

*Control óptimo de un filtro activo para la reducción de armónicos en la red eléctrica de distribución, utilizando la teoría de AKAGI*

*Optimal control of an active filter for harmonics reduction on electrical distribution networks, using AKAGI theory.*

Carlos Quinatoa Caiza<sup>1</sup>, William Germánico Yugcha Quinatoa<sup>2</sup>, Rommel Suárez Vinueza<sup>3</sup>, Marco León Segovia<sup>4</sup>, Ángel León Segovia<sup>5</sup>

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo estudiar la corrección de armónicos de un sistema eléctrico de distribución para analizar la implementación de un algoritmo basado en la Optimización No Lineal y Teoría de Akagi, cual trata sobre la potencia activa y reactiva instantánea donde las corrientes y los voltajes de un sistema trifásico de tres hilos se expresaban vectorialmente mediante el uso de la transformada de Clarke y Park mientras la otra teoría se basa en obtener un lambda óptimo formulando el modelo de optimización no lineal y aplicando la teoría del Lagrange, aplicando las condiciones de (KKT). Este estudio se realizó diseñando un modelo base de un sistema eléctrico simulado en el programa SIMULINK implementando al sistema un filtro activo de potencia que tiene como principal función la reducción de los armónicos en las redes de distribución de energía eléctrica. Las simulaciones realizadas dan resultados óptimos al implementar el filtro activo de potencia corrigiendo de manera notoria los armónicos producidos por las diferentes cargas que ocasionan perturbaciones a la red eléctrica.

**Palabras Claves:** Armónicos, Sistema eléctrico de Distribución, Simulink, Potencia Activa, Potencia Reactiva, Filtro Activo, Perturbaciones, Cargas.

## ABSTRACT:

The present research has as main objective to review the harmonic correction of an electrical distribution system to analyze the implementation of an algorithm based on the Non-Linear Optimization and Akagi theory, which deals with instantaneous active and reactive power where the currents and voltages of a Three-phase three-wire system were expressed vectorially through the use of the Clarke and Park transform while the other theory is based on getting an

Recibido 22 de agosto del 2019; revisión aceptada 23 de agosto 2019

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, [carlos.quinatoa4@utc.edu.ec](mailto:carlos.quinatoa4@utc.edu.ec)

<sup>2</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, [william.yugcha5@utc.edu.ec](mailto:william.yugcha5@utc.edu.ec)

<sup>3</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, [rommel.suarez@utc.edu.ec](mailto:rommel.suarez@utc.edu.ec)

<sup>4</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, [marco.leon@utc.edu.ec](mailto:marco.leon@utc.edu.ec)

<sup>5</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, [marco.leon@utc.edu.ec](mailto:marco.leon@utc.edu.ec)

optimal lambda that formulate the Non-Linear Optimization model and applying the Lagrange theory, using conditions of (KKT). This research was carried out by a base model desing of a simulated electrical system in SIMULINK program implementing an active power filter that has as its main function the harmonics reduction in the electric power distribution networks. The simulations were carried out to give optimal results when the active power filter was applied, correcting notoriously the harmonics produced by the different loads that cause disturbances to the electric network.

**Keywords:** Harmonics, Electrical Distribution System, Simulink, Active Power, Reactive Power, Active Filter, Disturbances, Loads.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de [1] los armónicos es un obstáculo que todas las redes eléctricas sufre y además provoca: más consumo de potencia, más pérdidas en el sistema estrés de los equipos, más corrientes de resonancia en la red. Según los estudios realizados por [2] las cargas no lineales en la red de alimentación provocan altos niveles de distorsión armónica que son inyectados a la red y esto causa pérdidas de eficiencia energética y bajo factor de potencia de esta forma se ha buscado una manera, que es la utilización de filtros activos de potencia para una red bifásica y así lograr un equilibrio entre fases y neutro.

En [3] debido al cambio de la matriz energética en Ecuador, el ingreso masivo de cargas no lineales a la red eléctrica se presenta armónicos de manera considerable de esta forma es considerable los filtros activos trifásicos para controlar los niveles de armónicos en instalaciones industriales, comerciales y residenciales para cumplir con los parámetros de la norma IEE 519-2014. Los problemas de las redes eléctricas de distribución [4] se debe al aumento progresivo de las cargas no lineales ayudan al incremento de las inyecciones de corrientes y tensiones armónicas ya que estos pueden ocasionar calentamiento del transformador, vibraciones en motores, bajo factor de potencia disparos indeseado del equipo de protección ya el filtro de potencia nos ayuda mejorar la calidad de energía. La presente investigación sobre [5] la distorsión de la onda sinusoidal de la red de alimentación es debido a las cargas no lineales que son que inyectan armónicos a la red por lo que ocasiona variaciones en las corrientes y provoca bajo factor de potencia por lo que es necesario acoplar un filtro de potencia para mejorar la eficiencia energética a los consumidores.

La investigación surgió [6] de este tipo de cargas no lineales consume corrientes con alto contenido de armónicos la forma de compensar las corrientes armónicas es mediante filtros de potencia y también se utiliza los convertidores que manejan una potencia considerable de

manera que es necesario proteger al filtro activo el caso de que tenga un riesgo de sufrir fallas ocasionadas por diversas condiciones. Mediante el trabajo investigativo [7] para mejorar la calidad energía y eliminar armónicos debido a cargas no lineales se compensa armónicos con los filtros de potencia activa ya que estos elementos mejoran las ondas sinusoidales y la distorsión de la forma de la onda para que exista bajo factor de potencia y no se desequilibre entre las fases. También estableció que [8] la corriente no sinusoidal que las cargas consumen es producido por los tipos de problemas y su vez la mala calidad de potencia mediante el filtro activo de potencia se pretende corregir los efectos de potencia de la operación de las cargas.

El estudio de [9] los filtros pasivos nos ayudan al control de armónicos y a eliminar también inyectan componentes de compensación a la red anulando el efecto de los armónicos tienen la capacidad de ajustarse a los cambios en las condiciones de operación en la red eléctrica y se pueden conectar al sistema de distribución en serie o paralelo para mejorar la calidad de energía. Es por ende que [10] el filtro pasivo, pasa-bajo nos ayuda a eliminar los armónicos debidos a cargas lineales y también debemos estudiar la capacidad de atenuación del filtro para aplicar a la red y mejorar el factor de potencia y la eficiencia energética del sistema de distribución.

Es por ello que [11] el control del filtro activo nos ayuda a compensar el desbalance y distorsión debido a cargas no lineales y con esto se busca implementar un filtro en conexión paralela a la red y así lograr la compensación de corrientes armónicas y de secuencia negativa. Entonces [12] con el filtro activo de potencia se presenta a generar una señal de compensación para reducir la distorsión de los armónicos que estas presentes en un sistema fotovoltaicos autónomo y mejorar la calidad de energía a la distribución.

Al implementar [13] el filtro nos ayuda a eliminar corrientes parasitas y perdidas en la red de distribución y también nos ayuda reducir la vida útil de los elementos o equipos eléctricos de las instalaciones. La investigación hecha por [14] la implementación del algoritmo de identificación permitirá obtener resultados de los coeficientes del modelo del circuito de interconexión entre la red de distribución y el convertidor para luego ser representado en la ecuación de diferencias ya que esto servirá en diferentes tipos de controles digitales con el fin de reducir la distorsión armónica de la red eléctrica y corregir el factor de potencia. [15] se pretende compensar la demanda actual de la eficiencia energética en la red de distribución mediante un desarrollo de convertidor-inversor de fuente de voltaje trifásico de 12 KVA aplicando filtros activos de potencia en sistemas trifásicos de 3 o 4 hilos ya que con este desarrollo aportara al mejor desempeño del sistema.

## 2. MÉTODOLÓGÍA

### A) Teoría ABC Optimización no lineal.

El objetivo de la optimización no lineal es encontrar los valores de las variables de las decisiones optimas de un problema, es decir; encontrar cual es el máximo o el mínimo de una determinada función sujeto a unas condiciones o restricciones en el que constituye las limitaciones a las cuales se encuentra sujeto el problema.

Minimizar:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{1}{2} (iLk - iqk)^2 \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^3 vk * iqk = 0 \quad (2)$$

En la ecuación (3) el voltaje y la corriente se multiplica por un porcentaje de error ( $\lambda$ ) para minimizar la corriente de línea instantánea mediante la corriente de compensación instantánea:

$$L(iqk, \lambda) = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{2} (iLk - iqk)^2 + \lambda \sum_{k=1}^3 vk * iqk = 0 \quad (3)$$

La ecuación (3) se debe derivar con relación a la corriente del filtro ( $\partial iqk$ ), de la misma forma se deriva la variación de error ( $\partial \lambda$ ) para obtener las ecuaciones (4 y 5) respectivamente, con las condiciones estacionaria y de factibilidad de KKT.

$$\frac{\partial L}{\partial iqk} = (iLk - iqk)(-1) + \lambda vk = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = vk iqk = 0 \quad (5)$$

Después de derivar se debe multiplicar entre las ecuaciones por el voltaje de línea ( $vk$ ), ecuación (5), para obtener la ecuación (6) donde se simplificará la potencia activa del filtro.

$$-(iLk - iqk)vk + \lambda vk^2 = 0 \quad (6)$$

$$-iLk vk + iqk vk + \lambda vk^2 = 0 \quad (7)$$

Al eliminar la corriente del filtro ecuación (7) se obtiene la sumatoria de las tres fases de voltaje y corriente del sistema.

$$-\sum iLk vk + \lambda \sum vk^2 = 0 \quad (8)$$

Así se obtiene la potencia trifásica más los errores de variación en el voltaje de línea en ecuación (9).

$$-P_{3\phi} + \lambda \left( \sum vk^2 \right) = 0 \quad (9)$$

Con esto se despeja lambda optimo ( $\lambda$ ) de la ecuación (10) que permitirá el control de los disparos del filtro para las tres fases en la ecuación (11). [37]

$$\lambda = \frac{P}{\sum_{k=1}^3 vk^2} \quad (10)$$

Reemplazando:

$$-iLk + iqk + \lambda vk = 0 \quad (11)$$

$$iqk = iLk - \lambda vk \quad (12)$$

Se obtiene la ecuación de control:

$$iqk = iLk - \left( \frac{P}{\sum vk^2} \right) vk \quad (13)$$

## B) Teoría de Akagi.

El principal objetivo de Akagi es obtener la intensidad activa instantánea y la intensidad reactiva instantánea de tal forma que sean explicados de manera de flujos de potencia entre el sistema de generación y el sistema de receptor por lo que la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea se basa en el diseño de compensadores estáticos de potencia que no necesiten de elementos que almacene energía para poder llevar a cabo la compensación. Para el caso de un sistema a tres hilos es necesario la conversión del sistema vectorial de voltaje e intensidad del sistema a un nuevo sistema de ejes ortogonales  $\alpha, \beta$ , pues se usa la transformada de Park.

### Potencia reactiva en sistema trifásico (balanceado)

La red de distribución trifásica radial (balanceada) con la implementación del filtro activo de potencia que permitirá reducir las perturbaciones en la red como lo es el bajo factor de potencia y los armónicos

Las siguientes ecuaciones servirán para el control de la potencia reactiva:

$$P(t) = [v_a(t) \times i_a(t)] + [v_b(t) \times i_b(t)] + [v_c(t) \times i_c(t)] \quad (14)$$

Como está desfasada 120° entonces tenemos:

$$P(t) = 3v_{rms} \times i_{rms} \times \cos\phi \quad (15)$$

Detalle de los voltajes y corrientes de cada fase:

$$v_a = v_s \cos(\omega t) \quad (16)$$

$$v_b = v_s \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (17)$$

$$v_c = v_s \cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (18)$$

$$i_a = i_s \cos(\omega t + \phi) \quad (19)$$

$$i_b = i_s \cos(\omega t + \phi - 2\pi/3) \quad (20)$$

$$i_c = i_s \cos(\omega t + \phi + 2\pi/3) \quad (21)$$

Entonces la potencia trifásica nos queda así:

$$P_{3\phi}(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P_{3\phi}(t) = & [v_s \cos(\omega t) * i_s \cos(\omega t + \phi)] \\ & + [v_s \cos(\omega t - 2\pi/3) * i_s \cos(\omega t + \phi - 2\pi/3)] \\ & + [v_s \cos(\omega t + 2\pi/3) * i_s \cos(\omega t + \phi + 2\pi/3)] \end{aligned} \quad (23)$$

$$P_{3\phi}(t) = v_s * i_s \left(\frac{2}{3}\right) * \cos\phi = 3v_{rms} * i_{rms} * \cos\phi \quad (24)$$

### Control para filtros activos (balanceados).

En el marco de referencia  $\alpha\beta$ :

$$p = v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta \quad (25)$$

$$q = v_\alpha * i_\beta + v_\beta * i_\alpha \quad (26)$$

Donde:

$p$  = potencia activa

$q$  = potencia reactiva instantánea

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$i_\alpha = \alpha v_\alpha p + \alpha(-v_\beta)q \tag{29}$$

$$i_\beta = \alpha v_\beta p + \alpha v_\alpha q \tag{30}$$

Las ecuaciones (29 y 30) respectivamente sirven para compensar las corrientes instantáneas reactivas ( $i_{q_\alpha}$   $i_{q_\beta}$ ) que se retro alimenta a la transformada de Clark y enviar la señal de corriente para las tres fases (ABC) al control por banda de histéresis y este hacia el filtro.

### 3. RESULTADOS

Para el análisis del filtro activo propuesto se ha tomado un sistema de prueba convencional, tipo radial de distribución que consta de un sistema trifásico balanceado.

#### Flujo de potencia del circuito de prueba

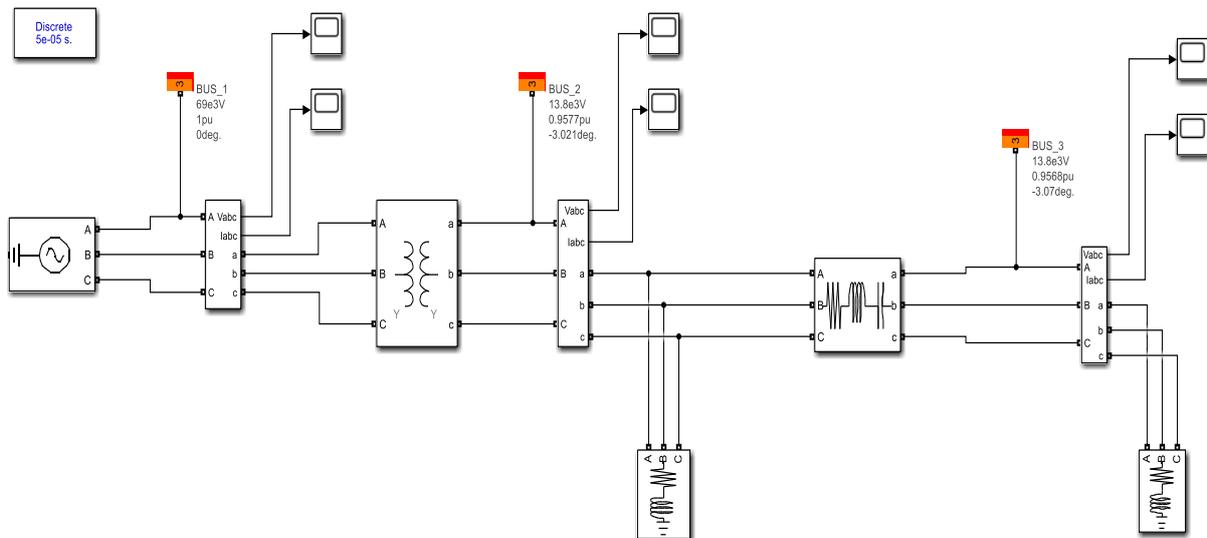


Figura 1. Circuito de distribución trifásico radial (balanceado)

Tabla 1: Datos equivalentes del sistema de prueba

CIRCUITO DE PRUEBA	DATOS
Red Equivalente	V= 69 Kv
Línea	Z= 0.02 + j0.1591 <sup>-3</sup> [Ω]
Transformador	Z= (0.0098+j0.0762) [Ω]
Barra 1	V= 69 Kv
Barra 2	V= 13.8 Kv
	Carga: 10MW, fp: 0.85↓
Barra 3	V= 13.8 Kv
	Carga: 3MW, fp: 0.9↓

### Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal

De igual manera al circuito se le inyectará una carga no lineal para observar cómo afecta al sistema, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

**Tabla 2:** Porcentajes de los armónicos de voltaje del circuito de prueba con carga no lineal

Barras	Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)					
	1	5	7	11	13	17
<b>1</b>	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
<b>2</b>	100	1.60	1.09	1.26	0.99	1.03
<b>3</b>	100	1.73	1.18	1.37	1.07	1.12

**Tabla 3:** Porcentajes de los armónicos de corriente del circuito de prueba con carga no lineal

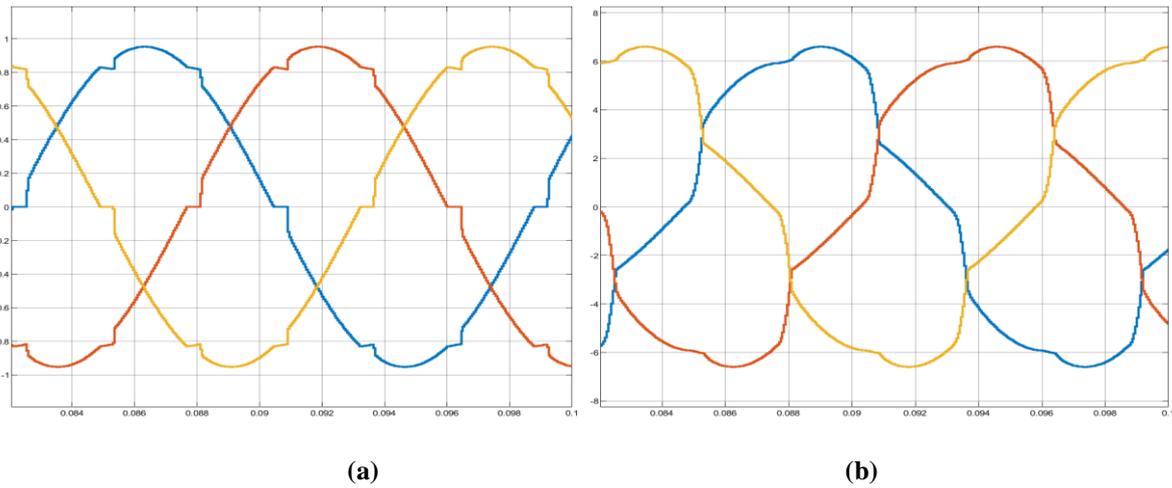
Barras	Frecuencia Armónica de Corriente (I%)					
	1	5	7	11	13	17
<b>1</b>	100	3.49	1.64	1.28	0.83	0.70
<b>2</b>	100	3.50	1.64	1.38	0.83	0.70
<b>3</b>	100	10.82	5.08	3.99	2.60	2.15

**Tabla 4:** Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del circuito de prueba con carga no lineal

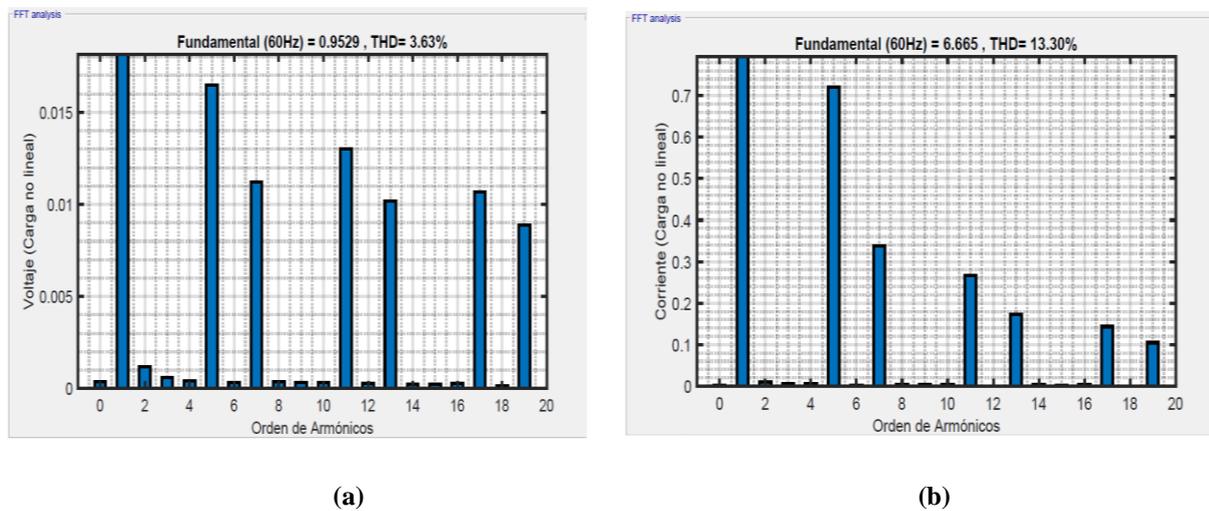
Barras	$THD_v \rightarrow \%$	$THD_i \rightarrow \%$
<b>1</b>	0.17	4.29
<b>2</b>	3.35	4.30
<b>3</b>	3.63	13.30

En las (Fig. 2) se indicará la señal de la onda distorsionada de voltaje y corriente debido a la conexión de la carga no lineal en la barra de carga del sistema que es la de mayor concentración de los armónicos que inyectan hacia la red de distribución.

Al ingresar la carga no lineal los datos obtenidos en las tablas anteriores reflejan el cambio que sufre el sistema de prueba con los efectos de la distorsión armónica total (THD) (Fig. 3) como en las diferentes escalas de los armónicos y esto a su vez disminuye la calidad de energía en el sistema.



**Figura 2.** Señal de la onda armónica con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente



**Figura 3.** Orden de los armónicos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente

**Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal conectado el filtro con optimización no lineal (FTO).**

En este caso al circuito de prueba se le conecta el filtro con la teoría de optimización (FTO), que es uno de los métodos investigados que permitirán reducir el porcentaje de los armónicos en las distintas barras de conexión del circuito, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

**Tabla 5:** Porcentajes de los armónicos de voltaje del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)

Barras	Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)					
	1	5	7	11	13	17
<b>1</b>	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
<b>2</b>	100	0.17	0.10	0.13	0.12	0.13
<b>3</b>	100	0.26	0.18	0.22	0.20	0.21

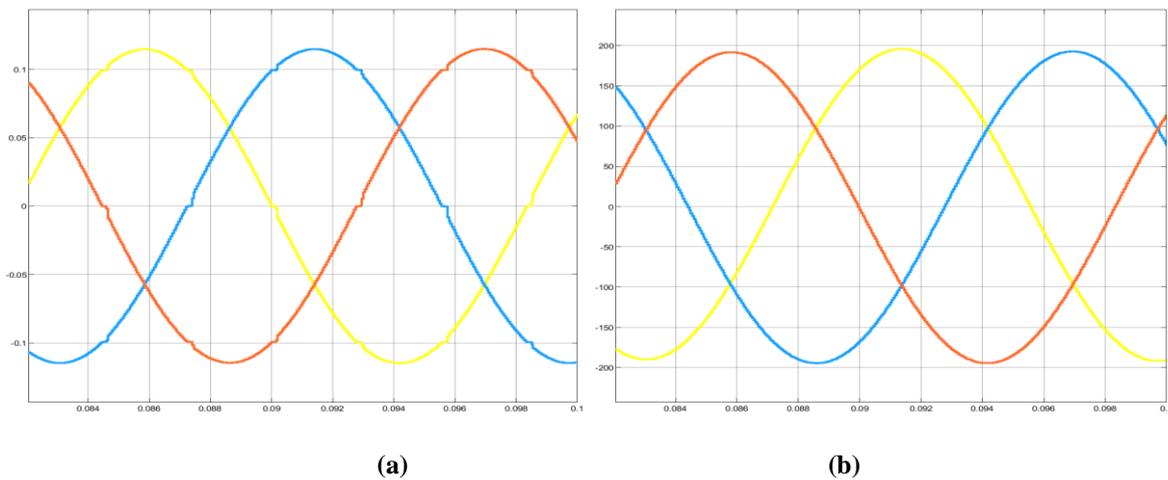
**Tabla 6:** Porcentajes de los armónicos del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)

Barras	Frecuencia Armónica de Corriente (I%)					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.14	0.10	0.07	0.06	0.04
2	100	0.14	0.10	0.07	0.06	0.04
3	100	11.19	5.59	4.41	3.13	2.18

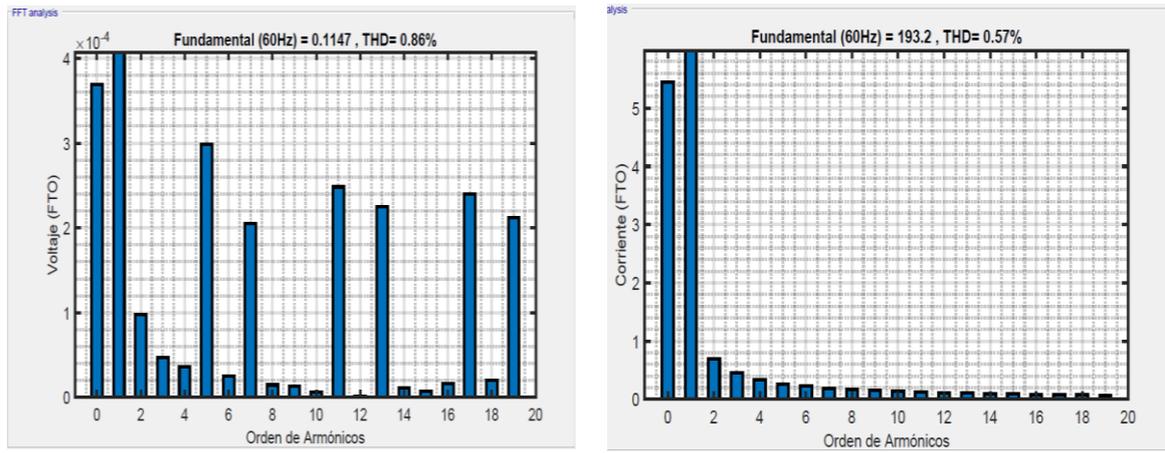
**Tabla 7:** Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)

Barras	$THD_v \rightarrow \%$	$THD_i \rightarrow \%$
1	0.17	0.57
2	0.54	0.57
3	0.86	0.57

El filtro con optimización no lineal está modelado para compensar la potencia reactiva y reducir la presencia de los armónicos en porcentaje aceptable para que el sistema continúe entregando una energía con menor índice de armónicos, con esto al conectar el filtro (FTO) al sistema de prueba podemos verificar la reducción de los armónicos en la onda sinusoidal de voltaje y corriente (Fig. 4) a un porcentaje favorable para la calidad de energía del sistema de distribución, de la misma forma se puede observar que el orden de los armónicos también disminuyen (Fig. 5).



**Figura 4.** Señal de onda armónica conectado el (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente



(a)

(b)

**Figura 5.** Orden de los armónicos conectado el (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente.

**Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal conectado el filtro con la teoría de Akagí (FTA)**

En este caso al circuito de prueba se le conecta el filtro con la teoría de Akagí, que es el otro método investigado que permitirá reducir satisfactoriamente el porcentaje de los armónicos en las distintas barras de conexión del circuito, este filtro en comparación con el filtro de optimización no lineal es más eficiente para contrarrestar las perturbaciones producidas por la carga no lineal del sistema de prueba, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

**Tabla 8:** Porcentajes de los armónicos de voltaje del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA).

Barras	Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
2	100	0.06	0.04	0.02	0.02	0.02
3	100	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03

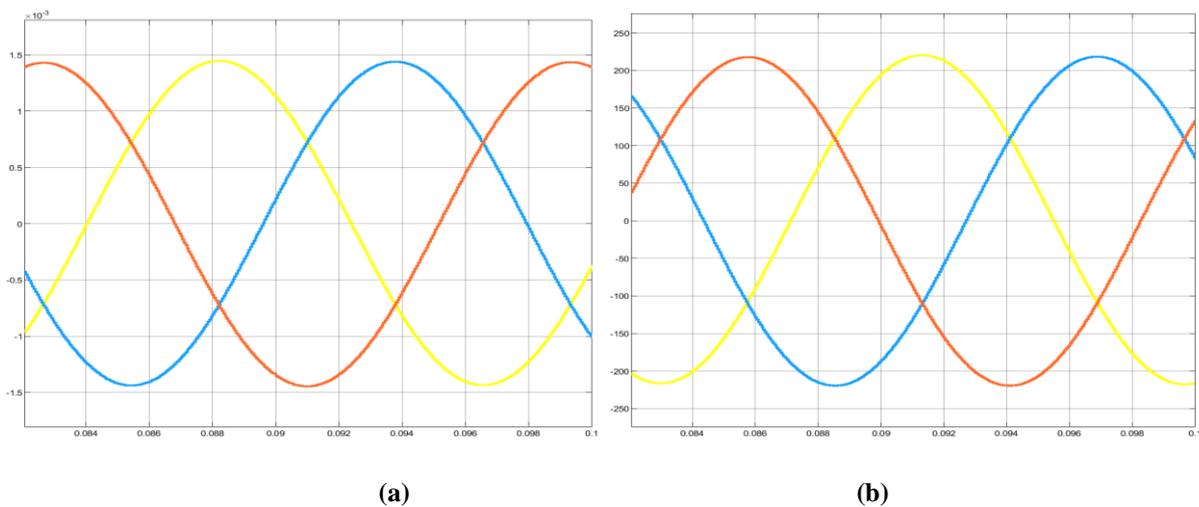
**Tabla 9:** Porcentajes de los armónicos de corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA).

Barras	Frecuencia Armónica de Corriente (I%)					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03
2	100	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03
3	100	11.36	5.58	4.48	3.18	2.80

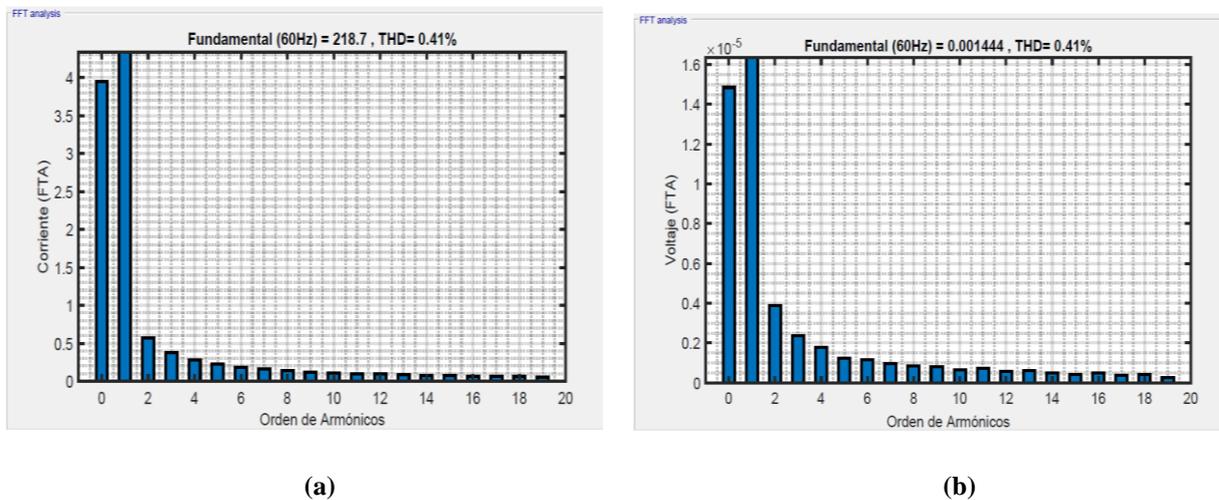
**Tabla 10:** Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)

Barras	$THD_v \rightarrow \%$	$THD_i \rightarrow \%$
1	0.17	0.41
2	0.24	0.41
3	0.41	0.41

Como se observa los resultados en las tablas anteriores conectando el filtro con la teoría de Akagí al circuito de prueba se puede verificar que este método reduce los armónicos en un porcentaje más que el (FTO) por lo cual el (FTA) se destaca en comparación de otros métodos convencionales que existe para la reducción de armónicos. Este método al compensar la potencia reactiva instantánea refleja su eficiencia al reducir las perturbaciones en las ondas senoidales de voltaje y corriente (Fig. 6) de igual manera la distorsión armónica total (Fig. 7), por lo que ha este filtro se lo conectara a otro circuito modelada con datos reales de un circuito de distribución para comprobar su validez.



**Figura 6.** Señal de la onda armónica con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente.



**Figura 7.** Orden de los armónicos conectado el (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente

#### 4. CONCLUSIONES

- En el desarrollo de optimización no lineal se utiliza las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker donde se encuentra un  $\lambda$  óptimo para el control de los disparos del filtro y reducir los armónicos cuando ingrese una carga no lineal, entonces la teoría de Akagi nos permite obtener la corriente activa instantánea y la corriente reactiva instantánea para realizar la compensación de la potencia reactiva donde esta teoría cumple con las expectativas de minimizar los armónicos en un mayor porcentaje que la teoría de optimización.
- Se efectúa una programación de las teorías en estudio para realizar el control de un filtro activo para compensar armónicos programando las diferentes condiciones y ecuaciones para las dos teorías en el programa Matlab y con esto la modelación de los filtros en el programa Simulink, donde se realizó las simulaciones en los circuitos de prueba.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Danfoss, "Supresión segura de armónicos para su instalación", Madrid-España: Miniparc 3, 2014.
- [2] M. F. F. Q. H. Bueno, "Diseño y Construcción de Un Filtro Activo para Eliminar Armónicos de una Red Bifásica Residencial.", Cuenca, 2014.
- [3] J. Calderón, "Diseño y comparación mediante simulación de dos técnicas de control PI y SMC para el filtro activo trifásico de tres hilos en topología paralelo", Quito, 2017.
- [4] A. E. A. J. Marulanda, «"Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia",» Tecnura, vol. 21, n° 52, pp. 1-18, 2017.
- [5] Danfoss, "Mitigación de armónicos", Madrid, 2010.
- [6] C. G. C. Flores, "Sistema de censado, acondicionamiento y protección para un filtro activo de 2kva", México, 2014.
- [7] D. Murillo, "Compensación de armónicos con un filtro activo de potencia", Colombia, 2010.
- [8] O. Trujillo, "Compensación de corriente usando filtro activo de potencia en derivación para fuentes armónicas de tensión", Colombia, 2015.
- [9] D. M. R. L. A. Alzate, «"Prototipo para la compensación de armónicos en sistema trifásico",» Tecnura, vol. 20, n° 96-105, pp. 1-10, 2016.

- [10] J. Ferrero, "Filtro para la frecuencia de conmutación de un inversor fotovoltaico", Valladolid, 2018.
- [11] C. Hernández, "Control de un filtro activo paralelo basado en un convertor fuente de voltaje de 4-piernas aplicado a sistemas de distribución de 4Hilos", Santiago de Chile, 2016.
- [12] L. C. G. M. J. C. C. Caballero, «"Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo",» Ecorfan, vol. 3, n° 976-84, pp. 1- 9, 2016.
- [13] Electro Industria, «"Armónicos",» Electro Industria, vol. 1, pp. 1-3, 2015.
- [14] J. V. J. R. F. Peña, «Sistema de identificación para filtros activos de potencia,» Maskana, vol. 1, p. 1, 2014.
- [15] Í. Mogrovejo, "Control predictivo generalizado aplicado a un inversor multinivel en cascada para diseño de un filtro activo de potencia", Cuenca, 2015.
- [16] D. F. O. Tellez, «Control Óptimo,» 2013. [En línea]. Available: <https://studylib.es/doc/6004762/control-%C3%B3ptimo---divisi%C3%B3n-de-estudios-de-posgrado>. [Último acceso: 31 Octubre 2019].