



## Diseño, control y simulación de un nuevo filtro de armónicos para redes eléctricas de baja tensión

*Design, control and simulation of a new harmonic filter for low voltage electrical networks*

*Projeto, controle e simulação de um novo filtro harmônico para redes elétricas de baixa tensão*

Ismael Elías Erazo-Velasco <sup>I</sup>

[erazoismael@yahoo.com](mailto:erazoismael@yahoo.com)

<https://orcid.org/0000-0002-7647-4611>

**Correspondencia:** [erazoismael@yahoo.com](mailto:erazoismael@yahoo.com)

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

\***Recibido:** 20 de septiembre de 2021 \***Aceptado:** 30 de septiembre de 2021 \* **Publicado:** 4 de octubre de 2021

- I. Investigador Independiente, Experto en Sistema de Control y Automatización, Master en Energía Eléctrica y Electrotecnia en ASTRAKHAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY, Ingeniero Eléctrico de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.



## Resumen

El objetivo de este trabajo es desarrollar, diseñar y modelar un filtro inteligente para armónico eléctricos en redes de baja tensión, con la finalidad de dar mayor confiabilidad, seguridad y eficiencia a las redes eléctricas de baja tensión, esto lo lograremos usando una nueva técnica de filtración basado en la transformada de Clark y Park e implementando sistema de control a la red basado en la lógica difusa y en el control difuso.

**Palabras clave:** Transformada de Clark; teoría PQ; filtro; distorsión armónica; control difuso.

## Abstract

The objective of this work is to develop, design and model an intelligent filter for electrical harmonics in low voltage networks, in order to give greater reliability, safety and efficiency to low voltage electrical networks, we will achieve this using a new technique of filtering based on the Clark and Park transform and implementing a network control system based on fuzzy logic and fuzzy control.

**Keywords:** Clark transform, PQ theory, filter, harmonic distortion, fuzzy control.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é desenvolver, projetar e modelar um filtro inteligente para harmônicos elétricos em redes de baixa tensão, a fim de dar maior confiabilidade, segurança e eficiência às redes elétricas de baixa tensão, o conseguiremos utilizando uma nova técnica de filtragem baseada na transformação de Clark e Park e implementação de um sistema de controle de rede baseado em lógica fuzzy e controle fuzzy.

**Palavras-chave:** Transformada de Clark, teoria PQ, filtro, distorção harmônica, controle fuzzy.

## Introducción

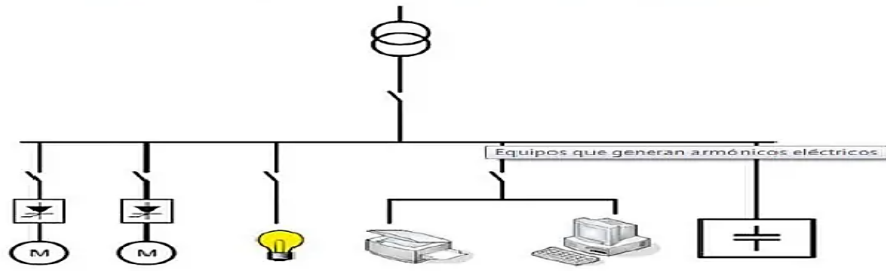
Los armónicos eléctricos son perturbaciones que se presentan en la onda de corriente y voltaje, producidas por cargas no lineales; estas perturbaciones son múltiplos de la frecuencia fundamental.

Los armónicos característicos: tercero (150 Hz), quinto (250 Hz) y séptimo (350 Hz)

Hoy en día, casi todos los dispositivos electrónicos y equipos que utilizamos en nuestra vida diaria, como televisores, computadoras, teléfonos móviles, etc., Generan armónicos de voltaje y corriente que crean problemas muy graves, como:

1. Pérdida de potencia.
2. Sobrecalentamiento de transformadores y conductores.
3. Daños graves a la vida útil del equipo eléctrico.

**Fig. 1:** Fuentes generadoras de armónicos.



### Distorsión armónica total THD

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC 60050) define un componente armónico como un componente cuyo orden es mayor que 1 serie de Fourier de cantidad periódica.

Es decir, en un sistema de CA, los armónicos oscilan a una frecuencia múltiplo de la frecuencia de operación principal (60 Hz en Ecuador).

La distorsión armónica total (THD) es un parámetro que indica la cantidad de distorsión de voltaje o corriente causada por los armónicos en una señal.

La definición matemática de THD (en este caso la fórmula es con la tensión, pero con la corriente será igual):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n(t)^2}}{I_0} \quad (1)$$

Donde

$I_0$  - Corriente nominal de la red a la frecuencia principal

$\sum I_n \ n > 1$  - Corriente con componente armónico

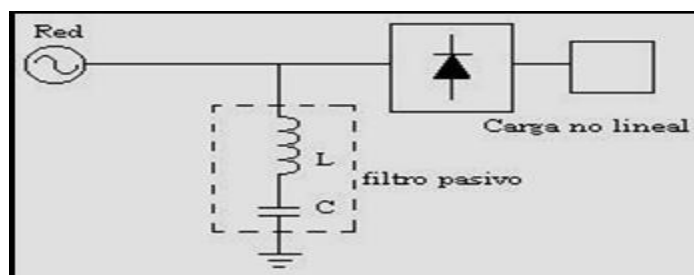
## Descripción del problema

La forma más fácil de eliminar los armónicos eléctricos en una red es establecer filtros entre la fuente de alimentación y la carga, actualmente hay 2 tipos de filtros ampliamente utilizados que son pasivos y activos, pero estos filtros tienen muchas desventajas, como la que describiremos a continuación:

### Desventajas de los filtros pasivos

- Bobinas y condensadores de gran tamaño.
- Mala respuesta dinámica a los cambios de carga.
- Producen efectos secundarios en la red eléctrica debido a la alta impedancia de las bobinas y condensadores.

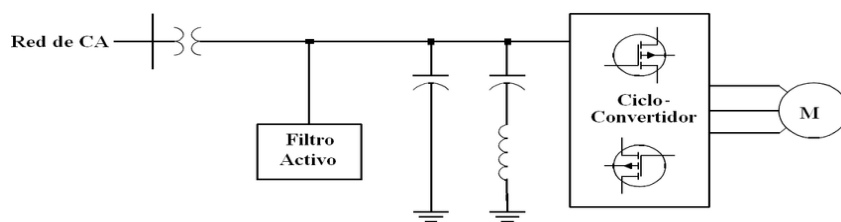
Fig 2: Filtro pasivo.



### Desventajas de los filtros activos

- Su principal desventaja es que debe instalarse individualmente para una carga específica.
- Funciona bien solo con cargas de baja potencia.
- Son muy costosos y difíciles de realizarle mantenimiento.

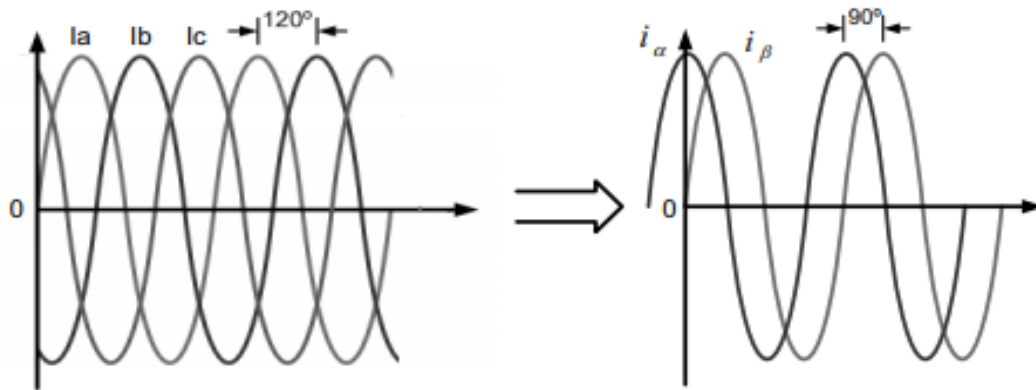
Fig 3: Filtro activo.



### Transformación de Clark

La transformada de Clarke transforma los componentes del dominio del tiempo de un sistema trifásico (marco abc) en dos componentes de estructura estacionaria ortogonal ( $\alpha\beta$ ). La transformación de parque transforma los dos componentes del marco  $\alpha\beta$  en un sistema de referencia de rotación ortogonal (dq). [3]

**Fig 4:** Conversión de un sistema trifásico de dos fases.



La figura 4 representa la conversión de un sistema trifásico de dos fases.

Esta transformación se puede expresar en forma matemática de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

Y si aplicamos la transformada inversa de Clark, volvemos a nuestro sistema trifásico, esto se expresa matemáticamente de la siguiente manera: [1]

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

## Teoría PQ

Esta teoría fue desarrollada originalmente para sistemas trifásicos sin neutro, usando vectores espaciales instantáneos para definir un sistema trifásico en un sistema ortogonal biaxial, llamado  $\alpha$ - $\beta$ , que define completamente un sistema trifásico. [1]

El sistema trifásico habitual de tensiones y corrientes, variable en el tiempo, se refiere al sistema de tres ejes a, b y c, fijos en el plano y compensados por  $2\pi / 3$ . Este sistema trifásico se convierte en un sistema axial  $\alpha$ - $\beta$  de dos fases utilizando las transformadas de Clark.

La potencia instantánea se define como la suma del producto de los valores instantáneos de voltaje y la intensidad de cada fase, es decir, [1,2]

$$P = \sum_k V_k I_k \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

En el nuevo sistema de ejes  $\alpha$ - $\beta$ , que define un sistema trifásico, se debe asegurar la igualdad del valor instantáneo de potencia, independientemente del sistema de coordenadas de referencia seleccionado, por lo que se debe cumplir lo siguiente: [1]

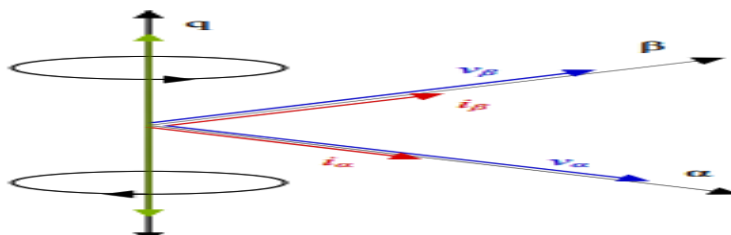
$$P = V_a * I_a + V_b * I_b + V_c * I_c = V_\alpha * I_\alpha + V_\beta * I_\beta \quad (5)$$

Y definiremos el vector espacial, llamado potencia eléctrica aparente instantánea, como el producto cruzado de tensiones y corrientes de la siguiente manera: [1]

$$Q = V_\alpha \times I_\beta + V_\beta \times I_\alpha \quad (6)$$

Este vector está ubicado en un eje perpendicular al plano  $\alpha$ - $\beta$  y consta de dos requisitos, que son el vector producto del voltaje a lo largo de un eje por la corriente a lo largo del otro eje. En representación gráfica, estos productos son vectores, cuya dirección es perpendicular al plano formado por los ejes  $\alpha$ - $\beta$  y en sentido antihorario, como se muestra en la siguiente figura. [1,3]

**Fig 5:** Representación espacial de la potencia aparente instantánea.



La potencia  $P$  se expresa en vatios y es el producto de tensiones y corrientes pertenecientes a los mismos ejes, mientras que la potencia  $q$  no se puede expresar en vatios o watt, ya que es el producto de tensiones y corrientes ubicadas en diferentes ejes perpendiculares. [1]

Es por eso que este último poder se llama poder de imaginación instantánea. La combinación de las dos ecuaciones anteriores se puede expresar de la siguiente manera: [1]

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{pmatrix} \quad (6)$$

multiplicando por la matriz inversa y aplicando un poco de álgebra podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \cdot \begin{pmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \cdot \begin{pmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \cdot \begin{pmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{\alpha q} \\ I_{\beta q} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Donde el valor de cada componente es el siguiente:

Corriente activa instantánea en el eje  $\alpha$ :

$$I_{\alpha p} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} P \quad (9)$$

Corriente reactiva instantánea en el eje  $\alpha$ :

$$I_{\alpha q} = \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} Q \quad (10)$$

Corriente activa instantánea en el eje  $\beta$ :



$$I_{\beta p} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} P \quad (11)$$

Corriente reactiva instantánea según el eje  $\beta$ :

$$I_{\beta q} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} Q \quad (12)$$

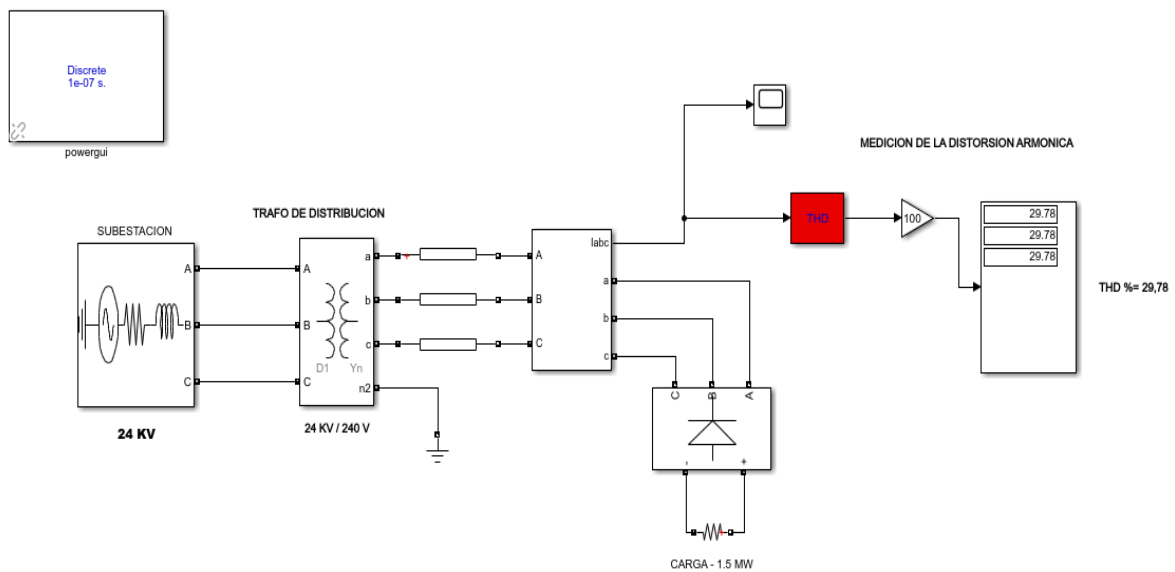
La potencia instantánea en los ejes  $\alpha$ - $\beta$ , como se expresó anteriormente, como la suma de los grados en cada eje, es:

$$P = P_{\alpha} + P_{\beta} = \frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p + \frac{-v_{\alpha}v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q + \frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p + \frac{v_{\alpha}v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (13)$$

### Diseño y modelado del filtro

Antes de diseñar el filtro vamos a realizar un análisis en la red de distribución de baja tensión para determinar la cantidad de distorsión armónica total que existe, en la figura siguiente:

**Fig. 6:** Análisis de la distorsión armónica de la red eléctrica.



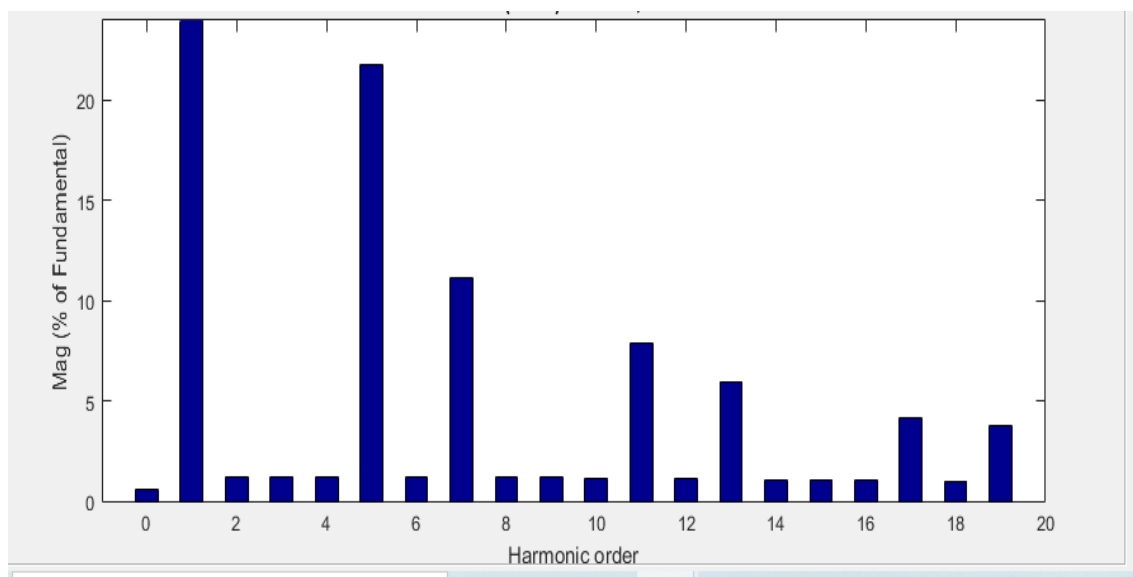
Si analizamos los resultados obtenidos podemos ver la forma de onda de corriente está muy distorsionada eso es por la presencia de armónicos de 3, 5 y 7 orden y el THD % = 29,78

**Fig. 7:** Forma de la onda distorsionada trifásica de corriente.



Otras cosas que podemos análisis de los resultados es la distribución en distorsión armónica en el espectro de frecuencia.

**Fig. 8:** Espectro en frecuencia de la distorsión armónica.

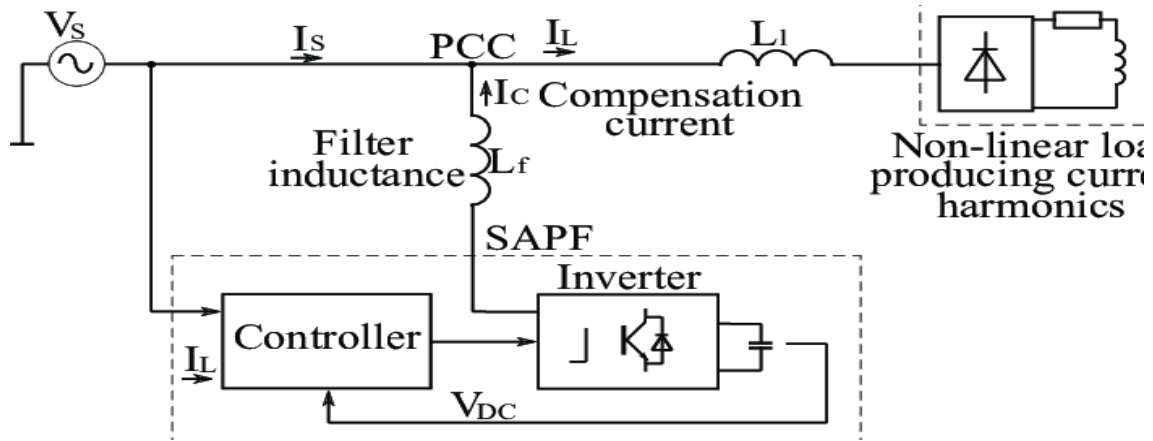


## Esquema principal y diseño de filtro

El esquema principal del circuito para el filtro consta de partes las cuales son las siguientes

1. Sistema de control difuso
2. Componentes

Fig 9. Esquema del filtro.

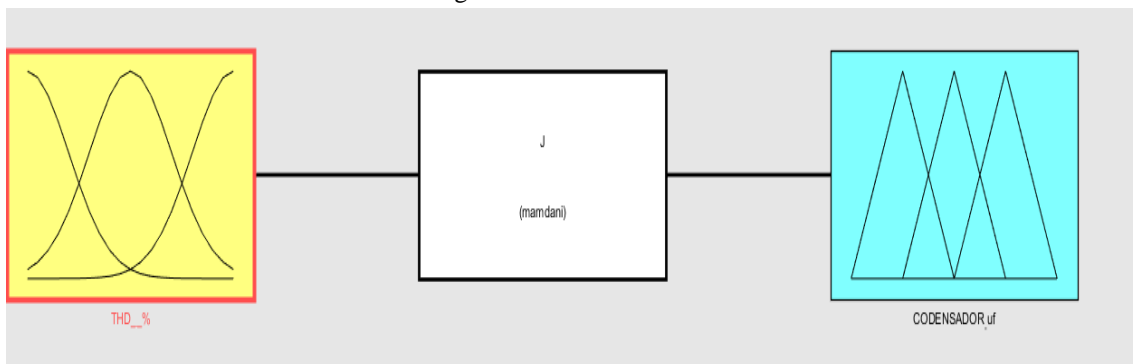


## Sistema de control difuso

Para desarrollar un control inteligente, necesita conocer las variables dependientes e independientes del controlador:

- Variable de entrada -- Distorsión armónica -THD%.
- Variable de salida – Condensador -uF.

Fig 10. Variables de control.

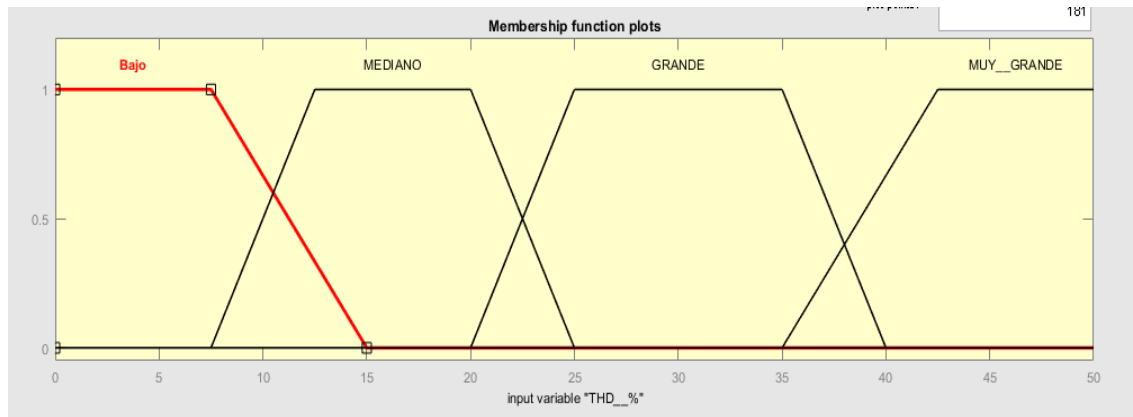


### Variable de entrada - THD%

Para el diseñador del controlador, vamos a utilizar los valores de distorsión armónica medidos, que son  $THD = 29,78\%$ , y también tendremos en cuenta que puede haber interferencia externa en el rango del 10 al 25%, con lo cual obtenemos un rango de distorsión de 0 a 54,78 %., utilizaremos funciones trapezoidales de variables lingüísticas:

1. Bajo
2. Mediano
3. Grande
4. Muy grande

**Fig. 11:** Variables lingüística y funciones de pertenencia del THD%.



### Función de salida

Como variable de salida tenemos la capacitancia del capacitor, el rango de las funciones de pertenencia de la variable de salida estará en el rango de 0 a 1200 microfaradios.

El valor de la capacidad de capacitor se usa la siguiente tabla la cual la hallo de manera empírica:

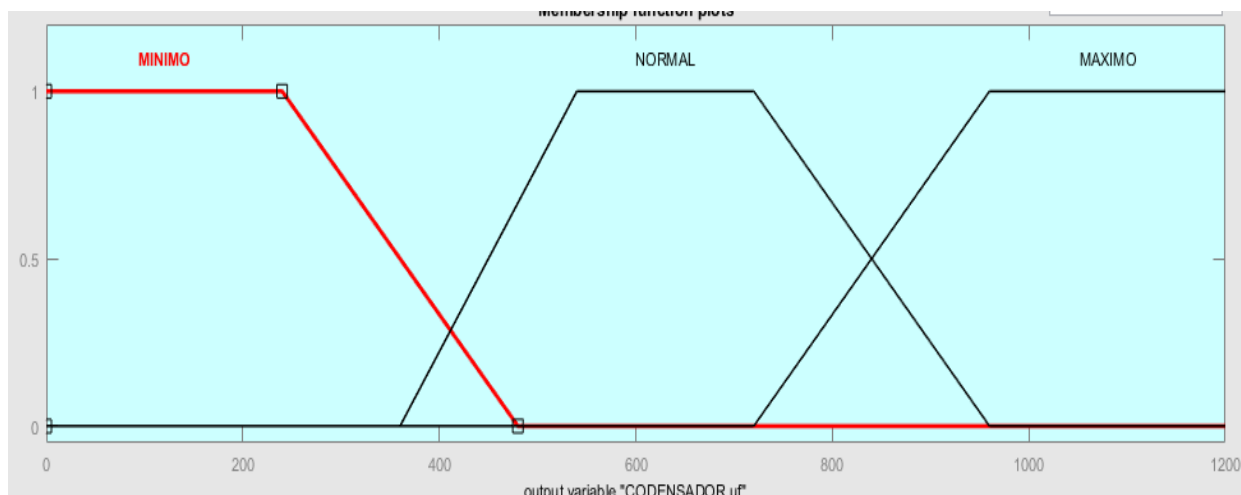
**Tabla 1:** Para la elección del capacitor.

Potencia Eléctrica MW	THD % - Interna	THD % - Externa	Capacitor $\mu\text{F}$
0,5–2,5	10- 20 %	0 – 10%	800 $\mu\text{F}$

0,5–2,5	30–50 %	10–25%	1200 $\mu\text{F}$
2,5–5	10- 20 %	0 – 10%	2000 $\mu\text{F}$
2,5–5	30–50 %	10–25%	3500 $\mu\text{F}$
5–10	10- 20 %	0 – 10%	4000 $\mu\text{F}$
5–10	30–50 %	10–25%	5000 $\mu\text{F}$

Las funciones de pertenencia a utilizar son trapezoidales. Para definir la función de pertenencia de la variable de salida, usaremos los siguientes términos lingüísticos:

**Fig. 12:** Variables lingüística y funciones de pertenencia del capacitor.



### Reglas semánticas para el control difuso

En esta etapa debemos introducirle información al controlador acerca del proceso que queremos controlar, estas reglas semánticas se las puede obtener mediante el proceso de prueba, acierto y error o mediante el conocimiento de algún operador experto en el proceso.

1. Si (La distorsión THD% es baja) entonces (cantidad de Faradios es el mínimo)
2. Si (La distorsión THD% es media) entonces (cantidad de Faradios es normal)

3. Si (La distorsión THD% es grande), entonces (cantidad de Faradios es máximo)
4. Si (La distorsión THD% es muy grande) entonces (cantidad de Faradios es máximo)

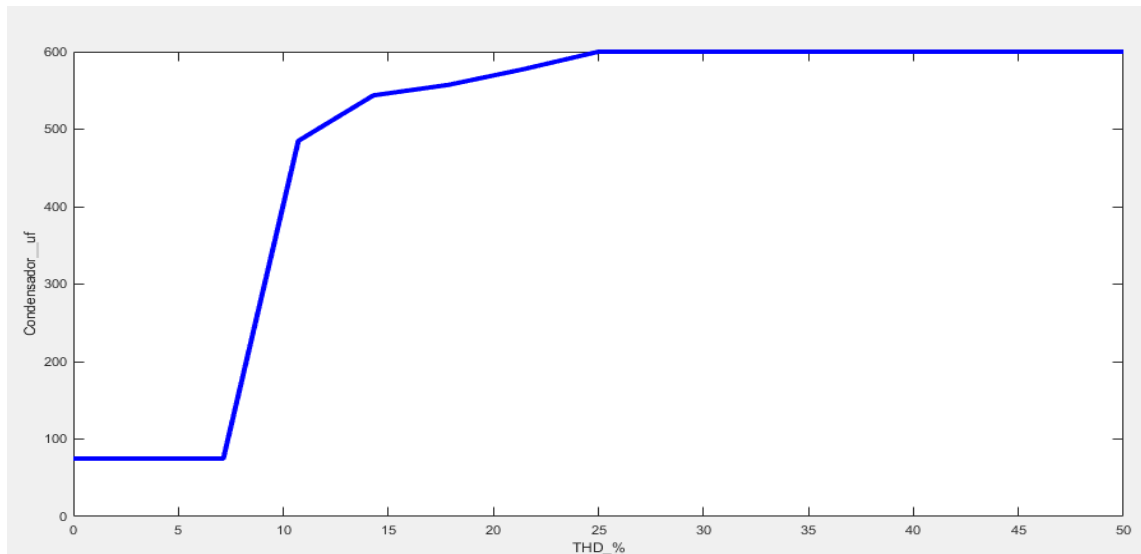
### Acciones de control y curva de control

Las acciones de control básicamente son los mecanismos por el cual el controlador busca encontrar la estabilidad de sistema comparando señal de referencia con la señal de error y la curva de control solo nos muestra la dinámica o la rapidez con el cual el controlador llega a la estabilidad y a la señal de referencia.

Para nuestro este ejemplo de controlador difuso solo buscara estabilidad ya que el sistema es de lazo abierto.

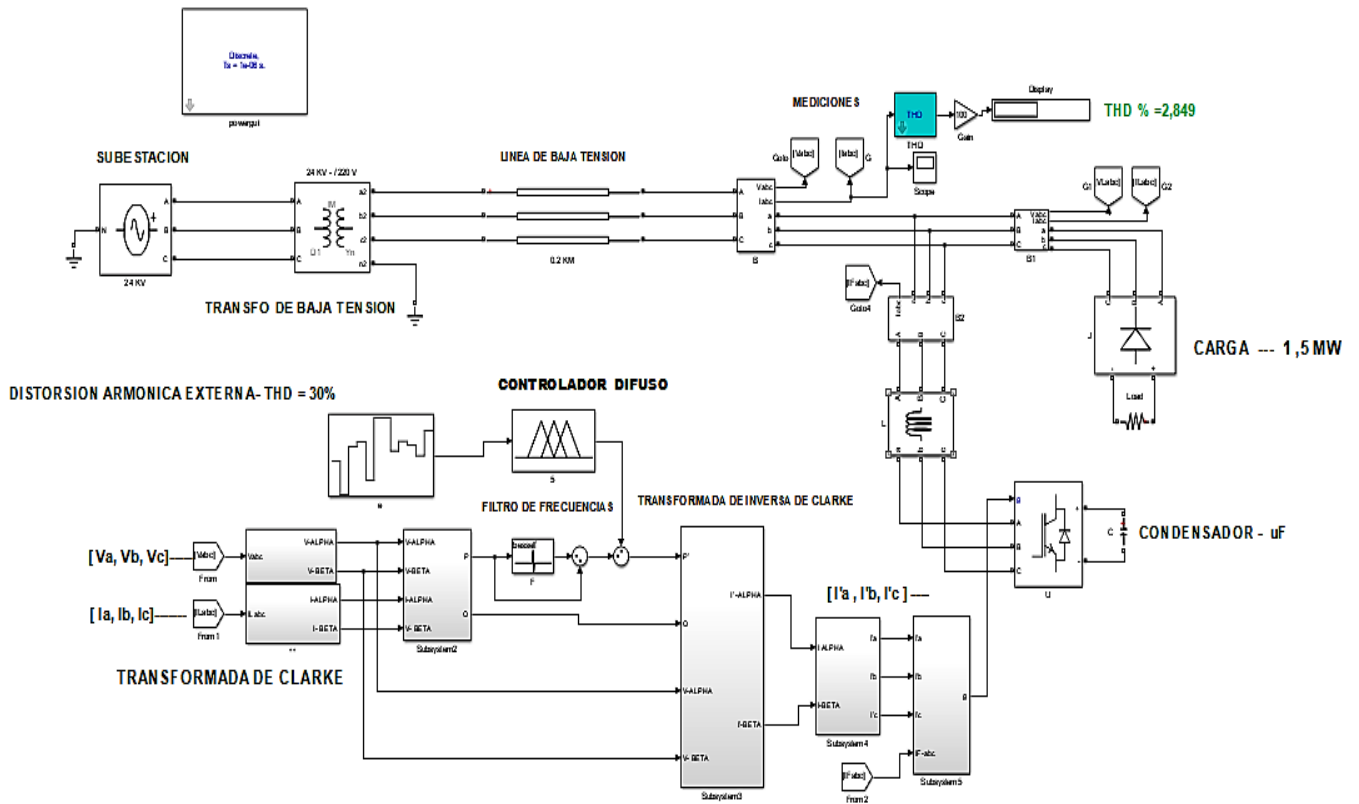
En la figura 14 se muestra como varia la capacidad de faradios que entrega el capacitor a medida que la distorsión armónica THD % aumenta.

**Fig. 13:** Curva de control.



Esquema del circuito del filtro implantando en Matlab-Simulink

Fig. 14: Esquema de filtro para armónicos.

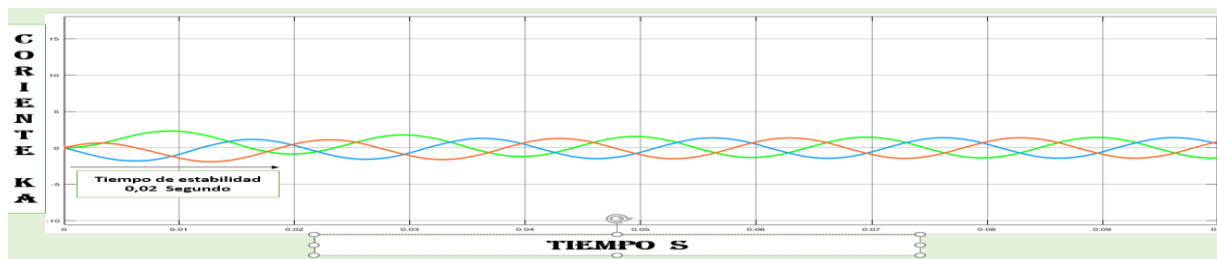


Después de todas las conexiones y simulaciones en Simulink obtuvimos los siguientes resultados:

X – Eje de la abscisa – Representa el tiempo medido en segundos.

Y – Eje de las ordenada - Amplitud de las corrientes trifásicas.

Fig. 15: Resultados de la simulación.



Vemos que la onda de corriente que obtuvimos como resultado de la simulación es sinusoidal, también podemos ver que las distorsiones armónicas medidas por el dispositivo son THD = 2.849, que es casi cero.

### **Ventajas:**

- No causa efectos secundarios en la red eléctrica;
- Sistema inteligente, mide, analiza y realiza maniobras de corrección automáticamente
- Los resultados de todas las mediciones se pueden ver en tiempo real desde una computadora utilizando la comunicación en serie con el controlador;
- Respuesta dinámica rápida a los cambios de carga;
- Funciona para todo tipo de tamaños de carga.

### **Desventajas:**

- Para calibrar el controlador inteligente, necesita conocer los datos de distorsión armónica y porcentaje de carga

### **Conclusiones**

El diseño y simulación del filtro permitió una mejora en la calidad de la energía en las redes de distribución de energía de baja tensión, lo cual fue aprobado por el diseño en el programa SIMULINK.

El concepto de filtro de armónicos ha demostrado ser más eficiente que los filtros pasivos, activos e híbridos existentes gracias a la introducción del control inteligente

El controlador de filtro inteligente mide, analiza y toma medidas correctivas automáticamente, lo que hace que este sistema sea inteligente

Los resultados de todas las mediciones se pueden ver en tiempo real desde una computadora mediante comunicación en serie con el controlador.

### **Referencias**

1. Lumbreras, M. R. (mayo de 2006). Filtros activos de potencia para la compensación instantánea de armónicos. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya . crp. 36- 40



2. Ramiro, f. j. (2003). comparativa convertidores HVDC-VSC. Universidad de Sevilla. ctp. 56- 60
3. David Fernando Barba Naranja, A. D. (2012). Construcción e implementación del sistema de control vectorial de orientación de campo directo para un motor de inducción. Ecuador- Quito: Escuela Politécnica Nacional. ctp. 20- 30.

©2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)