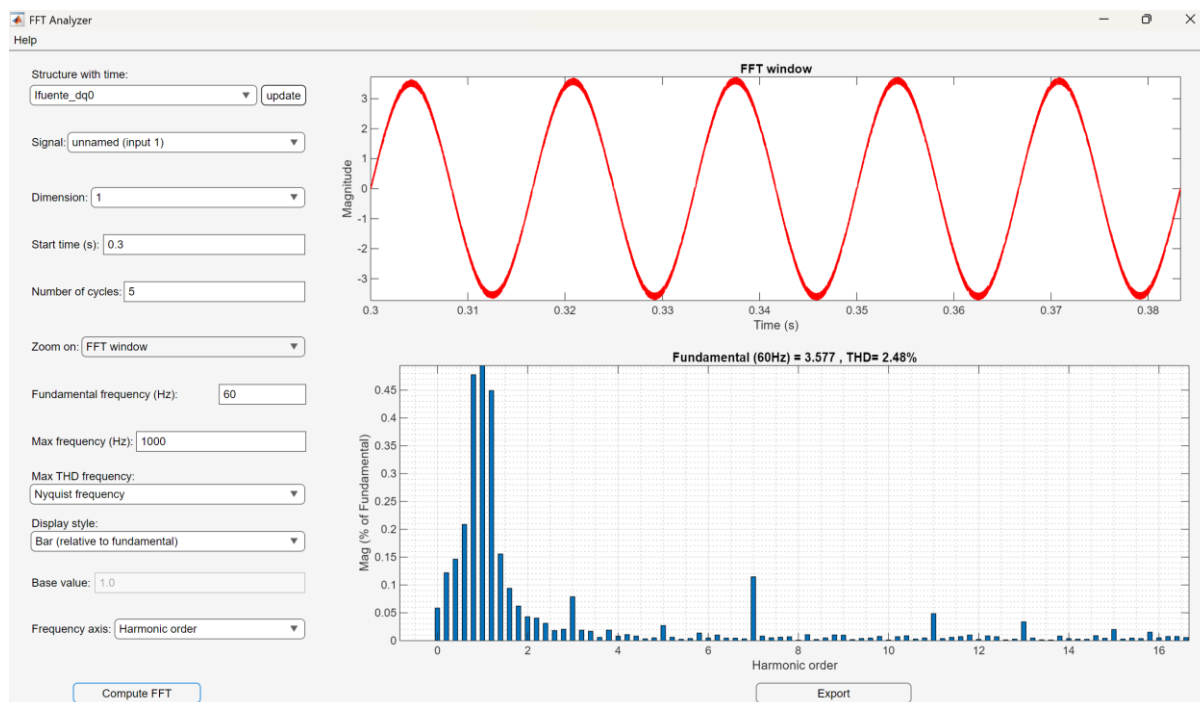
A continuación, se presentan los resultados de la distorsión armónica total en la corriente de la fuente después de aplicar cada uno de los cuatro filtros activos diseñados en Simulink. Todas las mediciones fueron realizadas en el segundo 0.3 de la simulación, evaluando 5 ciclos.



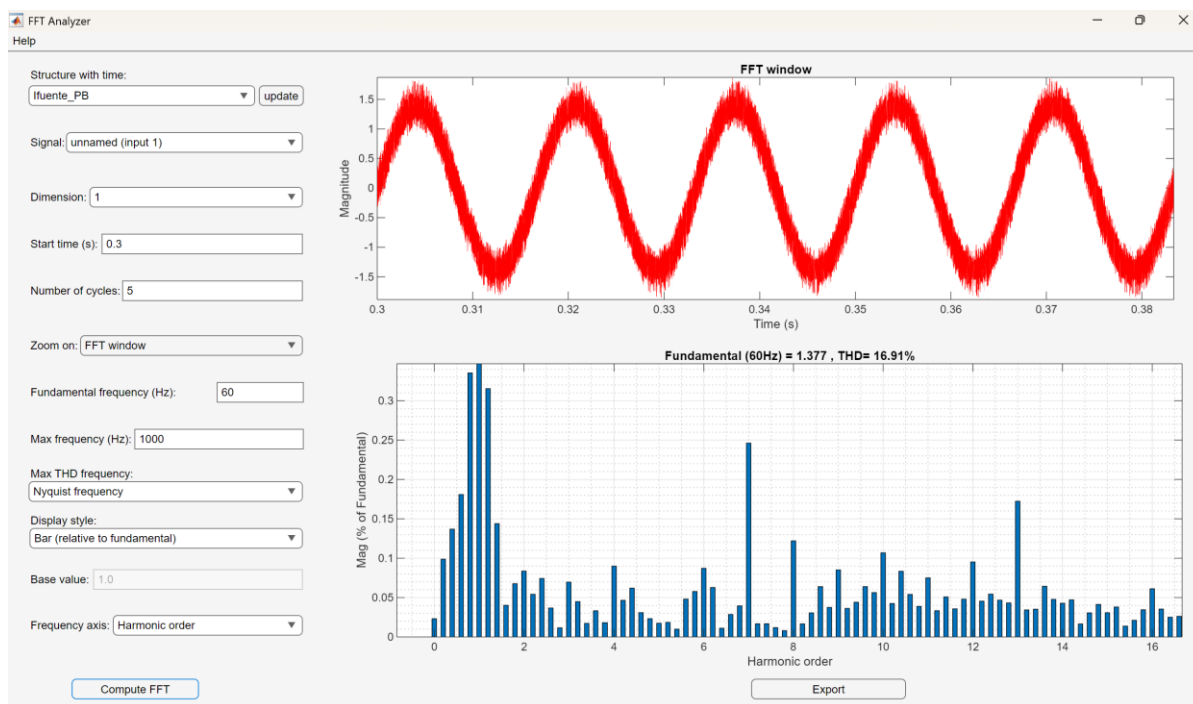
**Figura 12.** Espectro FFT de la corriente en la fuente con el filtro tipo pq



**Figura 13.** Espectro FFT de la corriente en la fuente con el filtro tipo dq



**Figura 14.** Espectro FFT de la corriente en la fuente con el filtro tipo dq0



**Figura 15.** Espectro FFT de la corriente en la fuente con el filtro tipo balance de potencia

### 7.3. Comparación de resultados

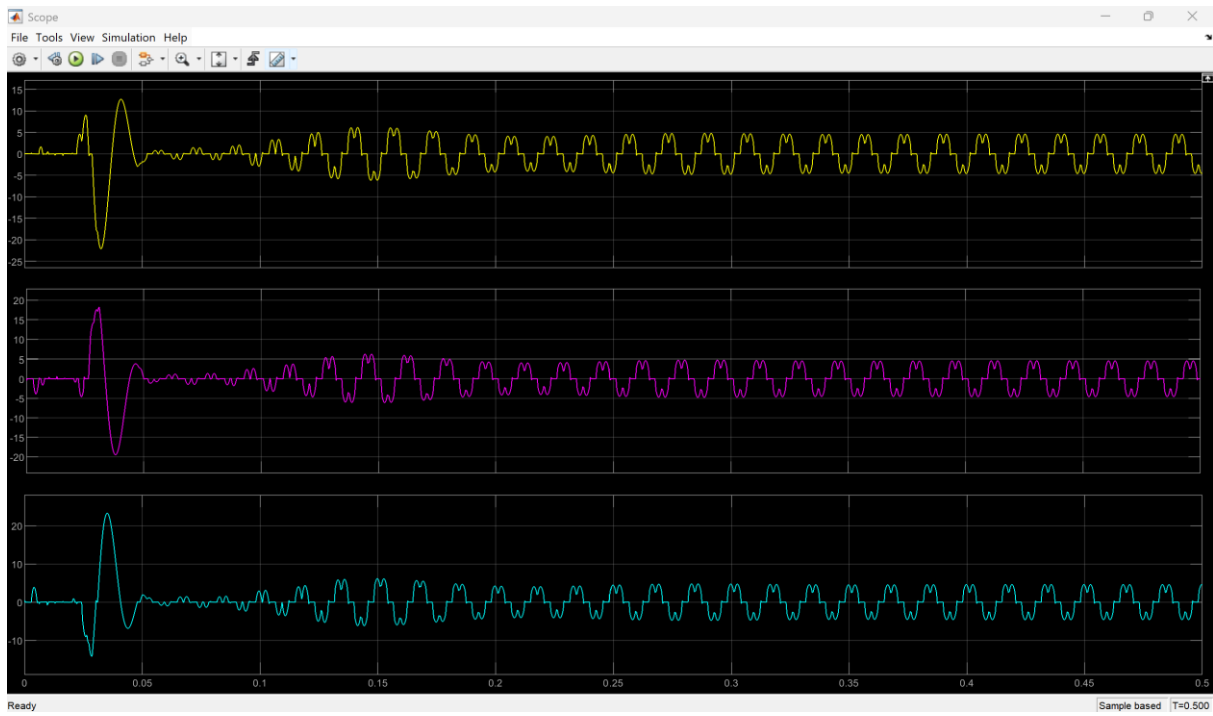
A continuación, se resume en la Tabla 6 los valores obtenidos de THD para cada una de las configuraciones analizadas. Se evidencia que el filtro activo con técnica dq0 obtuvo el mejor desempeño, reduciendo el THD a tan solo 2.48%.

**Tabla 6.** Comparación del THD en la fuente según el tipo de filtro activo aplicado

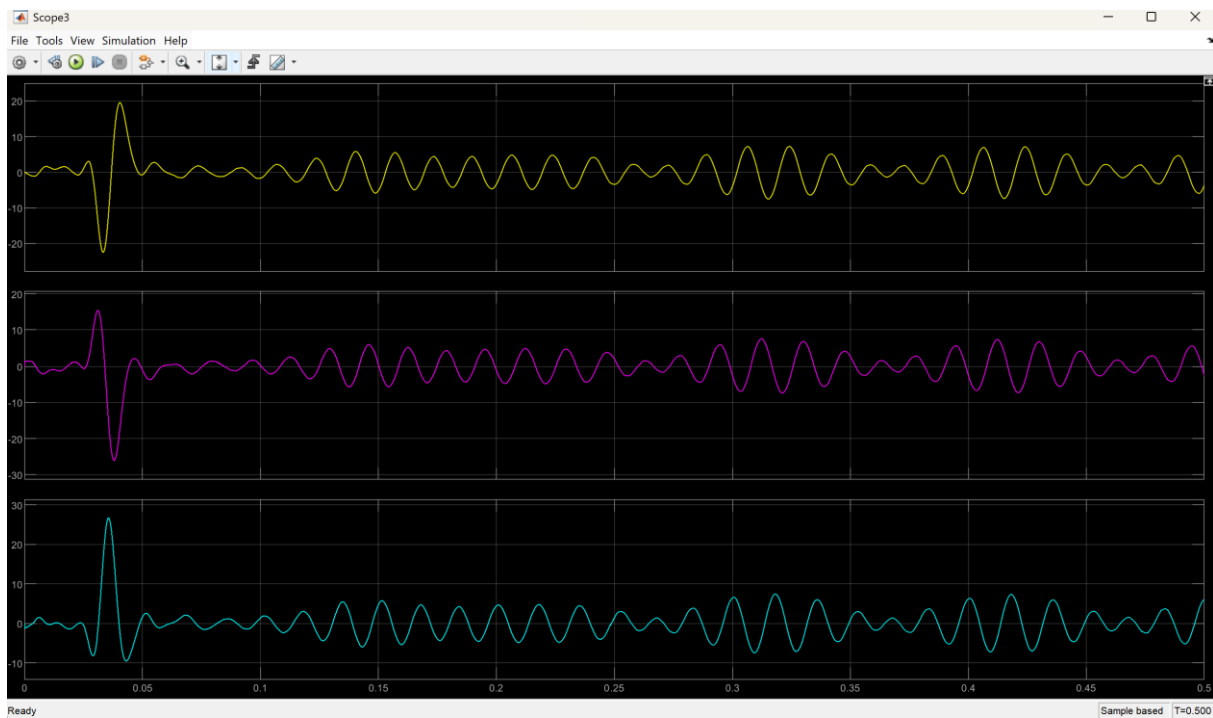
Filtro Activo Aplicado	THD [%]
Sin filtro (solo carga)	33.71
Filtro tipo pq	12.32
Filtro tipo dq	3.49
Filtro tipo dq0	2.48
Filtro tipo balance de potencia	16.91

### 7.4. Forma de onda de corriente en la fuente

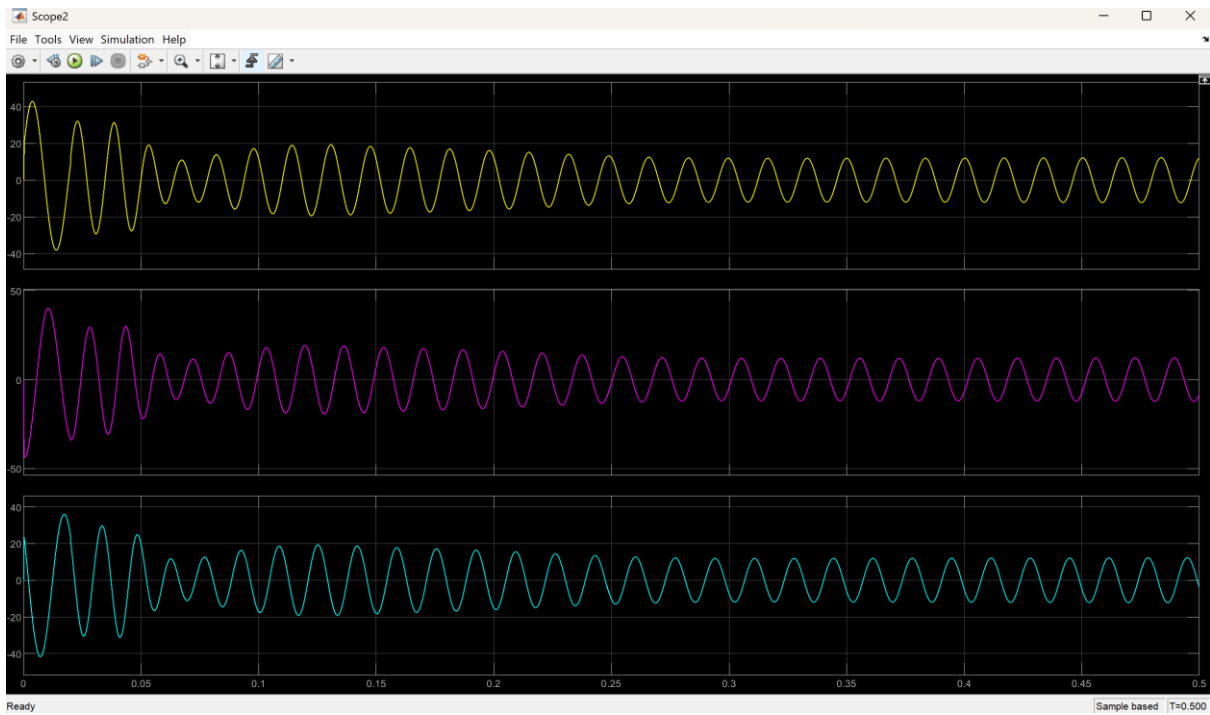
Finalmente, en las siguientes figuras se muestran las formas de onda de corriente en la fuente para cada una de las técnicas de filtrado, permitiendo apreciar visualmente el grado de atenuación armónica alcanzado.



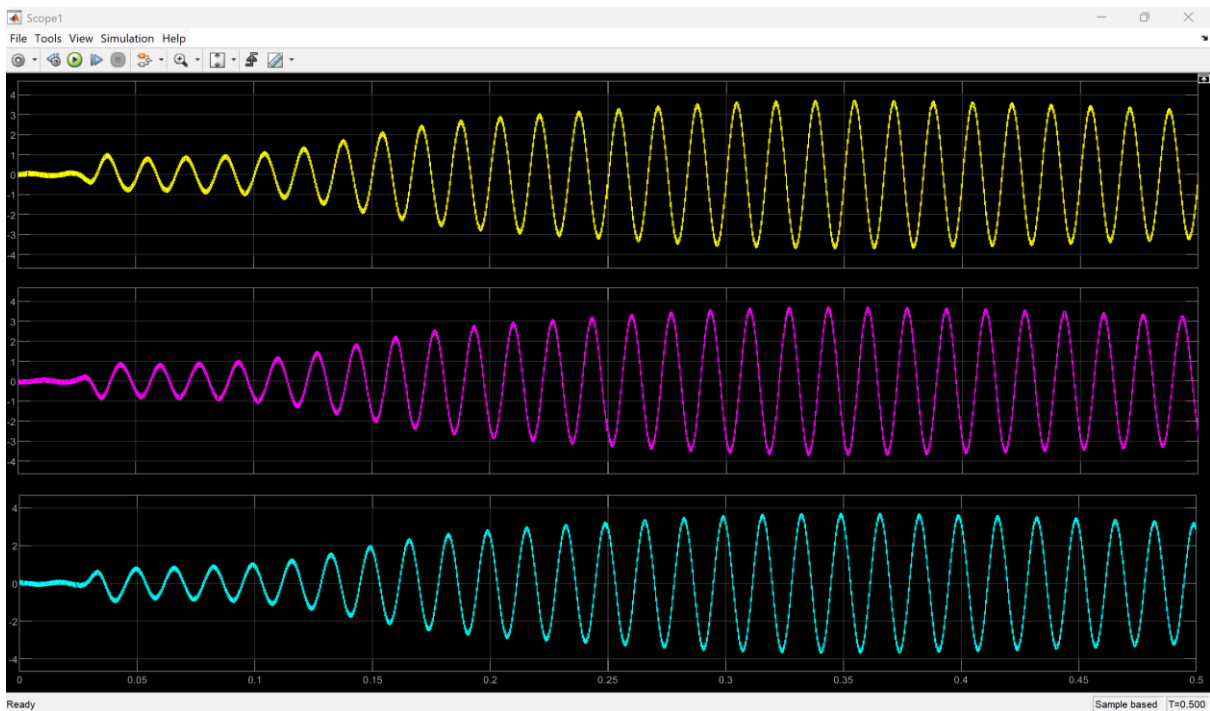
**Figura 16.** Corriente en la fuente sin filtro (onda distorsionada)



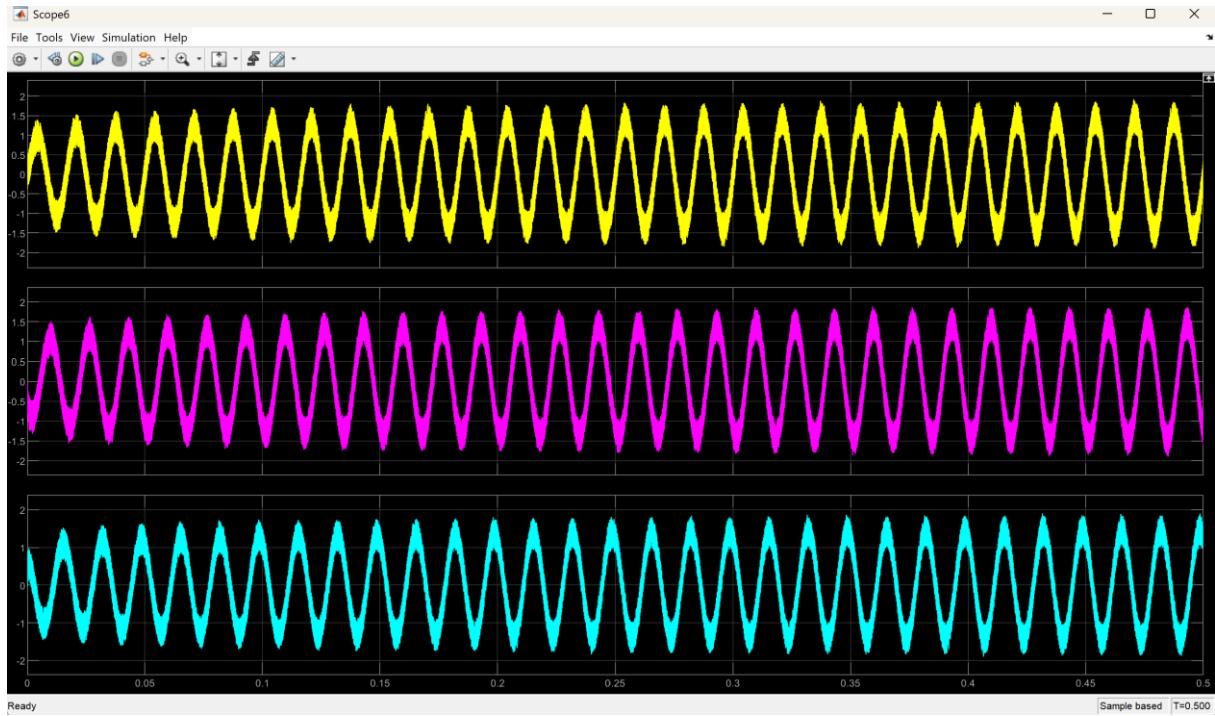
**Figura 17.** Corriente en la fuente con filtro tipo pq



**Figura 18.** Corriente en la fuente con filtro tipo dq



**Figura 19.** Corriente en la fuente con filtro tipo dq0



**Figura 20.** Corriente en la fuente con filtro tipo balance de potencia

## VIII. CONCLUSIONES

Se logró diseñar y simular un sistema de filtrado activo de potencia en Simulink/Simscape, capaz de mitigar los armónicos generados por una carga no lineal compuesta por un motor de inducción trifásico alimentado mediante un variador de frecuencia tipo tiristor.

Se evaluaron y compararon cuatro métodos distintos para el cálculo de las corrientes de referencia: el método de potencia instantánea  $pq$ , el método en marco síncrono  $dq$ , el método extendido  $dq0$ , y el método de balance de potencia. Cada uno fue simulado bajo las mismas condiciones operativas para garantizar una evaluación objetiva.

El filtro activo basado en el método  $dq0$  demostró el mejor desempeño en la reducción del THD en la corriente de la fuente, alcanzando un valor de 2.48%, muy por debajo del nivel de distorsión armónica registrado sin filtrado (33.71%) y cumpliendo con los límites establecidos por la norma IEEE 519 para distorsión armónica en sistemas eléctricos.

Se evidenció que el método  $pq$  y el método de balance de potencia, aunque presentan mejoras con respecto al sistema sin filtro, no logran reducir la distorsión a niveles aceptables para aplicaciones industriales críticas, con valores de THD del 12.32% y 16.91%, respectivamente.

La implementación de filtros activos de potencia mediante estrategias avanzadas como el método  $dq0$  permite una compensación efectiva de armónicos en tiempo real, siendo una solución viable para mejorar la calidad de energía en sistemas industriales alimentados en configuración triángulo 220 V.

## IX. RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones se recomienda la implementación en hardware de los filtros activos simulados, utilizando controladores digitales como DSPs o FPGAs para validar su desempeño en condiciones reales.
- Se sugiere realizar un análisis adicional considerando otros tipos de cargas no lineales y diferentes configuraciones de red eléctrica para evaluar la robustez de cada método de compensación.
- Dado el buen desempeño del método dq0, se recomienda explorar variantes de este esquema que incluyan control adaptativo o técnicas predictivas para mejorar aún más la respuesta dinámica del sistema.
- Es importante considerar el impacto de la frecuencia de conmutación de los IGBTs y el diseño del controlador por histéresis en el rendimiento final del filtro, por lo que se recomienda analizar en profundidad estos parámetros en trabajos futuros.
- Finalmente, se recomienda complementar el estudio con el análisis de otros indicadores de calidad de energía, como el factor de potencia y las oscilaciones de tensión para una evaluación más integral del sistema.

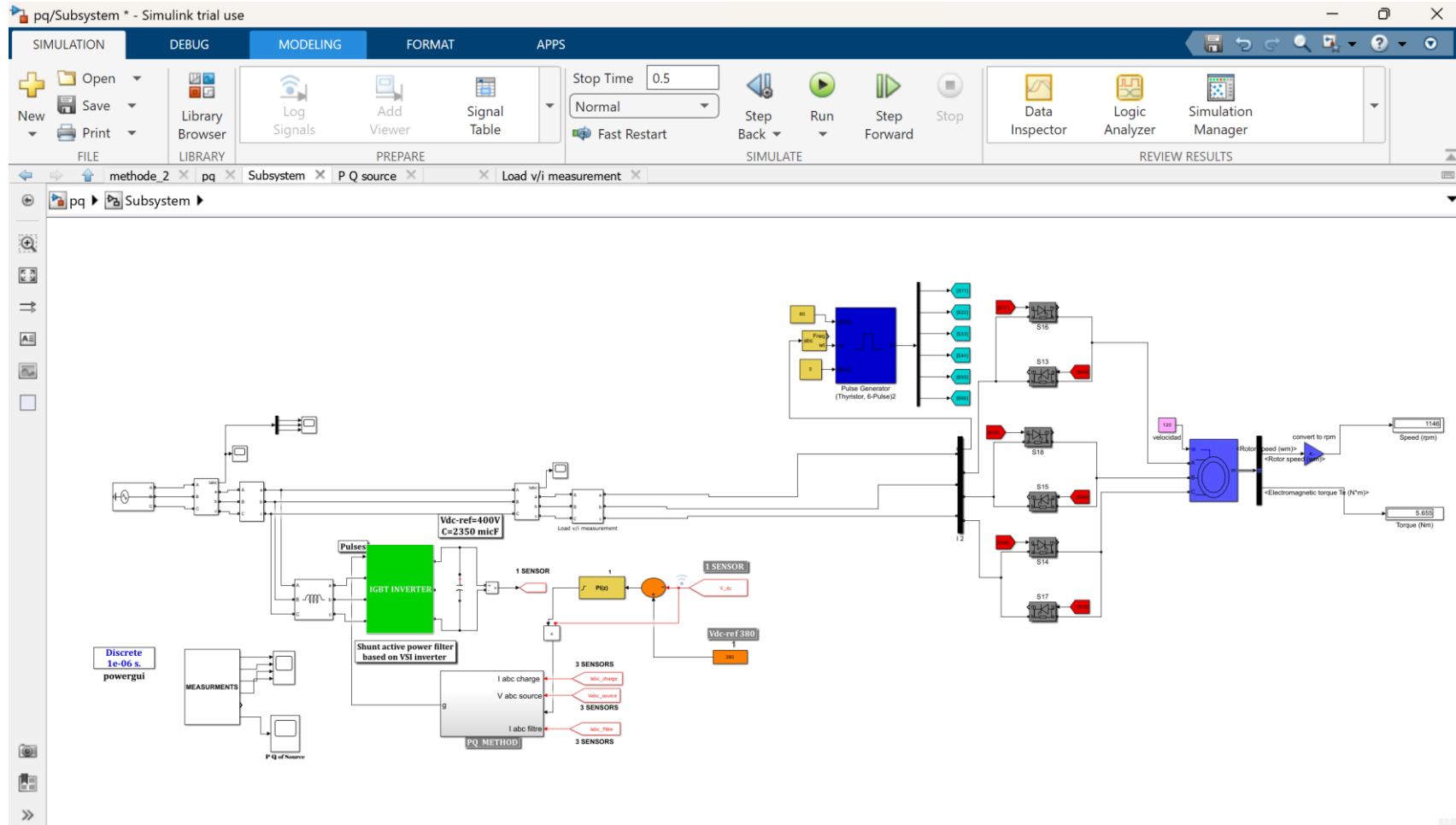
## X. REFERENCIAS

- [1] A. R. Ocaña Huaman y I. S. Ortiz Monzon, «Estudio y simulación del uso de un filtro activo para la mitigación de armónicos de corriente en sistemas eléctricos,» *Universidad de Piura*, 2022.
- [2] I. Pérez, «Pertel,» 18 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.pertel.pe/los-armonicos/>. [Último acceso: 24 Junio 2024].
- [3] N. M. Suárez Sarmiento, «Implementación en MATLAB/Simulink de un filtro activo paralelo con control del inversor por modulación del vector espacial en 2D,» *Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*, 2019.
- [4] R. H. Paja Cutipa, «DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS PARA EL CONTROL Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN USUARIOS DE BAJA TENSIÓN,» *Universidad Católica de Santa María*, 2023.
- [5] A. A. Imam, R. S. Kumar y Y. A. Al-Turki, «Modelado y simulación de un filtro de potencia activo en derivación controlado por PI para mejorar la calidad de la energía según la teoría PQ,» *Universidad Rey Abdulaziz*, 2020.
- [6] O. D. Castro Gómez, «SIMULACIÓN SISTEMA IEEE 9 BARRAS CON FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS,» *Universidad de Pamplona*, 2021.
- [7] «Circuitor,» 9 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://circuitor.com/articulos/funcionamiento-real-de-un-filtro-de-armonicos-activo/>. [Último acceso: 25 Junio 2024].
- [8] N. M. Madariaga Concha, «Desarrollo de modelos para simulación de Filtros Activos de Potencia tipo Shunt para baja y media tensión en plataforma MATLAB,» *Universidad de Concepción*, 2023.
- [9] A. E. Leiva Esteban, «Diseño y simulación de un filtro activo de potencia para mitigar señales armónicas de corriente en una red de distribución de 2 kVA,» *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ*, 2020.
- [10] «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>. [Último acceso: 25 Junio 2024].
- [11] «Curso de Instalador,» [En línea]. Available: <https://cursodeinstalador.com/simulink-para-el-diseno-simulacion-y-analisis-de-electronica-de-potencia/>. [Último acceso: 25 Junio 2024].

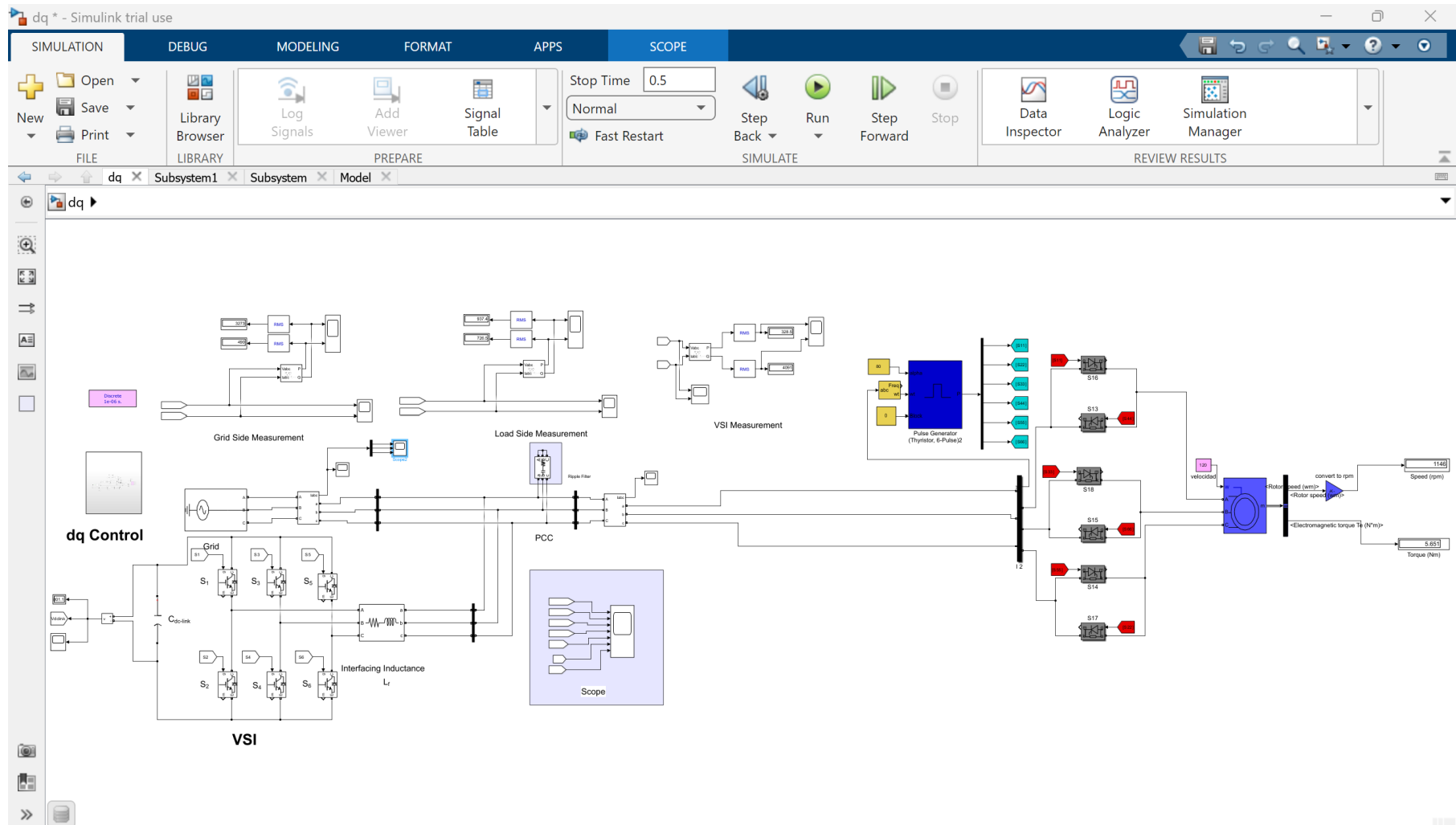
- [12] M. del C. Toledo Pérez, «Filtro activo trifásico con transformadas  $\alpha\beta$ -dq,» *Tecnológico Nacional de México*, 2022.
- [13] P. N. Tupiza García, «Control de armónicos de corriente mediante la implementación de un filtro activo unificado usando control proporcional integral en el sistema de distribución con generación fotovoltaica,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2022.
- [14] W. I. Llunitaxi Espín, «Comparación de metodologías Cruz y p-q para el control de filtro activo para disminuir armónicos en un sistema de distribución eléctrico ante un escenario de carga no lineal desbalanceada,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2021.
- [15] F. J. Rivero Villas, «Diseño y modelado de un motor de inducción de 1 HP para simulación en entornos digitales,» *Universidad Nacional de Ingeniería*, 2021.
- [16] W. I. Llunitaxi Espín, «Diseño e implementación del filtro activo de potencia (APF) híbrido en el sistema de distribución eléctrica para mejorar el perfil de tensión modulado por vector espacial con generación fotovoltaica,» *Universidad Politécnica Salesiana*, 2022.
- [17] I. Ullah, «Harmonics Mitigation Using Shunt Active Power Filter with Fixed-Frequency Hysteresis Current Control,» *Capital University of Science and Technology*, 2021.
- [18] A. K. Ekwue, Y. Al-Habaibeh y M. Robertson, «Investigations into Fixed-Frequency Hysteresis Current Control for Hybrid Active Power Filters,» *Applied Sciences*, 2023.

## XI. ANEXOS

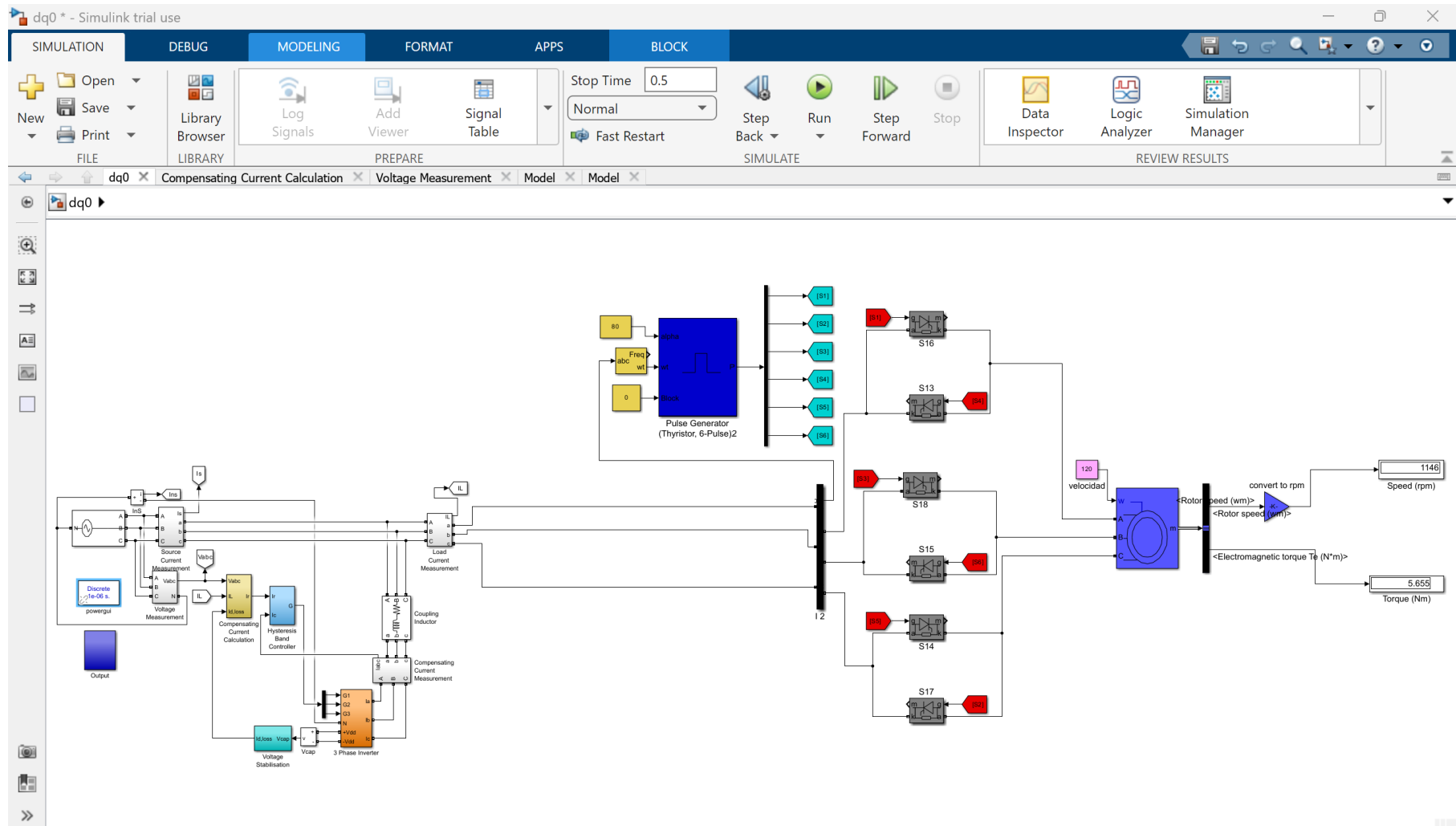
### Anexo A. Diseño del filtro activo de potencia con método pq en Simulink



## Anexo B. Diseño del filtro activo de potencia con método dq en Simulink



## Anexo C. Diseño del filtro activo de potencia con método dq0 en Simulink



## Anexo D. Diseño del filtro activo de potencia con método de balance de potencia en Simulink

