

**COMPENSACIÓN DINÁMICA DE ARMÓNICOS EN RED DE DISTRIBUCIÓN  
ELÉCTRICA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE MONOFÁSICA**





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

**COMPENSACIÓN DINÁMICA DE ARMÓNICOS EN RED DE DISTRIBUCIÓN  
ELÉCTRICA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE MONOFÁSICA**

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

AUTOR: JAIRO STALIN VALLE JARAMILLO  
TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

Quito -Ecuador  
2022

Jairo Stalin Valle Jaramillo

**COMPENSACIÓN DINÁMICA DE ARMÓNICOS EN RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE MONOFÁSICA.**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Jairo Stalin Valle Jaramillo** (Y'1997). Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa “San Luis Gonzaga”, con título de bachiller en ciencias generales. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana ha participado en una investigación sobre redes inalámbricas. Su trabajo se basa en la compensación dinámica de armónicos en la red de distribución eléctrica mediante filtro activo de corriente monofásica.

[jvallej@est.ups.edu.ec](mailto:jvallej@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Manuel Dario Jaramillo Monge** (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

[mjaramillo@ups.edu.ec](mailto:mjaramillo@ups.edu.ec)

**Todos los derechos reservados:**

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

Yo, Jairo Stalin Valle Jaramillo con documento de identificación N° 1725429300 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 09 de mayo del año 2022

Atentamente,



-----  
Jairo Stalin Valle Jaramillo

1725429300

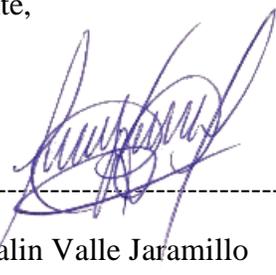
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jairo Stalin Valle Jaramillo con documento de identificación No. 1725429300, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Compensación dinámica de armónicos en red de distribución eléctrica mediante filtro activo de corriente monofásica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 09 de mayo del año 2022

Atentamente,



---

Jairo Stalin Valle Jaramillo

1725429300

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación N° 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **COMPENSACIÓN DINÁMICA DE ARMÓNICOS EN RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE MONOFÁSICA**, realizado por Jairo Stalin Valle Jaramillo con documento de identificación N° 1725429300, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 09 de mayo del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc  
1714298005

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Gustavo y Zuly por enseñarme lo valioso de la vida, el esfuerzo y sacrificio que es necesario para cumplir lo propuesto, por todas las horas de trabajo y desvelo que dedicaron para sacar a su familia adelante.

A mis hermanos, Cris y Andrés por cada consejo, porque cada triunfo es una alegría más que juntos compartimos. A mis cuñados y sobrinos que logran hacer de la vida un viaje más placentero.

A mi familia, Carolina y Ezequiel, quienes son y serán el pilar fundamental de todo mi esfuerzo, juntos alcanzaremos objetivos y cumpliremos sueños. Nunca duden del amor tan grande que nos tenemos.

A todos mis amigos dentro y fuera de la universidad quienes con paciencia me escuchaban sobre cada problema, ya sea académico o personal, por cada consejo que me entregaron para poder seguir adelante.

Al Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, por todo el tiempo dedicado a que este artículo culmine de manera exitosa, por entregar su conocimiento y paciencia que en cada reunión era necesaria, muchas gracias.

*“El esfuerzo de alguna manera es un sacrificio, y la dedicación una norma, y si con ellos se consigue crecer como persona, alcanzando nuevos objetivos que faciliten y hagan la vida más agradable, se los debe incorporar al comportamiento cotidiano. El triunfo de una persona surge de los errores cometidos; el lema debe ser: no claudicar y hacer posible lo difícil.*

*La razón principal de los actos y de la vida misma de un ser humano son su familia íntima, con ellos se comparte triunfos y derrotas, y ellos soportan, inclusive, comportamientos absurdos propios de la naturaleza humana” (Gustavo Valle, 1951-∞).*

## ÍNDICE GENERAL

Resumen .....	1
Abstract .....	1
1    Introducción .....	2
2    Marco teórico .....	3
2.1  Distribución Eléctrica.....	3
2.1.1 Subestación principal de potencia .....	3
2.1.2 Redes de distribución primarias .....	3
2.1.3 Redes de distribución secundarias.....	3
2.1.4 Redes de distribución para cargas residenciales.....	3
2.2  Armónicos .....	4
2.2.1 Origen de armónicos .....	4
2.2.2 Fuentes de armónicos .....	4
2.2.3 Distorsión armónica individual .....	4
2.2.4 Distorsión armónica total .....	5
2.2.5 Efectos de los armónicos en el SEP .....	5
2.3  Convertidores .....	5
2.3.1 Factor de potencial lineal .....	5
2.3.2 Factor de potencia No lineal.....	6
2.4  Mitigación de armónicos.....	6
2.4.1 Filtro pasivo.....	6
2.4.2 Filtro activo .....	6
2.4.3 Filtro activo de corriente .....	7
2.4.4 Filtro activo de potencia.....	7
2.5  Métodos de control para filtros activos .....	7
2.5.1 Modulación PWM .....	7
2.5.2 Control por histéresis .....	7
2.5.3 Modulación del vector espacial.....	8
2.5.4 Método de control basado en la frecuencia.....	8
2.5.5 Método de control basado en el tiempo.....	8
2.5.6 Lazo de control de corriente.....	8
2.5.7 Lazo de control de voltaje .....	8
3    Planteamiento del Problema.....	8
3.1  Formulación del problema .....	8

3.2	Sistema de Prueba .....	9
3.2.1	Modelo red de distribución IEEE de 33 barras .....	9
3.2.2	Modelo filtro activo de corriente.....	10
3.2.3	IGBT con pulso dinámico en tiempo real .....	10
3.3	Casos de Estudio .....	10
4	Análisis de resultados.....	11
4.1.1	Resultados del FAC de compensación estática .....	11
4.1.2	Resultados del FAC de compensación dinámica conectado a una barra .....	12
4.1.3	Resultados del FAC de compensación dinámica conectados a 3 barras .....	14
4.1.4	Resultados del FAC de compensación dinámica con perturbaciones .....	14
5	Conclusiones .....	16
5.1	Trabajos futuros.....	16
6	Referencias .....	16

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red clásica de distribución eléctrica.....	3
Figura 2. Presencia de armónicos en una red trifásica. ....	4
Figura 3. Triángulo de potencias.....	5
Figura 4. Triángulo de potencias con distorsión armónica. ....	6
Figura 5. Sistema de distribución IEEE de 33 barras.....	9
Figura 6. Esquema filtro activo de corriente conectado de manera monofásico. ....	10
Figura 7. IGBT con entrada para señal de pulso en cada fase. ....	10
Figura 8. Ejemplo de forma de onda en la señal de pulso.....	10
Figura 9. Valor de THD antes de conectar el filtro.....	11
Figura 10. Valor compensado de THD en barra 8. ....	12
Figura 11. Forma onda compensación dinámica por perturbaciones.....	13
Figura 12. Ejemplo de error menor que entrega un periodo de 76.86%. ....	13
Figura 13. Ejemplo de error mayor que entrega un periodo de 6.13%. ....	13
Figura 14. THD de corriente previo a la compensación dinámica.....	13
Figura 15. THD de corriente posterior a la compensación dinámica.....	13
Figura 16. Variación THD por cada barra. ....	14
Figura 17. Ejemplo ingreso de perturbaciones en 0.5 [s] y 0.75 [s]. ....	15
Figura 18. Atenuación de perturbaciones en barra 2 con tiempo 0.5 [s] y 0.75 [s]. ....	15
Figura 19. Atenuación de perturbaciones en barra 5 con tiempo 0.3 [s] y 0.6 [s]. ....	15
Figura 20. Atenuación de perturbaciones en barra 8 con tiempo 0.2 [s] y 0.4 [s]. ....	15

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cargas en cada barra del sistema de 33 barras IEEE. ....	9
Tabla 2. Valores con $Q_c=0.15$ MVar y $Q_n=0.15$ MVar en cada filtro. ....	11
Tabla 3. Valores con variaciones de $Q_c$ y $Q_n$ del filtro conectado en cada barra. ....	11
Tabla 4. Valores con $Q_c=1.5$ MVar y $Q_n=1.5$ MVar en cada filtro. ....	12
Tabla 5. Valores con variaciones de $Q_c$ y $Q_n$ del filtro conectado en cada barra. ....	12
Tabla 6. Valores porcentuales entregados por fase de la barra 8. ....	13
Tabla 7. Variación de THD posterior a la conexión del filtro dinámico en cada barra. ..	14
Tabla 8. Datos de las cargas conectadas en paralelo.....	14

# COMPENSACIÓN DINÁMICA DE ARMÓNICOS EN RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE CORRIENTE MONOFÁSICA

## Resumen

Los avances tecnológicos en cuanto a equipos electrónicos han tenido un incremento significativo en los últimos años y se prevé que para futuro esta tendencia continúe. El anhelo de tener una mayor productividad ha llevado a que los equipos electrónicos posean más funciones que hagan más eficientes cada acción realizada, con esto las cargas no lineales de cada domicilio e industria han impactado de forma negativa en las redes de distribución eléctrica, problemas como la presencia de armónicos producen daños en los equipos y la calidad de la energía a lo largo del tiempo. Voltaje y corriente se ven afectados en la calidad de la energía y por esto se eligió un filtro activo de corriente. Con este prelude el objetivo específico del presente artículo es disminuir los armónicos presentes en distintas cargas conectadas a una red de distribución realizando mediciones en tiempo real y ajustando los parámetros necesarios según sea el caso para obtener una compensación dinámica de los armónicos, haciendo así que disminuyan y el filtro activo de corriente compense según sea necesario. Evaluar los resultados técnicos que entrega la simulación sirve para determinar el funcionamiento de la compensación dinámica y así emitir un veredicto acerca de la factibilidad de este método.

**Palabras Clave:** Filtro activo, armónicos, sistemas dinámicos, planificación de distribución de energía.

## Abstract

Technical advances according to electronic equipment have gotten a relevant increase in the last years and it's supposed that it keeps going within the following years. The desire of having a bigger productivity has brought the electronic equipment to be more efficient in each ended action, with this the no linear loads of each home and industry have affected in a negative way with troubles such as the presence of harmonics that produce some damage on the equipment and the quality of the energy along time. Voltage and current as main factors for a high quality of energy are seem to be affected and that is why a current active filter is one of the most viable alternatives, that is why this way has been chosen for this work. With this prelude, the specific objective of this current active filter is to reduce the present harmonics in different loads that are connected to a distribution web. Making measurements in real time and adjusting the necessary parameters according to the case, so as to get a harmonics dynamic compensation in order them to decrease and the current active filter rewards it when necessary. Evaluating the technical results that the simulation deliver is used to determinate the functioning of the dynamic compensation and in that way to give off a verdict about the feasibility of this method.

**Keywords:** Active filter, harmonics, dynamic systems, power distribution planning.

# 1 Introducción

La calidad de la energía en un sistema de distribución es la forma en que los equipos desempeñan su función sin tener daños en sus piezas, la calidad se ve afectada cuando la tensión, corriente, frecuencia sufren interrupciones en el sistema esto debido a causas humanas o desastres naturales [24].

Otra de los problemas en calidad de energía es a la distorsión de la forma de onda tanto de voltaje como en corriente, dichas distorsiones se conocen como armónicos y en su mayoría son generados por cargas no lineales las cuales generan los equipos electrónicos [25],[26].

En años anteriores las cargas no lineales no generaban un verdadero problema, pero con el aumento de equipos electrónicos por cada residencia e industria este es un problema que enfrentan hoy en día las empresas distribuidoras de energía eléctrica pues genera pérdidas económicas e ineficiencia en la entrega de la calidad de la energía [26],[27].

Eliminar la presencia de armónicos sería lo ideal para combatir estas afectaciones, pero al no ser posible en escenarios reales eliminar al 100% los armónicos, la alternativa que se aplica es la supresión de los mismos para que afecten lo menos posible al conjunto de equipos que integran la red de distribución eléctrica [27].

Con base en dicho problema, el concepto de disminuir los armónicos se modifica para realizar una compensación dinámica que se anhela sea más eficiente, para lograr este objetivo se implementa un lazo de control a un filtro activo de corriente.

Así, la estructura del presente artículo se define de la siguiente manera:

El capítulo 2, como marco teórico presenta todos los conceptos necesarios

para comprender el problema planteado, las variables que influyen en cada tema y así determinar el mejor modelo para lograr el objetivo planteado.

Los temas relacionados al título del artículo son; distribución eléctrica, la cual indica los problemas de los armónicos en la red; armónicos para comprender más a fondo su comportamiento; técnicas de mitigación de armónicos para hallar la mejor forma de disminuir su presencia; los métodos de control que se pueden aplicar para la compensación dinámica.

El capítulo 3 comprende el planteamiento del problema, se define el objetivo específico, los casos de estudio y los escenarios para las simulaciones previas a lograr lo deseado, describiendo cada uno de los pasos. Adicional se comprende el funcionamiento que tiene el sistema base de 33 barras de la IEEE y los valores que maneja antes de empezar con las simulaciones.

En el capítulo 4 se analizan los resultados que se han obtenido en base a cada caso de estudio, logrando en cada caso un objetivo general que nos lleva al siguiente caso para llegar a demostrar lo planteado.

Realizando prueba y error para cada caso, simulaciones, comparación de datos y gráficas demostrativas en los cuales se describe los valores más óptimos encontrados para lograr el objetivo específico se explica lo conseguido en cada caso de estudio.

El capítulo 5 describe de manera concisa todos los resultados encontrados, la interpretación que maneja cada gráfica y tabla mediante las cuales se fue exponiendo los resultados. Finalmente, luego del trabajo realizado se expone los temas que pueden seguir esta línea de estudio para nuevos análisis y futura implementación.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Distribución Eléctrica

Parte fundamental del sistema eléctrico de potencia (SEP) es la distribución eléctrica, en [1] explica una mayor complejidad que requiere el diseño de distribución eléctrica frente al SEP, elementos que forman parte del sistema de distribución eléctrica cumplen funciones que permiten al usuario final tener una calidad de servicio eficiente con valores adecuados y con una forma de onda con mínimas perturbaciones de armónicos, que sea pura [3].

Dentro de los conceptos que se han manejado durante varios años en la rama de electricidad, se puede entender como distribución eléctrica al lugar donde circula un tipo de corriente que llevará energía a un usuario final, esta clasificación según [3] se puede definir en 2 componentes, el componente rural y el componente urbano.

Para el estudio de este, el avance de la tecnología permitió que las redes de distribución puedan pasar de ser aéreas a soterradas o que exista una combinación entre ambas [4] haciendo más ornamental el área por el cual se extiende el cableado.

La forma como se transmite la energía a variado muy poco y tenemos:

#### 2.1.1 Subestación principal de potencia

Encargada de recibir la potencia proveniente del sistema de transmisión y transformarla a niveles óptimos de voltaje mediante los cuales las redes de distribución primarias logren su objetivo sin causar daño en los equipos [2].

#### 2.1.2 Redes de distribución primarias

Comprende el inicio de la distribución eléctrica y de donde se empieza a repartir la energía, comienza desde la subestación principal de potencia, donde los alimentadores pueden ser de tipo monofásico o trifásico teniendo como elementos principales conductores, equipos de protección y maniobra, transformadores de distribución y acometida primaria [5].

#### 2.1.3 Redes de distribución secundarias

Para determinar varios de los problemas de cargas en usuarios finales esta es el área de estudio, entendiéndose a la red de distribución secundaria como la salida del secundario del transformador hacia los usuarios finales con una tensión que puede ser monofásica o trifásica mediante el cual se anhela transmitir una onda senoidal pura con la ausencia de armónicos [5].

#### 2.1.4 Redes de distribución para cargas residenciales

Cargas residenciales como edificios de departamentos, conjuntos residenciales, urbanizaciones, predios independientes, etc., se encuentran cargas predominantemente resistivas, siendo el generador principal de armónicos debido a todos los componentes electrónicos que se tiene conectado en la red, es donde se hallan el problema a resolver [4].

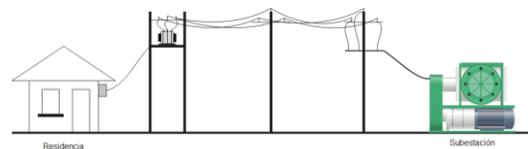


Figura 1. Red clásica de distribución eléctrica.

## 2.2 Armónicos

Originados principalmente por cargas no lineales producidas sobre todo por equipos electrónicos se define como una señal periódica que se descompone en una cascada de ondas senoidales, una forma de onda distorsionada donde la frecuencia de trabajo (50 Hz/60 Hz) son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental [6].

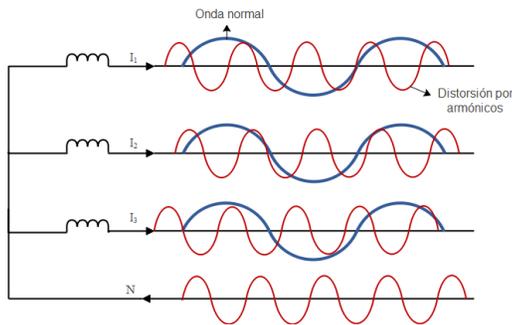


Figura 2. Presencia de armónicos en una red trifásica.

### 2.2.1 Origen de armónicos

En el caso de Ecuador, el SEP trabaja a 60 Hz, esto hace que todos los equipos conectados a una red secundaria trabajen a esta misma frecuencia teniendo una tensión y corriente senoidal [7], en su mayoría, por las cargas no lineales, se presenta un flujo eléctrico que maneja otro tipo de frecuencia diferente a 60 Hz [6].

Los flujos eléctricos diferentes a 60 Hz son conocidos como armónicos, definiéndose como las distorsiones en la forma de onda de tensión y corriente [8].

Para las empresas eléctricas encargadas de la distribución de la energía eléctrica, la presencia de armónicos en la red ha significado un gran desafío a la hora de compensarlos debido a los efectos que estos tienen en la red, como la aparición de tensiones no senoidales producidas por corrientes distorsionadas provocando que la forma

de onda no llegue de manera netamente senoidal [7].

### 2.2.2 Fuentes de armónicos

Según [8] las fuentes de armónicos se pueden clasificar en tres categorías basándose en: descargas eléctricas como soldadoras de arco, inductancias saturables como motores o transformadores, y aparatos electrónicos de uso cotidiano que disponemos en cualquier hogar.

### 2.2.3 Distorsión armónica individual

Por sus siglas en inglés IHD (individual harmonic distortion) comprende el nivel de distorsión con respecto a la variable fundamental, se dispone de índices tanto para corriente como para tensión definidos mediante las siguientes ecuaciones [9]:

IHD de corriente:

$$IHD_i = (I_a / I_t) \quad (1)$$

Dónde:

IHD<sub>i</sub>: Distorsión armónica individual de corriente

I<sub>a</sub>: Corriente que recorre cada armónico

I<sub>t</sub>: Corriente nominal que recorre el alimentador

IHD de tensión:

$$IHD_v = (V_a / V_t) \quad (2)$$

Dónde:

IHD<sub>v</sub>: Distorsión armónica individual de tensión

V<sub>a</sub>: Tensión que recorre cada armónico

V<sub>t</sub>: Tensión nominal que recorre cada alimentador

### 2.2.4 Distorsión armónica total

Por sus siglas en inglés THD (total harmonic distortion) representa la distorsión total presente en las ondas que producen los armónicos y se dispone los índices tanto para corriente como tensión definidos mediante las siguientes ecuaciones [9]:

THD de corriente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{a=2}^{\infty} I_a^2}}{I_b} \quad (3)$$

Dónde:

THD<sub>i</sub>: Distorsión armónica total de corriente

a: orden de la armónica

I<sub>a</sub>: Corriente que recorre cada armónico

I<sub>b</sub>: Corriente eficaz de la frecuencia fundamental

THD de tensión:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{a=2}^{\infty} V_a^2}}{V_b} \quad (4)$$

Dónde:

THD<sub>v</sub>: Distorsión armónica total de tensión

V<sub>a</sub>: Tensión que recorre cada armónico

V<sub>b</sub>: Tensión eficaz de la componente fundamental

### 2.2.5 Efectos de los armónicos en el SEP

Cuando se habla de armónicos a pequeña escala no se dimensiona los efectos adversos que estos pueden llegar a ocasionar, sin embargo, al ser en gran cantidad pueden tener efectos combinados sobre los equipos que conforman la red de distribución [7].

Tanto la vida útil, la eficiencia y el mal funcionamiento de los equipos de la red de distribución se ven afectados por

los armónicos, lo que genera un incremento de precio en los mantenimientos a realizar y el corto plazo en el cual se requiere el mantenimiento [8].

### 2.3 Conversores

Actúan en modo de conmutación procesando un flujo de energía que existe generalmente entre una carga y un distribuidor de energía, un variador de frecuencia de 6 pulsos (VF), es un equipo productor de armónicos, de este se obtiene las características de los armónicos y los parámetros con los cuales se puede trabajar para atenuarlos [10].

#### 2.3.1 Factor de potencial lineal

En algunos textos confundido como coseno de  $\phi$  (cos $\phi$ ), en [11] se explica que los valores de ambos serían iguales únicamente cuando exista ausencia de armónicos en el coseno de  $\phi$ , caso contrario son diferentes.

Para hallar los datos del factor de potencia lineal (FPL) se los obtiene del triángulo de potencias de la Figura 3.

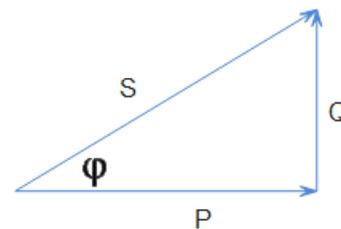


Figura 3. Triángulo de potencias.

El FPL define la relación que existe entre la potencia activa y la potencia aparente, obteniendo la ecuación [11]:

$$fpl = P/S \quad (5)$$

Donde:

FPL: Factor de potencia lineal

S: Potencia Aparente  
P: Potencia Activa  
Q: Potencia Reactiva

### 2.3.2 Factor de potencia No lineal

Como se indicó, las cargas no lineales generan una onda que no es completamente senoidal debido a la presencia de armónicos, estos datos los podemos obtener del triángulo de potencias con distorsión armónica [12],[17], obteniendo los datos de la Figura 4.

S<sub>a</sub> es la componente fundamental, la que no contiene armónicos, mediante la cual se encontraría el coseno de φ [12].

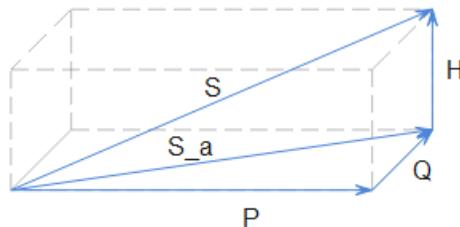


Figura 4. Triángulo de potencias con distorsión armónica.

Para hallar el factor de potencia no lineal (FPH) nos guiamos de una componente extra que es la distorsión (H) que generan los armónicos [12], de la cual obtenemos la ecuación:

$$fph = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + H^2}} \quad (6)$$

Donde:

FPH: Factor de potencia no lineal

S: Potencia Aparente

P: Potencia Activa

Q: Potencia Reactiva

H: Distorsión

S<sub>a</sub>: Componente fundamental

## 2.4 Mitigación de armónicos

Las empresas eléctricas encargadas de distribuir la energía manejan estándares

permitidos de armónicos presentes en la red, esto debido a que todavía no existe la manera de eliminar los armónicos desde el diseño, es decir, de raíz [13].

Por lo tanto, se busca compensarlos mediante técnicas de mitigación como las presentadas a continuación.

### 2.4.1 Filtro pasivo

Este filtro se forma a partir de elementos reactivos como bobinas o condensadores, dichos elementos se pueden conectar en paralelo a la carga haciendo que su frecuencia de resonancia pueda coincidir con los armónicos presentes en la red [15].

Pero este filtro también presenta sus falencias, y es que, debido a causas como cambios en la carga, envejecimiento de los equipos, cambio en la impedancia de línea, el filtro resulta ineficaz y en otras ocasiones puede dañarse por sobrecarga [15].

### 2.4.2 Filtro activo

El filtro activo se forma por elementos como transistores los cuales van cancelando los armónicos mediante el factor de potencia, haciendo que las formas de onda de voltaje y corriente se sincronicen [14].

El filtro puede ser conectado en serie o paralelo dependiendo de la variable a controlar, con esto el filtro puede manejar varias cargas no lineales y ser más eficiente con los inconvenientes que se pueden presentar a lo largo del SEP [14].

Hasta el momento es la manera más eficaz de mitigar el contenido armónico presente en las cargas no lineales debido a que puede manejar corriente y tensión [14].

### **2.4.3 Filtro activo de corriente**

El filtro activo de corriente (FAC) opera generando corriente reactiva y armónicos que se pueden encontrar en las cargas no lineales, haciendo que estos componentes no sean proporcionados por el sistema [13].

Esto se logra conectando el FAC en paralelo cerca a la carga para tener una medición continua y en tiempo real de las corrientes de cada fase, para así hallar la componente referencial y desde ese punto generar la corriente reactiva y los armónicos que consume la carga [13].

Donde se encuentran el FAC y la carga se denomina punto de acoplamiento común, es el punto donde el FAC suprime los armónicos y únicamente entrega una onda senoidal de corriente [13].

### **2.4.4 Filtro activo de potencia**

El filtro activo de potencia (FAP) se conecta en serie, brindando una alta impedancia al sistema en el cual se trabaja, haciendo que disminuyan los armónicos, el FAP funciona de manera diferente al FAC, siendo dependiente del subsistema donde se vaya a implementar el filtro [16].

En [16] encuentra 3 subsistemas:

- a. Subsistema de potencia
- b. Subsistema de instrumentación
- c. Subsistema de control

Cada subsistema requiere de una atención especial en cuanto a equipos y configuración se refiere, como tener en cuenta que, los equipos puedan manejar el mismo nivel de voltaje para que no se estropeen, siendo una opción más para la mitigación de armónicos en la red de distribución eléctrica [16].

## **2.5 Métodos de control para filtros activos**

Para disminuir la presencia de armónicos existen varios métodos, como usar FAC o FAP, cada uno de ellos puede corregir el voltaje o corriente basándose en el dominio de la frecuencia o tiempo [18].

Los métodos tienen un principio de actuación muy sencillo, reciben señales que activan los semiconductores dentro del filtro activo y en consecuencia crean la corriente o tensión necesaria para compensar los armónicos [19].

Para los filtros activos [13] se determina los cálculos, algoritmos o estrategias necesarias para identificar la variable en la cual el filtro se debe basar para la compensación [18], con dicho análisis es más factible separar la potencia activa, reactiva y aparente [19].

En [18] expresa técnicas frecuentes de la manera cómo los convertidores actúan, cada uno posee una configuración diferente que hace caso a lo programado y a los cálculos de control, estas técnicas son:

- a. Modulación PWM
- b. Control por histéresis
- c. Modulación del vector espacial

### **2.5.1 Modulación PWM**

Es un método sencillo de implementar debido a su respuesta rápida en la comparación de señales, además, las señales de onda triangular, de amplitud fija y de consigna son utilizadas para manejar los semiconductores del convertidor [20].

### **2.5.2 Control por histéresis**

Realiza la conmutación mediante la cual se activan los semiconductores de los convertidores la cual es muy rápida, y basa su función en la comparación de los tiempos de la banda de histéresis con el

valor real y el valor de consigna, esto implica que la frecuencia de actuación sea variable [21].

### 2.5.3 Modulación del vector espacial

Usando la teoría de los vectores espaciales, este método usa los vectores adyacentes que se encuentran en un espacio complejo dividido en seis sectores, los vectores adyacentes de acuerdo con el sector donde se encuentren se encargan de controlar la magnitud, es un método complejo y más difícil de implementar [22].

### 2.5.4 Método de control basado en la frecuencia

Una de las bases principales del dominio de la frecuencia es la Transformada de Fourier, en ella se basan los cálculos y el uso de las variables necesarias para hallar su respuesta, siendo la base de este método. La componente fundamental de los armónicos no se toma en cuenta para conseguir la señal de control, se usa la frecuencia de muestreo la cual debe ser el doble de la frecuencia más alta utilizada sin olvidar que deben ser múltiplos de la frecuencia fundamental [18].

### 2.5.5 Método de control basado en el tiempo

Es un método eficiente debido a su rápida respuesta a las señales de control, se ejecutan casi en tiempo real para su compensación, esto debido a la velocidad en que los semiconductores identifican las señales de los cambios del SEP [19].

### 2.5.6 Lazo de control de corriente

Entra en juego la banda de histéresis en el FAC, usa una señal de referencia para compararla con una señal que pueda enviar el filtro [23].

Se realiza la comparación para ejecutar la conmutación del convertidor,

y este se activa recibiendo los pulsos de la señal de error. El convertidor se mantendrá así en conmutación mientras la corriente de referencia no supere el ancho de banda de histéresis [23]. Esto se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$ibh = iequal \quad (7)$$

$$iup = ibh + \frac{\Delta h}{2} \quad (8)$$

$$idown = ibh - \frac{\Delta h}{2} \quad (9)$$

$$\Delta h = iup - idown \quad (10)$$

Donde:

ibh: Corriente de referencia

iequal: Corriente de compensación

iup: Límite de corriente superior de la banda de histéresis

idown: Límite de corriente inferior de la banda de histéresis

$\Delta h$ : Ancho de banda de histéresis

### 2.5.7 Lazo de control de voltaje

En el diseño de un FAC, los capacitores forman parte fundamental controlando el voltaje de los elementos que lo conforman, y con respecto a la componente fundamental, la frecuencia de 60Hz debe ser controlada para evitar que los capacitores se descarguen [23].

## 3 Planteamiento del Problema

A continuación, se expone el problema a resolver, los métodos y herramientas utilizadas en el mismo y la descripción completa de todos los datos con los que se analiza y resuelve el problema.

### 3.1 Formulación del problema

La presencia de cargas no lineales conectadas a la red de distribución eléctrica ha generado con el tiempo varios inconvenientes, entre ellos la presencia de armónicos, estos

distorsionan la forma de onda de voltaje y corriente llevando a generar un desgaste en los equipos que forman el conjunto de dicha red.

Una carga residencial tiene como característica principal el uso de la energía para fines domésticos, independiente del tamaño del núcleo familiar [28], las cargas no lineales presentes son debido al uso de duchas eléctricas, equipos de entretenimiento, cocinas a inducción, calefactores, etc.

Debido a que muchas residencias están conectadas a una red en común, el problema de los armónicos causa inconvenientes en la red de distribución y en los equipos que la conforman.

En el software Matlab-Simulink se realiza la simulación con una base de un sistema de 33 barras propiedad de IEEE, con ello se plantea la implementación de un filtro activo de corriente monofásico para que junto a un control dinámico logre disminuir y estabilizar la presencia de estos armónicos.

### 3.2 Sistema de Prueba

La simulación propuesta se basa en un mismo escenario, pero con el uso de dos modelos. El primer modelo es el filtro activo de corriente y el segundo modelo es la red de distribución IEEE de 33 barras.

#### 3.2.1 Modelo red de distribución IEEE de 33 barras

Modelo de 33 barras de la IEEE (Figura 5) que presenta los siguientes valores:

- Voltaje base: 12.66 KV
- Angulo de fase (grados): 0
- Configuración: Estrella-tierra
- Frecuencia: 60 Hz

Y además los valores de P y Q presentes en cada barra indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Cargas en cada barra del sistema de 33 barras IEEE.

N° Barra	P [KW]	Q [KVAr]	N° Barra	P [KW]	Q [KVAr]
1	SLACK	SLACK	18	90	40
2	100	60	19	90	40
3	90	40	20	90	40
4	120	80	21	90	40
5	60	30	22	90	40
6	60	20	23	90	50
7	200	100	24	420	200
8	200	100	25	420	200
9	60	20	26	60	25
10	60	20	27	60	25
11	45	30	28	60	20
12	60	35	29	120	70
13	60	35	30	200	600
14	120	80	31	150	70
15	60	10	32	210	100
16	60	20	33	60	40
17	60	20	-	-	-

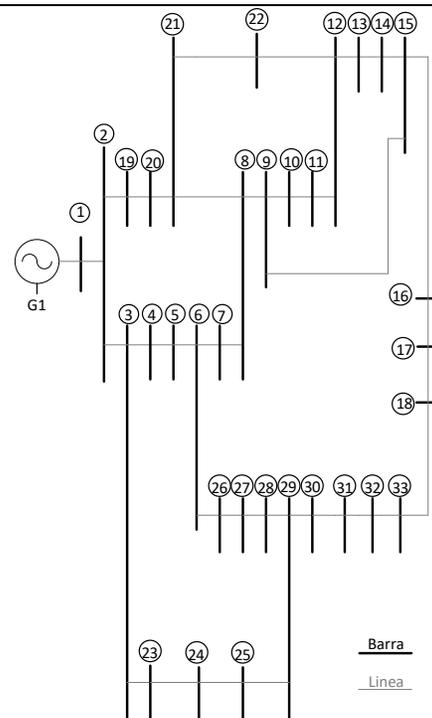


Figura 5. Sistema de distribución IEEE de 33 barras.

### 3.2.2 Modelo filtro activo de corriente

El filtro activo de corriente (Figura 6) se conecta de manera monofásica a la red para que interactúe de forma independiente, en cada fase se corregirá 3 de los armónicos más perjudiciales como lo son el 3ro, 5to y 7mo armónico. Los parámetros internos del filtro se modifican de acuerdo a la necesidad.

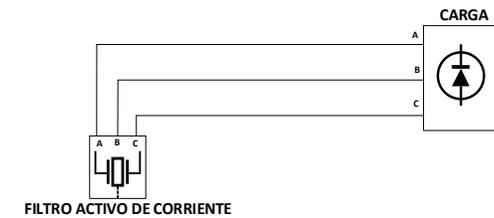


Figura 6. Esquema filtro activo de corriente conectado de manera monofásico.

### 3.2.3 IGBT con pulso dinámico en tiempo real

La compensación dinámica es lo primordial para resolver el problema planteado, el IGBT conectado en cada fase (Figura 7) recibe el pulso (Figura 8) enviado por el control dinámico, el pulso (señal) evalúa en tiempo real el THD de la selección de barras más críticas y este en conjunto con el filtro activo de corriente disminuirán los armónicos.

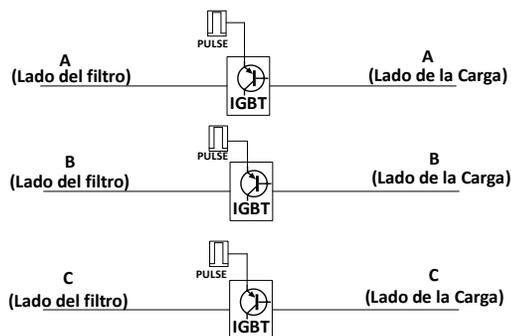


Figura 7. IGBT con entrada para señal de pulso en cada fase.

El pulso varía según el control lo requiera, haciendo que la señal de onda cambie en el tiempo.

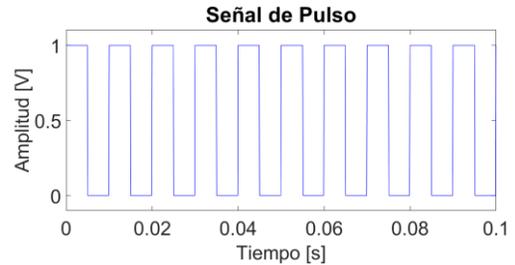


Figura 8. Ejemplo de forma de onda en la señal de pulso.

### 3.3 Casos de Estudio

#### Caso 1: Filtro activo de corriente de compensación estática

En el caso de estudio 1, se determina el comportamiento del filtro activo de corriente en un sistema sin perturbaciones extras para obtener la disminución del THD en las barras más afectadas por los armónicos.

Para conseguir el mejor escenario se realizarán varias pruebas variando los valores del componente capacitivo y los valores reactivos de los compensadores para el 3ro, 5to y 7mo armónico.

#### Caso 2: Filtro activo de corriente de compensación dinámica conectado a una barra

En el caso de estudio 2, se conecta el filtro activo de corriente con la compensación dinámica en la barra 8 que es una más afectadas por los armónicos, los valores que entregue la barra determinan en tiempo real la variación del THD y la manera como la forma de onda del pulso varía según sea necesario compensar el THD. El sistema de control se encarga de entregar un valor porcentual de acuerdo al error del THD con respecto a una referencia.

#### Caso 3: Filtros activos de corriente de compensación dinámica conectados a 3 barras

En el caso de estudio 3, se conecta un filtro de corriente con compensación dinámica por cada barra que se ha

determinado con el peor nivel de THD, esto para demostrar el efecto que tienen los filtros en el sistema y la manera de comportarse la compensación dinámica sin conectar una carga adicional que perturbe los barras a estudiar.

**Caso 4: Sistema con filtros activos de corriente de compensación dinámica con perturbaciones por cargas inductivas**

En el caso de estudio 4, a cada barra se añaden dos cargas en paralelo de carácter inductivo, cada una generando una perturbación en un tiempo definido, esto con el fin de determinar la compensación dinámica del filtro frente a eventos inesperados que pueden ocurrir en conjunto de cargas residenciales comunes.

**4 Análisis de resultados**

De acuerdo a cada caso de estudio planteado se propone una problemática y un objetivo el cual debe ser resuelto de manera satisfactoria con la verificación de datos a través de pruebas realizadas a los sistemas y componentes utilizados en cada escenario, esto con el fin de hallar una solución óptima para el objetivo general del artículo.

**4.1.1 Resultados del FAC de compensación estática**

Al determinar que en el sistema IEEE de 33 barras existen barras con mayor THD que otras del mismo sistema se decide trabajar sobre 3 de ellas, las cuales son la barra 2, barra 5 y barra 8. Al simular, el valor de THD antes de conectar el filtro es de 0.16% (Figura 9), este valor se repite en la barra 2 – 5 y 8.

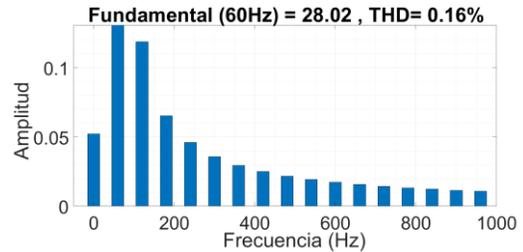


Figura 9. Valor de THD antes de conectar el filtro.

Se realiza las variaciones en el capacitor de potencia reactiva capacitiva (Qc) y en los compensadores para 3ro, 5to y 7mo armónico de potencia reactiva nominal (Qn), para analizar la información presente en las siguientes tablas:

Tabla 2. Valores con Qc=0.15 MVar y Qn=0.15 MVar en cada filtro.

Nº Barra	Sin filtro [%]	Filtro con: Qc=0.15 MVar Qn=0.15 MVar
2	0.16	0.18%
5	0.16	0.16%
8	0.16	0.12%

En la primera prueba (Tabla 2), los valores de potencia son bajos, lo que hace que la simulación entregue resultados poco favorables con lo cual se descarta los primeros valores.

Tabla 3. Valores con variaciones de Qc y Qn del filtro conectado en cada barra.

Nº Barra	Sin filtro [%]	Filtro con diferentes valores por barra	
2	0.16	Qc=15 GVar Qn=15 GVar	0.14%
5	0.16	Qc=1.5 MVar Qn=1.5 MVar	0.08%
8	0.16	Qc=15 GVar Qn=15 GVar	0.12%

En la segunda prueba realizada (Tabla 3) se cambia la configuración y se modifica los valores en las 3 barras de manera independiente para cada filtro, obteniendo un mejor desempeño, sin

embargo, se plantea realizar 2 pruebas más con diferentes valores.

Tabla 4. Valores con  $Q_c=1.5$  MVar y  $Q_n=1.5$  MVar en cada filtro.

N° Barra	Sin filtro [%]	Filtro con: $Q_c=1.5$ MVar $Q_n=1.5$ MVar
2	0.16	0.11%
5	0.16	0.12%
8	0.16	0.07%

En la tercera prueba realizada (Tabla 4) se unifica el valor para todos los filtros y se obtiene un mejor desempeño individual, de esta manera los escenarios posteriores tendrán un mejor comportamiento que ayude a resolver el problema planteado.

Tabla 5. Valores con variaciones de  $Q_c$  y  $Q_n$  del filtro conectado en cada barra.

N° Barra	Sin filtro [%]	Filtro con diferentes valores por barra	
2	0.16	$Q_c=1.5$ MVar $Q_n=1.5$ MVar	0.14%
5	0.16	$Q_c=15$ MVar $Q_n=15$ MVar	0.15%
8	0.16	$Q_c=1.5$ MVar $Q_n=1.5$ MVar	0.14%

En la cuarta y última prueba realizada (Tabla 5) se cambia los valores de manera independiente para cada filtro aumentando más la potencia, pero entregando peores resultados que descartan por completo este valor.

En base a los resultados obtenidos se concluye que los datos de la Tabla 4 son los más favorables en cuanto a valores de  $Q_c$  y  $Q_n$  para disminuir el THD presente en cada barra. El objetivo se cumple de manera satisfactoria, como el ejemplo de la figura 10, comprobando que el filtro activo de corriente tiene un efecto positivo sobre cada barra en el que ha sido conectado.

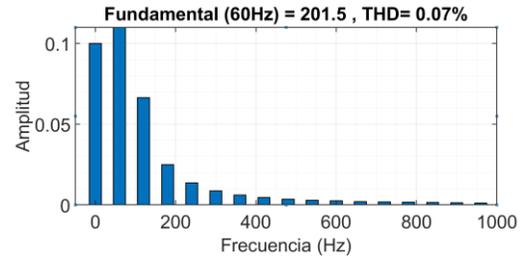


Figura 10. Valor compensado de THD en barra 8.

#### 4.1.2 Resultados del FAC de compensación dinámica conectado a una barra

Para iniciar con el modelado de la compensación dinámica, como escenario se selecciona la barra 8 que posee un valor deficiente de THD como se menciona en el caso de estudio 1. Esta barra será la base en la cual se trabajará con todas las simulaciones hasta determinar que opere de una manera óptima para disminuir en tiempo real la presencia de armónicos según el escenario propuesto así lo requiera.

Se conecta un IGBT en cada fase de la barra el cual será el encargado de interpretar la señal del periodo para compensar el THD dependiendo de las variaciones que sufra. El IGBT recibe un pulso que se proporciona mediante un control dinámico que posee las siguientes características:

De acuerdo al caso de estudio anterior se determina el THD de 0.16% como la referencia para el error, el error toma también el valor más bajo entregado por la barra después de conectar el filtro que varíen entre 0.07% y 0.02%.

El valor del error permite saber las variaciones que tendrá el sistema por lo tanto se determina un error máximo de 0.08% y con esto se determinan los porcentajes que emita el sistema de control. Estos valores entregados por el sistema de control son ingresados al IGBT en forma de pulso de manera que se determine un periodo mayor o menor

de compensación como se observa en la figura 11.

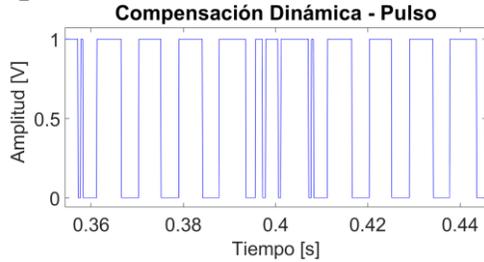


Figura 11. Forma onda compensación dinámica por perturbaciones.

La salida del sistema entrega valores entre 5% y 95% según varíe el error, mientras el error medido sea menor significa que el THD del sistema es elevado y el porcentaje entregado será cercano al 95% como se muestra en la figura 12.

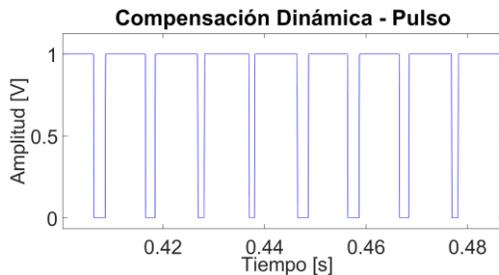


Figura 12. Ejemplo de error menor que entrega un periodo de 76.86%.

Si el error medido es cercano o mayor a 0.08 significa que el THD del sistema es bajo y el porcentaje entregado será un cercano a 5% como se muestra en las figuras 13.

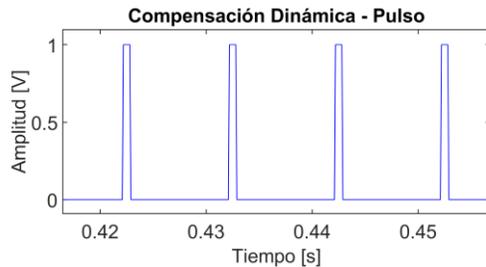


Figura 13. Ejemplo de error mayor que entrega un periodo de 6.13%.

Así los niveles de THD encontrados en la corriente disminuyen como se observa en la figura 15 demostrando que la compensación dinámica funciona satisfactoriamente, en comparación a la figura 14.

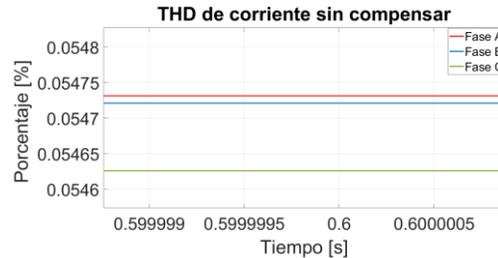


Figura 14. THD de corriente previo a la compensación dinámica.

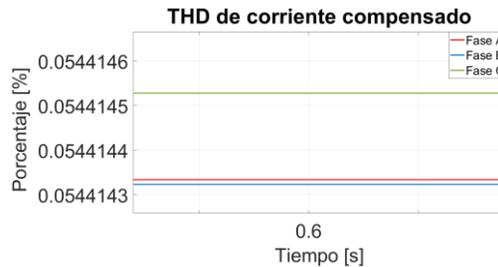


Figura 15. THD de corriente posterior a la compensación dinámica.

Los valores de porcentaje que entrega el sistema de control para la barra 8 y así realizar la compensación dinámica son los presentados en la tabla 6.

Tabla 6. Valores porcentuales entregados por fase de la barra 8.

N° Barra	Fase	Porcentaje [%]
2	A	6.128
5	B	6.128
8	C	6.119

### 4.1.3 Resultados del FAC de compensación dinámica conectados a 3 barras

Siguiendo con la secuencia para alcanzar el objetivo general se determina las variaciones que sufren las barras 2-5 y 8.

La simulación realizada en este caso de estudio entregó una variación en los datos ya conocidos, puesto que el sistema empezó a variar de diferente manera al conectar los filtros dinámicos, los componentes que integran el conjunto del control dinámico y el filtro activo de corriente. El THD presente en cada barra cambio de valores, pero compensándolos de igual manera, pero se obtiene una respuesta satisfactoria que indica la corrección que sufre en tiempo real el THD debido a las mediciones constantes del mismo, y como el control realiza el trabajo propuesto.

Las variaciones de THD se reflejan en la tabla 7.

Tabla 7. Variación de THD posterior a la conexión del filtro dinámico en cada barra.

Nº Barra	Sin filtro [%]	Filtro estático con: Qc=1.5 MVar Qn=1.5 MVar	Filtro dinámico con: Qc=1.5 MVar Qn=1.5 MVar
2	0.16	0.11%	0.10%
5	0.16	0.12%	0.09%
8	0.16	0.07%	0.12%

El THD presente en cada barra disminuye con éxito (Figura 16), sin ser una variación relevante es el resultado esperado, se determina que de tener un promedio de 0.16% de THD en las barras analizadas, baja a un promedio de 0.1033% que se manifiesta como una compensación real dentro de un sistema.

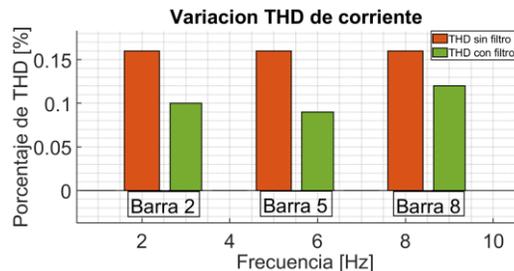


Figura 16. Variación THD por cada barra.

### 4.1.4 Resultados del FAC de compensación dinámica con perturbaciones

Después de demostrar el correcto funcionamiento de cada filtro dinámico conectado en cada una de las barras con peor THD se provoca 2 perturbaciones, esto conectando 2 cargas de potencia reactiva inductiva QL [VAr] en paralelo para determinar el comportamiento del filtro dinámico frente a eventos inesperados, con el fin de compensar todos los armónicos que entren al sistema. La simulación en Matlab-Simulink es de 1 [s] y el tiempo y potencia de cada carga se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Datos de las cargas conectadas en paralelo.

Nº Barra	Carga 1 QL [MVar]	Tiempo ingreso carga 1 [s]	Carga 2 QL [MVar]	Tiempo ingreso carga 2 [s]
2	25	0.5	30	0.75
5	30	0.3	40	0.6
8	20	0.2	25	0.4

Cada perturbación ingresa con un valor de QL (Figura 17) para generar un evento para que la compensación dinámica solucione y siga operando de manera estable.



Figura 17. Ejemplo ingreso de perturbaciones en 0.5 [s] y 0.75 [s].

Para analizar de mejor manera el comportamiento del THD en cada barra los resultados se plantean de manera individual.

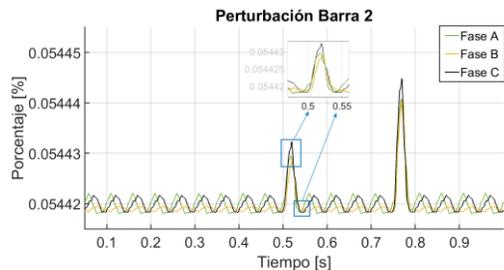


Figura 18. Atenuación de perturbaciones en barra 2 con tiempo 0.5 [s] y 0.75 [s].

En la barra 2, los eventos ingresan según lo indicado en la tabla 8, el sistema se mantiene en estabilidad hasta que a los 0.5 [s] existe una perturbación la cual es atenuada de manera casi instantánea por la presencia del filtro dinámico, luego a los 0.75 [s] existe una segunda perturbación aún más brusca la cual vuelve a ser atenuada de manera casi instantánea para mantener la estabilidad y que el sistema funcione como se configuró, observando los resultados en la figura 18.

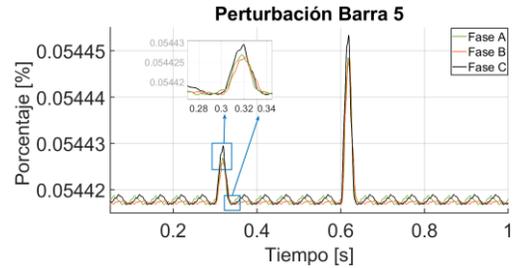


Figura 19. Atenuación de perturbaciones en barra 5 con tiempo 0.3 [s] y 0.6 [s].

En la barra 5, los eventos ingresan según lo indicado en la tabla 8, cumple con lo requerido por el sistema en los segundos 0.3 y 0.6, atenuando el THD hasta volver a la estabilidad, la forma de onda varía en cada barra dependiente del nivel de THD presente en cada una de ellas y al valor entregado por el sistema de control, los datos tienen una forma clara de presentarse los cuales se observa en la figura 19.

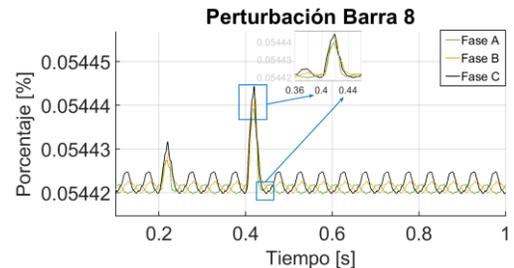


Figura 20. Atenuación de perturbaciones en barra 8 con tiempo 0.2 [s] y 0.4 [s].

En la barra 8, los eventos ingresan según lo indicado en la tabla 8, y atenúa las perturbaciones hasta volver al sistema estable (Figura 20), el resultado es satisfactorio en cada barra simulada y analizada cumple con su función, la compensación dinámica funciona y el objetivo general se ha cumplido.

## 5 Conclusiones

Después de realizar todas las simulaciones propuestas en cada caso de estudio y llegar a resolver el objetivo específico se concluye que:

El filtro activo de corriente actúa de manera indirecta sobre el sistema, pero tiene su función principal directamente en la barra conectada, así al conectar varios filtros se determina un cambio en los valores de cada barra para lo cual se compone un esquema de valores para determinar los mejores, que para este trabajo fue la Tabla 4.

El control dinámico compone la parte fundamental del artículo, ya que es el encargado de hacer que el filtro activo de corriente tenga una carga menor o mayor de trabajo dependiendo del momento del día debido a la conexión/desconexión de cargas no lineales, y con esto mejore su desempeño al reducir el THD.

El objetivo específico se cumple satisfactoriamente para cada barra, demostrando que la compensación dinámica para armónicos es confiable y trabaja de manera adecuada en estado estable y frente a perturbaciones, disminuyendo en la barra 2 de 0.16% a 0.10%, en la barra 5 de 0.16% a 0.09% y en la barra 8 de 0.16% a 0.12%.

La disminución del THD era el objetivo general, y se logró que de un promedio de 0.16% en las 3 barras estudiadas, disminuya a un 0.10%, y al conectar el resto de componentes para la simulación final el valor se incrementó a 0.1033%.

El problema planteado se soluciona demostrando que la configuración más óptima para las potencias del FAC es de  $Q_c = 1.5$  MVAR y  $Q_n = 1.5$  MVAR, el control dinámico establecido con los parámetros de error que oscilan entre 0.02 y 0.08 ejecuta los pulsos necesarios para la compensación y mantiene el

sistema estable. Con esto el tiempo de reacción ante perturbaciones ajenas al sistema es de 0.05 [s] lo que satisface el resultado.

### 5.1 Trabajos futuros

En base a los resultados del presente estudio se analiza la producción de los siguientes títulos de estudio:

*“Predicción de armónicos en cargas residenciales e industriales para compensación dinámica”*

*“Compensación dinámica de armónicos mediante variadores de frecuencia”*

## 6 Referencias

- [1] H. Pan and J. Lang, “Improving Segmentation Boundaries with Nonparametric Image Parsing,” *Proc. - 2015 12th Conf. Comput. Robot Vision, CRV 2015*, pp. 328–335, 2015, doi: 10.1109/CRV.2015.50.
- [2] J. D. Juárez Cervantes, *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*, vol. 52, no. 1. 2002.
- [3] J. A. Yebra, “Sistemas Eléctricos de distribución”, Reverte, vol. 1, pp. 340, España, 2021.
- [4] J. Revelo, “Implementación de una red de entrenamiento de distribución eléctrica smart grid”, Universidad Técnica del Norte, 2017.
- [5] [1] A. Xue *et al.*, “A New Quantitative Analysis Method for Overvoltage in Sending End Electric Power System with UHVDC,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145898–145908, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015267.
- [6] C. Arturo and V. Coronel, *Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución*, vol. 1, no. 5. 2013.

- [7] C. Sebastián, “Análisis de armónicos en redes residenciales”, Universidad Tecnológica de Pereira, 2017.
- [8] A. Sallam and O. Malik, “Harmonics in Electric Distribution Systems,” *Electr. Distrib. Syst. Second Ed.*, pp. 379–402, 2018, doi: 10.1002/9781119509332.ch14.
- [9] J. D. Arcila, “Armónicos En Sistemas Eléctricos,” *Armónicos En Sist. Eléctricos*, pp. 1–26, 2016.
- [10] P. Sarmiento and H. Manotas, “Evaluación de técnicas de reducción del efecto de los armónicos producidos por variadores de frecuencia de seis pulsos”, Universidad de la Costa, 2018.
- [11] F. Codeseda, “Modelado de convertidores en fuente de tensión en el dominio de la frecuencia”, Escuela Superior de Ingenieros, 2014.
- [12] L. Corvalán, “Factor de potencia y coseno de  $\phi$  : las tres dimensiones de la corriente eficaz,” *Rev. Ing. Eléctrica*, pp. 3–5, Mar. 2021.
- [13] E. Reyes Trujillo, J. Rodríguez Rivas, and J. Robles García, “Aplicación de un filtro activo de corriente para mejorar la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial,” *Ing. Investig. y Tecnol. Vol. XI. Núm. 4. 2010*, 389-402 ISSN1405-7743 FI-UNAM.
- [14] J. Marulanda, A. Escobar, and L. Alzate, “Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia,” *Tecnura*, vol. 21, no. 52, pp. 15–31, 2017, doi: 10.14483/udis-trital.jour.tecnura.2017.2.a01.
- [15] B. J. Villatoro, “Teorías de Diseño de Filtros Activos para Mitigación de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia,” Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.
- [16] F. E. Rojas Romero, “Diseño e implementación de un filtro activo de potencia mediante filtros adaptativos para la reducción de armónicos de corriente ante variaciones de la frecuencia fundamental,” Univ. Distrital Francisco Jose De Caldas, 2016.
- [17] M. Brugnoli, “Los componentes armónicos de la demanda y sus efectos sobre las redes de distribución eléctricas”, *Univ. Buenos Aires*, vol. 01, no. 01, pp. 1689–1699, 2016.
- [18] M. D. González, “Implementación de un filtro activo paralelo por Modulación por Ancho de Pulso”, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2017.
- [19] L. E. Castillo, “Determinación del Método de Control del Inversor más Adecuado para Lograr Mejores Resultados en el Comportamiento de un Filtro Activo de Potencia Conectado en Paralelo”, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2019.
- [20] J. Artal Sevil, R. Dufo López, and J. Bernal Agustín, “Análisis de diferentes técnicas de modulación PWM: Comparación y Diseño”, pp. 73–80, 2018.
- [21] L. F. Serna-Montoya, J. B. Cano-Quintero, N. Muñoz-Galeano, and J. M. López-Lezama, “Design of a control strategy for programmable electronic loads in microgrids”, *Inf. Tecnol.*, vol. 32, no. 2, pp. 151–164, 2021, doi: 10.4067/S0718-07642021000200151.
- [22] R. Rodríguez, M. Tovar, V. Ordoñez, and A. Navarrete, “Control Híbrido Óptimo en una Modulación de Vector Espacial (SVM) para un Inversor de Potencia Eléctrica”, 2018.
- [23] I. Vaca and C. Cruz, “Diseño y simulación del control de un filtro activo paralelo monofásico”, Escuela Superior Politécnica Del Litoral, 2012.
- [24] J. A. ARIAS GALÁN and C. S. PULLAGUARI ACARO, “Análisis de la calidad de energía en la red de baja tensión del transformador #19597P, debido a la conexión del sistema de generación fotovoltaico para

electromovilidad en la Universidad Politécnica Salesiana,” 2019, [Online]. Available:

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18041>.

[25] C. Nicola et al., “Quality analysis of electric energy using an interface developed in LabVIEW environment,” 2016 Int. Conf. Appl. Theor. Electr. ICATE 2016 - Proc., 2016, doi: 10.1109/ICATE.2016.7754669.

[26] M. Jaramillo and S. Llamuca, “A Proposed Model for Electricity Demand Forecasting in Ecuador Considering Akaike Criterion,” in *Communication, Smart Technologies and Innovation for Society*, 2022, pp. 345–355.

[27] M. Jaramillo and L. Tipan, “Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement,” 2020 *IEEE Int. Conf. Comput. Power Commun. Technol. GUCON 2020*, pp. 261–267, 2020, doi: 10.1109/GUCON48875.2020.9231191.

[28] Y. Segu and L. C. Fern, “Caracterización de la Carga Residencial Rural Caracterización de la Carga Residencial Rural Autor: Yandy Seguí Pérez,” 2010.