

**CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO
CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO
CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.**

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

AUTOR: PABLO NICOLÁS TUPIZA GARCÍA
TUTOR: WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS

Quito -Ecuador
2022

Pablo Nicolás Tupiza García

CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022
Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Pablo Nicolás Tupiza García (Y'1998). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio “Juan Pío Montúfar”, con título de bachiller en ciencias generales. Estudiante de último nivel de la carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la compensación de armónicos en la red de distribución eléctrica mediante filtro activo unificado trifásico. ptupizag@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Wilson David Pavón Vallejos (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. Candidato a doctor por la Universidad de Ferrara – Italia. wpavon@est.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

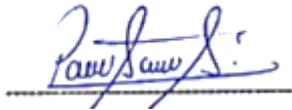
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Pablo Nicolás Tupiza García con documento de identificación N°
1722715636 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, 04 de mayo del año 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo Nicolás Tupiza García', is written over a horizontal line.

Pablo Nicolás Tupiza García
1722715636

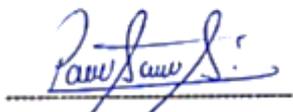
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Yo, Pablo Nicolás Tupiza García con documento de identificación No. 1722715636, 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: “Control de armónicos de corriente mediante la implementación de un filtro activo unificado usando control proporcional integral en el sistema de distribución con generación fotovoltaica.”, 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, 04 de mayo del año 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo Nicolás Tupiza García', is written over a horizontal dashed line.

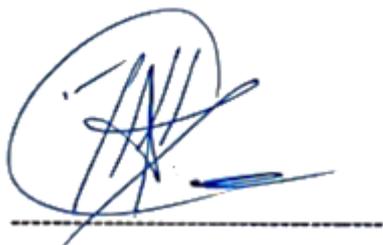
Pablo Nicolás Tupiza García
1722715636

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Wilson David Pavón Vallejos con documento de identificación N° 1719224311, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA. realizado por Pablo Nicolás Tupiza García con documento de identificación N° 1722715636, 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, 04 de mayo del año 2022

Atentamente,



Ing. Wilson David Pavón Vallejos M. Sc.

1719224311

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract	1
1. Introducción	2
2. Marco Teórico.....	2
2.1 Distribución eléctrica en un SEP.....	2
2.2 Calidad de energía	3
2.3 Consecuencias de los armónicos THDi	5
2.4 Herramientas Matemáticas	5
2.5 Filtros Activos	6
2.6 Tipos de filtros activos de potencia	6
2.7 Filtro activo de potencia unificado con una fuente fotovoltaica (UAPF-PV) ..	7
3. Planteamiento del problema.....	9
3.1 Conexión del filtro UAPF-PV	9
3.2 Control para el filtro serie.....	10
3.3 Control para el filtro paralelo	11
3.4 Control Fuente DC.....	12
3.5 Caso de estudio	12
4. Análisis de resultados	13
5. Conclusiones	15
6. Trabajos Futuros	16
7. Referencias.....	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.....	2
Figura 2. Conexión de un filtro en paralelo.....	6
Figura 3. Conexión de un filtro en serie.....	6
Figura 4. Esquema de conexión de un UAPF	7
Figura 5. Central fotovoltaica.....	7
Figura 6. Generación de autoconsumo.....	7
Figura 7. Convertidor DC/DC.....	8
Figura 8. Pseudocódigo del proceso:.....	9
Figura 9. Diseño del Filtro activo unificado (UAPF-PV)	10
Figura 10. Control del filtro serie.....	11
Figura 11. Control del filtro shunt.....	12
Figura 12. Sistema 13 barras IEEE	13
Figura 13. Voltaje trifásico [p.u] de la Barra 7	13
Figura 14. Voltaje trifásico [p.u] de la carga.....	13
Figura 15. THDV [%] en la carga	14
Figura 16. THDV [%] en la barra 7.....	14
Figura 17. Potencia suministrada por la barra 7	14
Figura 18. Potencia del filtro UAPF-PV	15
Figura 19. Corriente inyectada por el UAPF-PV	15
Figura 20. Onda de voltaje resultante al conectar el UAPF-PV.....	15
Figura 21. Voltajes [p.u] del sistema de 13 barras	15

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Voltajes típicos en MT	3
Tabla 2. Voltajes típicos en BT	3
Tabla 3. Límites de THD en voltaje dados por el estándar IEEE 519-2014	3
Tabla 4. Límites de THD en corriente dados por el estándar IEEE 519-2014	4
Tabla 5. Tipos de paneles fotovoltaicos	8
Tabla 6. Valores de las constantes del control PI	12
Tabla 7. Datos del sistema	13
Tabla 8. Datos del transitorio	14

CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.

Resumen

En el presente trabajo de investigación se propone un método de compensación de corrientes armónicas llamado Filtro de potencia activo unificado que tiene como fuente un arreglo de paneles solares junto con un convertidor elevador que por sus siglas en inglés es abreviado UAPF-PV, el cual está diseñado para poder funcionar en redes de distribución de baja tensión, con la finalidad de reducir la componente armónica de corriente. Este método utiliza dos tipos de filtro activos, uno de ellos es el filtro serie el cual usa transformadores, el principio es el de compensar los armónicos que están presentes en el voltaje. El siguiente tipo es el filtro de potencia paralelo, de esta manera compensa los armónicos de corriente. Se realizó el análisis en un sistema de 13 barras de la IEEE en el cual integra una carga no lineal en la 7ma barra del sistema mencionado. En este caso se analizaron las componentes de voltaje, corriente y la componente armónica total presente en la barra 7 del sistema y en la carga. Los resultados obtenidos fueron la disminución de armónicos de corriente y voltaje en la barra 7 del sistema, donde se pasó de tener un 13.5% a un 6% en el THDi IEEE 1159 y la resolución Nro. ARCERNNR -017/2020.

Palabras Clave: Filtro de potencia activa, Control PI, Distorsión Armónica Total, Carga no lineal, Sistema eléctrico de distribución.

Abstract

In the present research work, a harmonic current compensation method called Unified Active Power Filter is proposed, which has as its source an array of solar panels together with a boost converter that is abbreviated UAPF-PV, which is designed to be work in low voltage distribution networks, to reduce the harmonic component of current. This method uses two types of active filters, one of them is the series filter which uses transformers, this filter has the compensating the harmonics that are present in the voltage waveform. Other type is the parallel power filter, which takes as reference the voltages and currents measured in the load, thus compensating for current harmonics. The analysis was in an IEEE 13-bar system in which a non-linear load is integrated in the 7th bar of the mentioned system. The components of voltage, current and the total harmonic component present in bus 7 of the system and in the load were analyzed. The results obtained were the decrease in current and voltage harmonics in bus 7 of the system, where it went from having 13.5% to 6% in the THDi these values are within the IEEE 1159 standards and resolution No. ARCERNNR -017/2020.

Keywords: Active Power Filter, PI Control, Total Harmonic Distortion, Non linear load, Electrical distribution system.

1. Introducción

En los últimos años la inserción de GD ha crecido, ya que su aplicación trae beneficios importantes dentro de un sistema eléctrico. Dentro de esta investigación se considera que básicamente la definición de GD consiste en la generación localizada cerca del punto de consumo, cuyo funcionamiento se basa en energías renovables no convencionales con un nivel de potencia inferior a 1 MW.

Al conectar generadores cerca del punto de consumo, se producen algunos beneficios para el sistema eléctrico; mejora los índices de confiabilidad, seguridad de operación y calidad del suministro.

Esto conlleva a una nueva iniciativa la cual intenta juntar la generación distribuida de una manera no convencional es decir que esta generación sirva como alimentación de un sistema de filtrado de armónicos el cual nos ayudaría a mejorar el perfil de calidad del sistema de distribución [1].

2. Marco Teórico

Como principio fundamental en los sistemas eléctricos nos vamos a centrar en el sistema de distribución, debido a que es en esta sección del SEP estará centrado nuestra investigación.

2.1 Distribución eléctrica en un SEP

Los sistemas eléctricos de potencia llamados también SEP por su abreviatura consta de distintos puntos claves para poder transportar la energía eléctrica desde el punto de la generación hasta los usuarios finales.

Estos son generación, transmisión, distribución y el consumidor final, tal y como se muestra en la figura 1 [1].

Para este caso vamos a tomar en cuenta la etapa de la distribución, que se enfoca en el transporte de la energía eléctrica desde el punto de una subestación de servicio hasta el usuario final. Además, la etapa de distribución tiene una magnitud de medio voltaje, dichas magnitudes varían dependiendo la subestación, a continuación, se muestra la tabla 1 con los valores típicos en medio tensión (MT) [2].

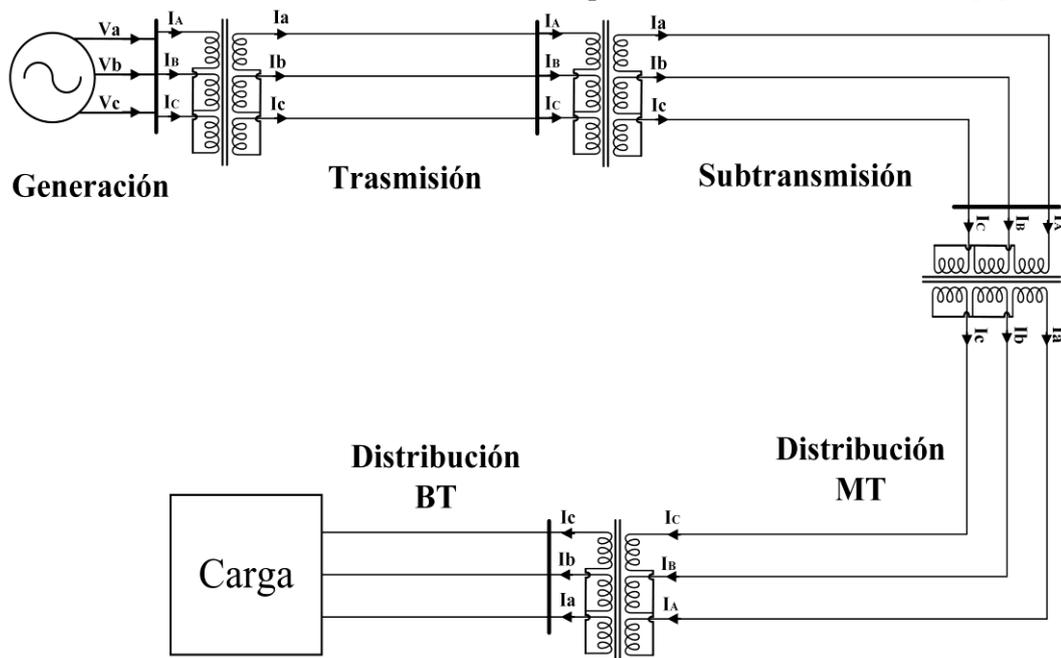


Figura 1. Sistema eléctrico de potencia

Tabla 1. Voltajes típicos en MT

Nivel de voltaje	Unidad
6,3	kV
13,2	kV
22,8	kV

A su vez el sistema de distribución está comprendido por centros de transformación también llamados transformadores de distribución los cuales disminuyen el voltaje de los conductores de MT hasta un voltaje seguro para el ámbito residencial, los valores típicos están en la tabla 2 [2].

Tabla 2. Voltajes típicos en BT

Tipo	Nivel de voltaje	Unidad
Trifásico	220/127	V
Monofásico	240/120	V

Otro punto para tomar en cuenta en la distribución de energía eléctrica es el mejoramiento mediante el uso de filtros activos o pasivos, ya que de esta manera se puede incrementar la calidad y confiabilidad brindada en el servicio de cara al usuario final [3].

2.2 Calidad de energía

La calidad de la energía eléctrica se toma en cuenta diferentes tipos de variables que en la IEEE 1159 que describe los fenómenos electromagnéticos, los cuales caracterizan las diferentes variables de la tensión y corriente eléctrica.

Por lo tanto, la tensión y corriente eléctrica constan de características y límites específicos, en donde la empresa distribuidora debe garantizar el cumplimiento de dichos límites y características dados por los entes internacionales como es la IEE 519-2014 e IEC61000 y regulaciones nacionales como la resolución Nro. ARCERNNR -017/2020 que se encuentren vigentes.

En las tablas 3 y 4 se describe los límites de THD que pueden estar presentes en las formas de onda de corriente y voltaje según las normas y resoluciones.

Como se puede ver en la tabla 3 tenemos diferentes niveles de voltaje en todo un sistema eléctrico por lo que cada uno de ellos tiene diferente tolerancia en el límite de armónicos de voltaje que puede contener la forma de onda.

Por otro lado, tenemos la tabla 4 en la cual se describe los valores máximos que puede contener la forma de onda de corriente en la cual se toma en cuenta la relación entre la corriente de cortocircuito máxima en el PCC y la corriente fundamental máxima en el PCC [4], [5].

Tabla 3. Límites de THD en voltaje dados por el estándar IEEE 519-2014

Nivel de voltaje	THD (%)
$V \leq 1kV$	8%
$1kV < V \leq 69kV$	5%
$69kV < V \leq 161kV$	2.5%
$162kV < V$	1.5%

Tabla 4. Límites de THD en corriente dados por el estándar IEEE 519-2014

Armónicos de Orden impar						
I_{sc}/I_1	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THDi (%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50<100	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100<1k	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Una de las características principales es la de mantener una forma de onda sinusoidal en todo momento con una frecuencia a 60 o 50 Hz dependiendo la región en donde se encuentre, en el caso de nuestro país Ecuador la norma rige que la frecuencia de operación debe ser de 60 Hz. Las cargas involucradas en los diferentes sectores pueden ser clasificadas en cargas lineales y no lineales, y estas son las responsables de una variación en una o varias características de la tensión o corriente [5].

Cargas lineales son aquellas que poseen un valor único en su impedancia, es decir que las cargas pueden tener valores fijos de resistencia eléctrica, inductancias o capacitancias, sin importar el voltaje aplicado a las mismas [6]. Cargas no lineales son aquellas que consumen corrientes no sinusoidales teniendo como fuente un generador senoidal, esto implica que la forma de onda de corriente es totalmente diferente a la forma de onda en tensión.

Por lo que el principal problema de este tipo de cargas es el consumo de corrientes en intervalos de tiempo muy pequeños.

Al poseer dichos intervalos de consumo genera una distorsión en la forma de onda lo cual causa diferentes problemas en varias partes del sistema de distribución [7], [8].

Armónicos

Cuando se habla de la presencia de armónicos en la forma de onda de corriente o de voltaje, se trata de una forma de onda que perdió la característica de ser senoidal.

Por lo cual dicha forma de onda se encuentra compuesta según Fourier por la sumatoria de varias ondas senoidales a diferente frecuencia, en donde la principal onda es la forma de onda original y las subsiguientes son ondas senoidales que se encuentran a frecuencias que son múltiplos exactos de la frecuencia base o fundamental, esto se especifica en las ecuaciones 1,2,3 [9].

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} ak \cos(k\omega_1 t) + bk \sin(k\omega_1 t) \quad (1)$$

$$ak = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega_1 t) dt \quad (2)$$

$$bk = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega_1 t) dt \quad (3)$$

Donde:

$f(t)$: Modelo Matemático para señales periódicas no senoidales.

ak : Componente senoidal pares de la señal.

bk : Componente impar, donde $k=1$ es la señal fundamental y $k>1$ representa los armónicos.

k : Es el orden de la señal.

El principal generador de armónicos son las cargas no lineales, las cuales se presentan en diferentes tipos de equipos electrónicos o eléctricos. Las cargas no lineales pueden ser varios dispositivos como, por ejemplo: variadores de velocidad en motores, computadores personales, calefacciones con control variable de temperatura, lámparas fluorescentes, etc [6].

THD

Se denomina THD a la distorsión armónica total que se genera en las formas de onda tanto de voltaje o de corriente eléctrica, dicha deformación se denomina THDv para cuando es la distorsión total armónica en la forma de onda de voltaje y THDi cuando nos referimos a la distorsión armónica total en la forma de onda de corriente.

El THD nos indica a manera de porcentaje la cantidad de distorsión armónica que tiene una forma de onda [7], [8]. Su cálculo se lo realiza mediante la siguiente ecuación 4.

$$THD (\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_f^2}} \quad (4)$$

Donde:

I_n : Componente armónico.

I_f : Componente fundamental.

n : número del armónico.

Debido a esto organismos internacionales desarrollaron normas que ponen un límite a la cantidad de armónicos que pueden inyectarse en la red. Las normas internacionales más importantes y que tienden a ser referencia para realizar normativas nacionales son: IEEE519 y IEC61000.

Los sistemas eléctricos cuentan con diferentes normas y regulaciones en cada país, para delimitar la cantidad de THD que puede contener una forma de onda. Las normas y regulaciones que se utilizan en nuestro país (Ecuador), son Estándar IEEE 519-2014 y la

resolución Nro. ARCERNNR - 017/2020 [4], [5].

2.3 Consecuencias de los armónicos THDi

El crecimiento de los sistemas eléctricos en los últimos años ha sido inminente y a la par se han incrementado las cargas no lineales que se encuentran conectadas en el sistema eléctrico. Esto ha generado un problema que afecta tanto a usuarios como a empresas distribuidoras, debido a que causa sobrecalentamientos en los conductores, descenso en el factor de potencia a nivel de la red, resonancia, empeoramiento de aislamientos en cargas inductivas y el deterioro en la forma de onda tanto de corriente como de voltaje [10], [11].

El problema de la distorsión de la forma de onda genera variaciones en las variables de corriente y de voltaje, afectando de manera constante a equipos que estén conectados a la red.

Debido a la presencia de un THDi alto, se ven afectados los sistemas de generación debido a que en el punto común de acoplamiento se ven fluctuaciones a nivel de voltaje y corriente, esto afecta significativamente al sistema eléctrico especialmente a la parte de distribución [12].

2.4 Herramientas Matemáticas

Potencia reactiva instantánea: Este método se base en la conversión de las variables de tensión y corriente que se miden en el lado de la carga, hacia un marco de coordenadas estacionario y ortogonal, en donde el valor de la variación de la potencia se obtiene mediante una la utilización de un controlador PI.

Marco referencial sincrónico: Dicho método también es conocido como dq0, la cual transforma la variable de corriente que se mide en la carga a un marco dq0, esto facilita la

descomposición de las corrientes, así dejando las componentes de corriente no fundamental, estas componentes definen la compensación.

Transformada discreta de Fourier:

En este caso se habla de una transformada matemática el cual trabaja en el dominio de la frecuencia. Esto nos permite obtener las magnitudes de los armónicos presentes en la señal de corriente [13].

2.5 Filtros Activos

Los filtros activos están compuestos de elementos activos o fuentes controladas, este tipo de elementos activos pueden ser transistores, amplificadores operaciones o tubos de vacío, además de esto los filtros activos poseen una alimentación externa.

Por lo tanto, se cumple que cuando un filtro se conecta a un circuito eléctrico, el mismo modifica o cambia la señal de entrada y nos da una señal de salida que contiene características de la función de transferencia que se modela en el filtro[3].

Su principal característica es poseer un criterio en la selección de la frecuencia de la señal de entrada esto nos ayudara a tener una señal con frecuencias específicas por el filtro y el tipo de conexión ya sea serie o paralelo, a su vez los filtros activos permiten conexiones en cascada. Otra característica que poseen los filtros activos es la de incrementar una parte de la señal de salida o en su defecto toda la señal de salida, teniendo como base una señal de entrada [14].

2.6 Tipos de filtros activos de potencia

Los filtros activos se pueden clasificar dependiendo a la conexión establecida en el sistema con respecto a la carga, es decir que los filtros pueden estar bajo una configuración en paralelo o una configuración serie.

Filtro activo en paralelo:

En esta conexión los filtros activos actúan como una fuente de corriente la cual tiene como principal función la supresión de los armónicos de corriente que inyecta una carga hacia la red su forma de conexión se muestra en la figura 2 [15].

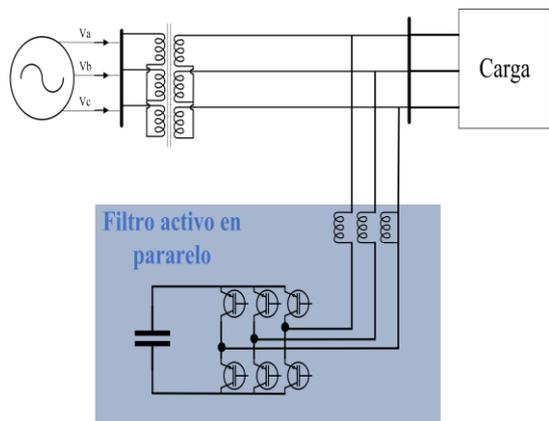


Figura 2. Conexión de un filtro en paralelo

Filtro activo en serie (FS):

Por otro lado, tenemos la conexión de los filtros activos en serie a la carga, en donde su principal funcionamiento es la de mantener la señal de voltaje en una forma senoidal, su forma de conexión se muestra en la figura 3 [15].

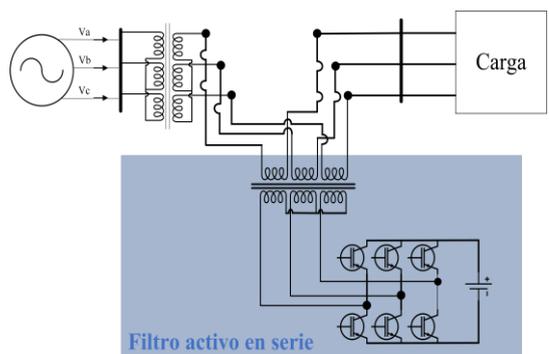


Figura 3. Conexión de un filtro en serie

Filtro activo mixto:

Como su nombre lo indica son la combinación de los dos tipos anteriores, teniendo como principal funcionalidad, la de suprimir la componente armónica en la corriente y mantener una forma de onda lo más limpia posible [15].

2.7 Filtro activo de potencia unificado con una fuente fotovoltaica (UAPF-PV)

Los UAPF son un filtro activo de tipo mixto en el cual se tiene como estructura a un filtro en serie y un filtro en paralelo.

Debido a esto los UAPF han tenido un gran desarrollo en los últimos años en donde la investigación se ha centrado en ellos, ya que sus características permiten manejar muchos de los problemas de calidad de energía que se generan en los sistemas de distribución [16], [17]. En donde el filtro que se encuentra conectado en serie tiene la función de mantener el voltaje de carga en fase con el voltaje del punto de conexión común. Además, el filtro en serie ayuda a lidiar con problemas como la caída de tensión, incremento y distorsión armónica [18]–[20].

Por otro lado, el filtro conectado en paralelo se lo utiliza como método de compensación de corrientes armónicas y reactivas de manera que mejore la calidad de la energía [18]–[20]. Como ultimo componente el sistema UAPF-PV tiene como fuente un arreglo de paneles fotovoltaicos los cuales alimentan al filtro, donde su alimentación se la realiza mediante un convertidor DC/DC y un sistema DC boost en cual permite extraer la mayor cantidad de potencia a los paneles solares [21]–[23].

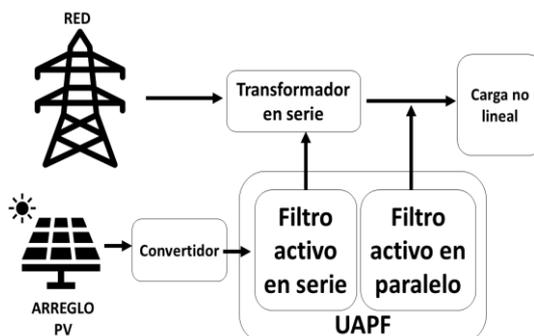


Figura 4. Esquema de conexión de un UAPF

Generación Solar Fotovoltaica

La generación solar fotovoltaica es una de las fuentes renovables que más crecimiento ha tenido en los últimos años, consiste en obtención de energía mediante la captura de la luz y calor que emana el sol en forma de radiación [24]. Por lo que la radiación emitida varía constantemente a lo largo del día y depende en su mayoría de las condiciones atmosféricas que se tiene en dicho momento. Por ello se estima que en condiciones favorables se obtendrá un promedio de 300 W/m².

El aprovechamiento de esta mediante elementos semiconductores a los cuales comúnmente se las conoce como celdas fotovoltaicas [16]. Mediante las celdas fotovoltaicas constituye una planta fotovoltaica, en donde existen dos tipos de plantas. La primera una central fotovoltaica donde toda la producción de energía generada por las celdas se inyecta en la red como lo indica la figura 5.

El segundo tipo es de generación de autoconsumo donde la energía producida es consumida por el mismo productor y la energía restante es introducida a la red eléctrica tal como lo representa la figura 6 [25].

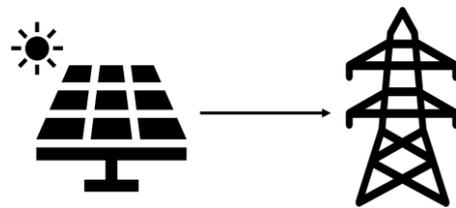


Figura 5. Central fotovoltaica

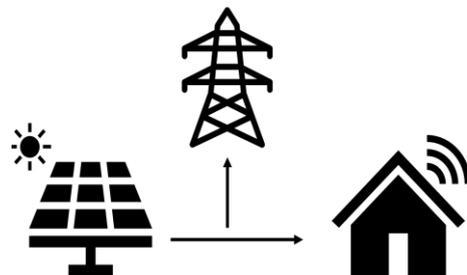


Figura 6. Generación de autoconsumo

Las centrales fotovoltaicas tienen tres elementos principales cuando la conexión es hacia la red: el primero son los paneles fotovoltaicos los cuales se encargan de captar la radiación solar y producir energía eléctrica a través de la captación de los fotones. El segundo elemento son los inversores los cuales se encargan de la conversión de corriente continua a corriente alterna. Y el tercer elemento es un transformador el cual nos ayuda a elevar el voltaje de salida del inversor para poder conectar a un nodo de distribución [25].

Paneles Solares

Los paneles fotovoltaicos en su mayoría son clasificados por la potencia máxima pico que pueden generar.

Dichas células fotovoltaicas poseen una eficiencia del 18% al momento de convertir los fotones de luz en energía eléctrica, además hay una fuerte manufactura de paneles compuestos de materiales diferentes al silicio. Es por lo que la parte más importante de un panel solar son las células fotovoltaicas las cuales tienen diferentes configuraciones o estructuras como se observa en la tabla 5 [26].

Tabla 5. Tipos de paneles fotovoltaicos

Tipo de paneles	Fabricado con
Cristalinas	Capa fina de partículas de silicio
Monocristalinas	Único cristal de silicio
Policristalinas	Pequeñas partículas cristalizadas de silicio
Amorfás	Silicio no cristalizado

Convertidor DC/DC

Los convertidores DC/DC se utilizan para obtener un valor de tensión fija a la salida de dicho conversor, esta tensión se puede conseguir sin importar la existencia de variaciones en la entrada del convertidor como se muestra en la figura 7 [27].

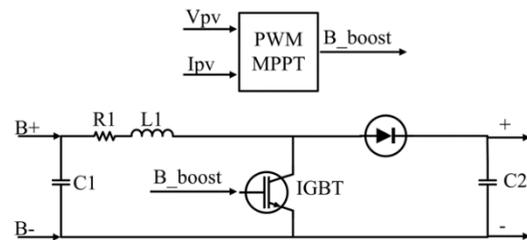


Figura 7. Convertidor DC/DC

Principalmente los convertidores en su gran mayoría se componen de dispositivos semiconductores, estos tienen una característica fundamental para este uso ya que con cierta señal o excitación de este material se puede obtener conductividad, convirtiéndolo así en un interruptor [27].

Con esta característica los semiconductores pueden regular la tensión que se entrega al final del conversor, ya que su regulación depende de cuánto tiempo estén abiertos o cerrados los semiconductores.

Existen diferentes métodos para controlar los convertidores, uno de los más conocidos es aquel que permite la modulación del ancho de pulso (PWM), el cual como su nombre indica controla el tiempo de apertura y cierre del semiconductor mediante conmutaciones a una frecuencia determinada y constante [27].

PWM

La modulación de ancho de pulso es un tipo de señal muy utilizada en electrónica y en los últimos años se ha estado implementado en el mundo de la ingeniería eléctrica, debido al nacimiento de la electrónica de potencia, dicha señal no es más que una

señal cuadrada con intervalos de activación variados.

Es decir, los tiempos de activación y desactivación varían con respecto al tiempo, donde la sumatoria del tiempo de activación y desactivación daría como resultado el periodo de la señal [28].

Control PI

El control PI hace la función de un sistema de control el cual es de bucle cerrado, donde se calcula mediante la ecuación 7.

$$y(t) = Kp * e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

Donde:

Kp: Ganancia estática del proceso

Ki: Tiempo de acción integral

e(t): Función del sistema

Dicho control viene dado por un componente proporcional y otra integral; en donde la componente proporcional, es la relación entre la señal que poseemos como error y el valor de la constante Kp, esta relación se hace para que el error se aproxime lo más posible al valor cero, pero los valores en su gran mayoría solo serán óptimos en un intervalo limitado del proceso ya que varía constantemente.

También existe la posibilidad de obtener sobre oscilaciones en el sistema debido a un valor muy alto de la constante Kp. Por otro lado, tenemos la componente integral la cual tiene como principal función la de eliminar o reducir el error estacionario que fue producido por la componente proporcional, por lo cual dicha componente integral el error producido en un instante de tiempo y finalmente lo multiplica por una variable Ki de valor constante [29]–[31].

3. Planteamiento del problema

Una gran parte de la demanda se debe al crecimiento de las cargas no lineales en el sistema eléctrico, la presencia de este tipo de cargas conlleva al aumento en el porcentaje de THDi presente en las líneas de distribución. Por lo que la calidad de energía se ve afectada.

Se presenta un sistema de compensación basado en el principio de los filtros activos mixtos, en este caso una compensación con un UAPF-PV el cual se encargará de compensar el THDi presente en las líneas para que los niveles de THDi estén dentro de los límites operativos que nos dice la normativa ecuatoriana.

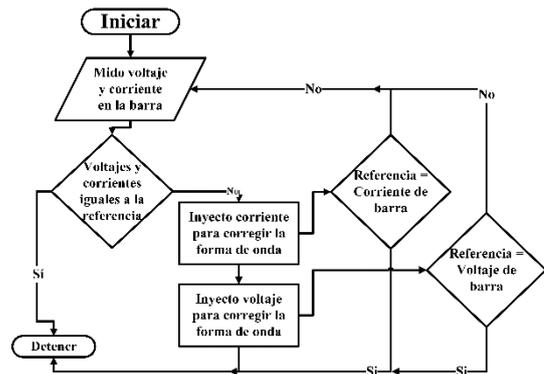


Figura 8. Pseudocódigo del proceso: Metodología a seguir en el proceso del filtro UAPF-PV.

3.1 Conexión del filtro UAPF-PV

El filtro UAPF-PV es de tipo filtro activo mixto en donde se utiliza un control PI para cada uno de los filtros. Además, se posee un arreglo de paneles solares los cuales se conectan a un convertor DC/DC el cual mantiene el valor del voltaje.

La salida del convertor está conectada hacia un capacitor en paralelo y en dichos terminales se conectaría cada filtro activo.

Cada filtro posee un conjunto de seis IGBT's, con su respectivo control como se propone en la figura 9, el filtro UAPF-PV se conecta a cada fase del

sistema de manera distinta, donde V_a , V_b , V_c son voltajes monofásicos de la fuente y I_{La} , I_{Lb} , I_{Lc} son la corriente por fase consumida por la carga no lineal.

El FS se conecta a cada fase del sistema V_a , V_b , V_c mediante la utilización de un transformador en serie

a la línea, donde su relación de transformación es de 1 a 1.

Por otro lado, el filtro paralelo se conecta a cada fase del sistema V_a , V_b , V_c mediante una inductancia de acoplamiento.

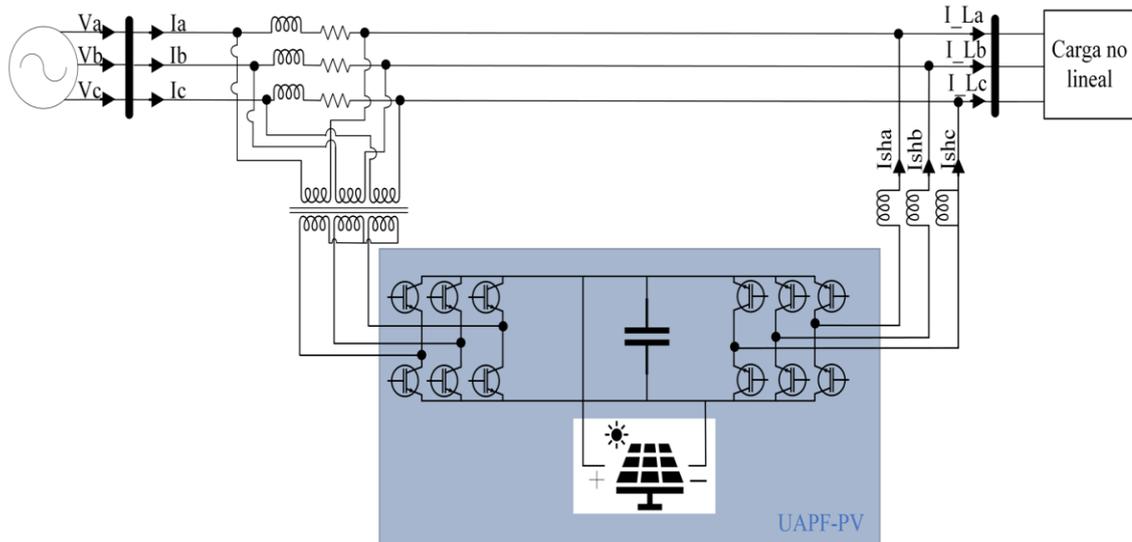


Figura 9. Diseño del Filtro activo unificado (UAPF-PV)

3.2 Control para el filtro serie

Para controlar los IGBT's del filtro serie existen varias opciones una es la mostrada en la figura 10 donde se calcula una señal de referencia. La cual mediante una transformada inversa de Clark se logra poner en relación con el tiempo y mediante la diferencia de dicha referencia.

Por lo que, junto con el valor de señal de voltaje medido en la carga, nos da una forma de onda que contiene pequeñas variaciones dichas variaciones son tomadas para empezar a conmutar los IGBT's.

Dicho método es conocido como marco de referencia síncrono la cual se basa en la transformada matemática de Park. La técnica del marco de referencia síncrono tiene como principio generar vectores con una magnitud de 1 unidad desde el voltaje o

corriente analizado, de esta manera puede transferir las corrientes con distorsión de onda a las coordenadas dq0.

A su vez otra parte importante de la técnica es el bucle de bloqueo de pase es cual se encarga de mantener al voltaje y corriente en fase. De esta forma nos permite obtener las corrientes en componentes dq0 ecuación 5 partiendo de las corrientes de carga [32].

Además, se debe considerar la utilización de filtros pasa bajas que mantiene estable el sistema, dichos filtros suelen ser ubicados después de las señales de referencia. Para finalizar se puede utilizar la transformada inversa ecuación 6 para obtener valores en relación con el tiempo partiendo de las coordenadas en dq0.

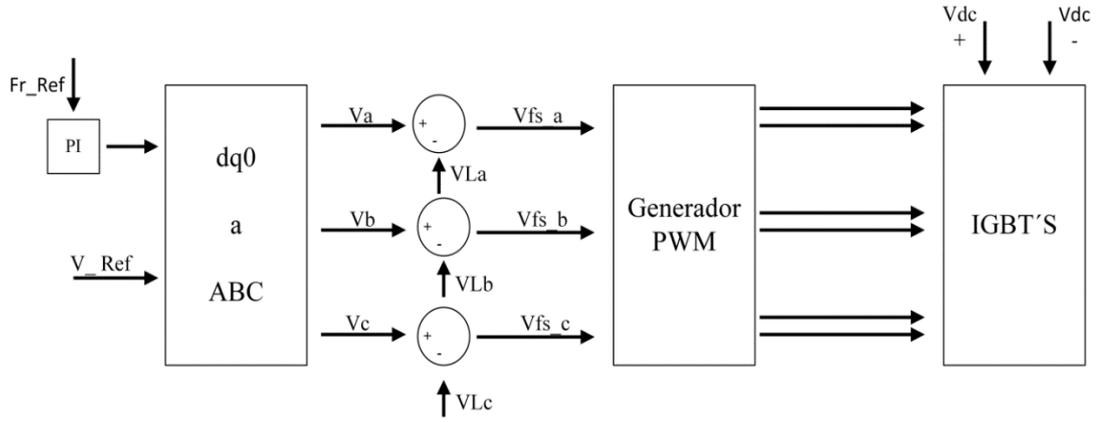


Figura 10. Control del filtro serie

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aL} \\ I_{bL} \\ I_{cL} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_{dref} \\ I_{qref} \\ I_{0ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \\ I_{0c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 Control para el filtro paralelo

Se implementar el marco de referencia mediante las ecuaciones 5 y 6. Se cuenta a su vez con otro filtro pasa bajos (LPF) para la potencia medida en la barra esto ayuda a tener una forma de onda limpia para poder realizar la diferencia con la forma de onda original de la potencia y a su vez sumarle la potencia suministrada por el arreglo de paneles como se muestra en la figura 11.

$$V_{labc} = V_{Lm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - 0) \\ \sin(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para poder calcular los voltajes trifásicos en la carga se utilizó la ecuación 7.

Después de extraer las tensiones se procede a calcular las potencias activas y reactivas mediante las ecuaciones 8 y 9 respectivamente. Donde las variables de voltaje y corriente están medidas directamente en las barras del sistema por lo que se encuentran en forma ABC y se las convierte a dq0 mediante el método de la transformada de Clarke.

$$P = V_{Ld}I_{Ld} + V_{Lq}I_{Lq} \quad (8)$$

$$Q = V_{Ld}I_{Ld} - V_{Lq}I_{Lq} \quad (9)$$

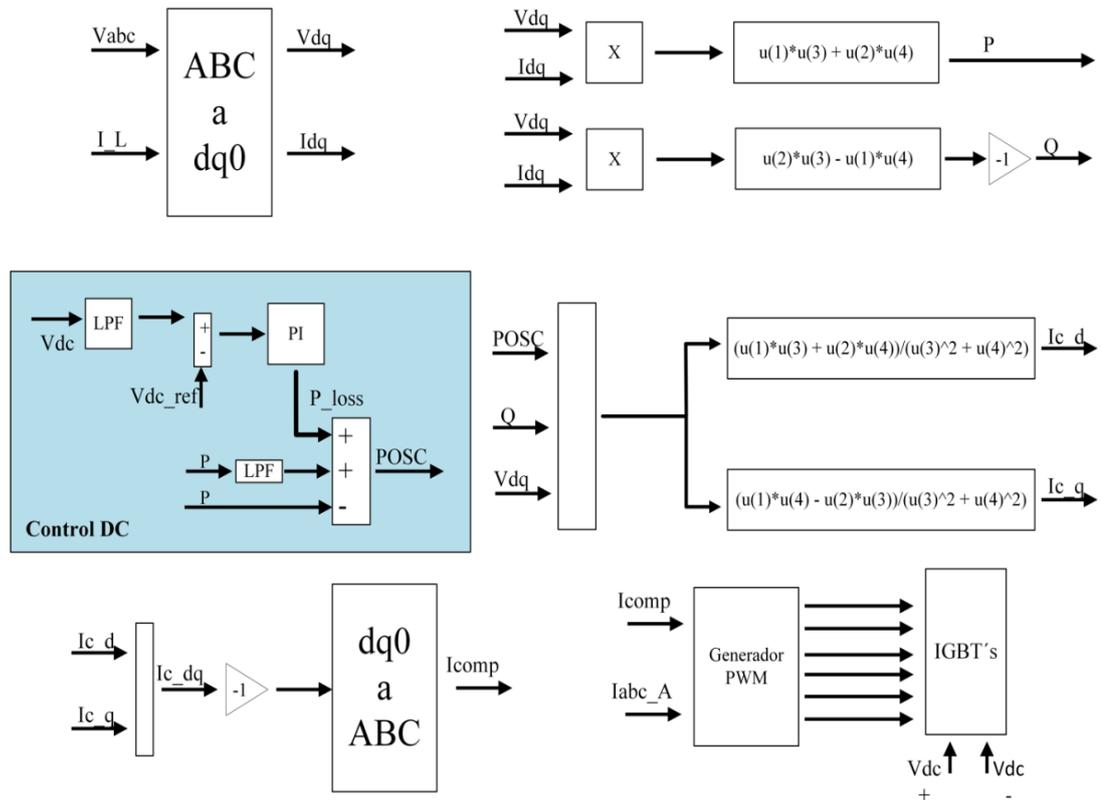


Figura 11. Control del filtro shunt

A su vez se cuenta con control PI después de la suma de voltajes de referencia y voltaje del arreglo de paneles, conectar el filtro UAPF al sistema. Los valores del controlador PI se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de las constantes del control PI

Ganancia	Valor
Ki	1.1
Kp	2.3

Para poder definir los valores de Ki y Kp se utilizó la sintonización manual, debido a que, en las diferentes referencias, nos especificaban que los valores de Ki podían ir desde 0.9 a 1.2 y para el Kp, existía un rango de 2.1 a 2.3.

Por ello se procedió a tomar en cuenta el valor más bajo en Ki y empezar a aumentar en valor de Kp, hasta llegar al valor máximo después se empezó a variar el Ki hasta tener el valor más estable en las diferentes combinaciones.

3.4 Control Fuente DC

En el control para la fuente dc se utilizó un control PI para manejar la parte de la potencia activa la cual es suministrada por el arreglo de paneles solares, además de esto se ubicó un LPF el cual ayuda a que la forma de onda suministrada por el capacitor ubicado a la salida de los paneles sea lo más limpia posible.

3.5 Caso de estudio

Para esto se propuso hacer el estudio de un sistema de distribución de la IEEE de 13 barras, en donde se conectará un modelo de carga no lineal trifásica en la barra N° 7, de esta manera poder identificar las variaciones de la componente de THDi en dicha barra.

El modelo de carga no lineal cuenta con 6 diodos en forma de puente, un resistor e inductancia a continuación se detalla la tabla 7 con todos los valores que tiene la carga no lineal.

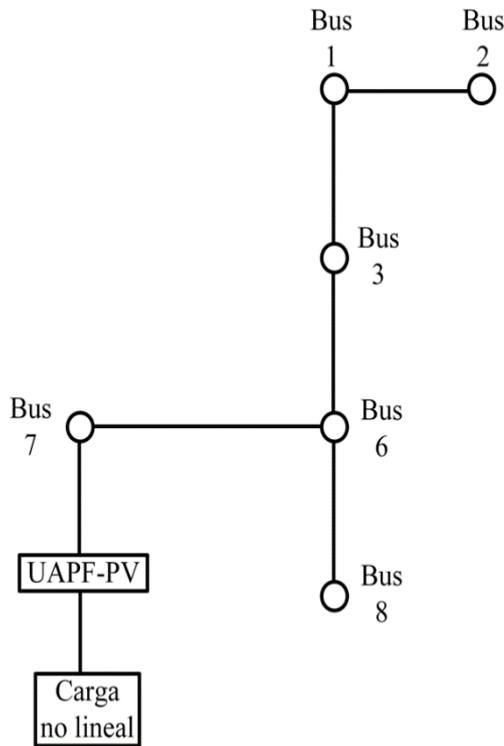


Figura 12. Sistema 13 barras IEEE

Tabla 7. Datos del sistema

Variable	Valor	Unidad
Frecuencia	$2\pi 60$	Rad/s
Voltaje de la red	11.5	kV
Voltaje de la carga 3ph no lineal	380	V
Transformador	13.8/380	V
Resistencia del diodo	$1e-3$	Ω
Capacitancia del diodo	$25e-6$	F
Resistencia de la carga	100	Ω
Inductancia de la carga	$5.25e-3$	H

4. Análisis de resultados

En el sistema de 13 barras se toma en cuenta la barra 7 debido a que en dicha barra vamos a realizar las mejoras al conectar el filtro UAPF-PV. El filtro

conectará en el sistema después de haber pasado 100[ms].

En la figura 13 la variable a analizar que tenemos son los voltajes en por unidad (p.u) de la barra 7, en donde podemos ver que la magnitud de cada una de las fases se encuentra en 1 [p.u], esto nos indica que el perfil de voltaje existente es correcto, después de la activación del filtro.

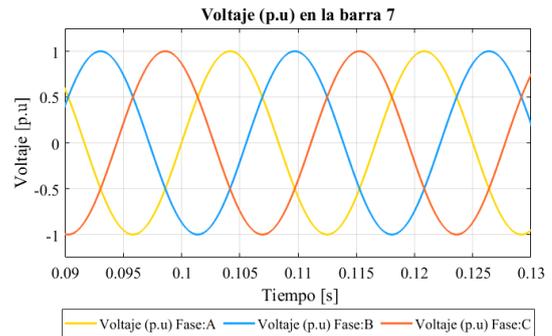


Figura 13. Voltaje trifásico [p.u] de la Barra 7

Asimismo, en la figura 14 se puede apreciar los voltajes trifásicos en el lado de la carga, en donde el perfil de voltaje decae en el momento de la conexión del filtro pero procede a estabilizar el voltaje pasado el transitorio generado por el filtro.

Además de todo eso se puede apreciar de forma evidente la mejora en la forma de onda después de la conexión del filtro.

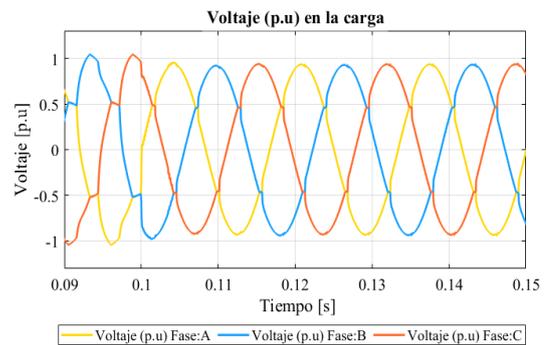


Figura 14. Voltaje trifásico [p.u] de la carga

A continuación, en la figura 15, se muestra la componente de THD de voltaje la carga conectada al sistema donde podemos apreciar una clara

disminución del THDv después de la conexión del filtro a los 100[ms].

Además, se puede ver de manera clara la existencia de un transitorio que dura aproximadamente 15[ms], en el cual las diferentes fases alcanzan picos del THDv.

- Fase A alcanza un pico de 15%
- Fase B alcanza un pico de 15%
- Fase C alcanza un pico de 15%

Al pasar el transitorio se puede ver que el THDv está dentro de los parámetros establecidos en la IEEE 1159 la cual indica que a el porcentaje máximo de THDv es del 5% y en el sistema se puede apreciar una reducción hasta el 3%. Además, el tiempo que tarde el filtro en estabilizar el sistema es de 22 [ms]

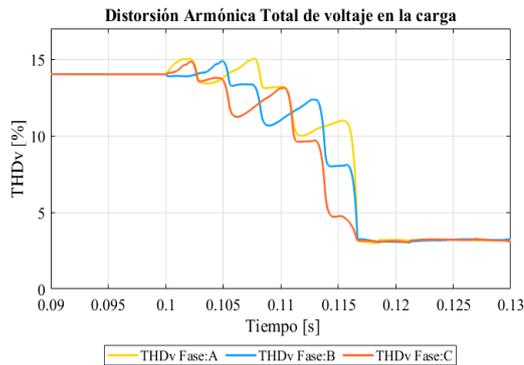


Figura 15. THDV [%] en la carga

En la figura 16 se representa el THDi medido en la barra 7 del sistema, en el cual se puede ver la disminución del THDi de 13% a 6% en cada una de las tres fases del sistema.

Otro punto muy importante es que podemos ver un transitorio que tiene una duración de 20[ms], en el cual los picos de THDi son los siguientes:

- Fase A alcanza un pico de 35%
- Fase B alcanza un pico de 37%
- Fase C alcanza un pico de 38%

Después de haber pasado el transitorio las fases se estabilizan y los parámetros toman un valor dentro del estándar IEEE 1159, el cual nos dice que el límite es del 8%.

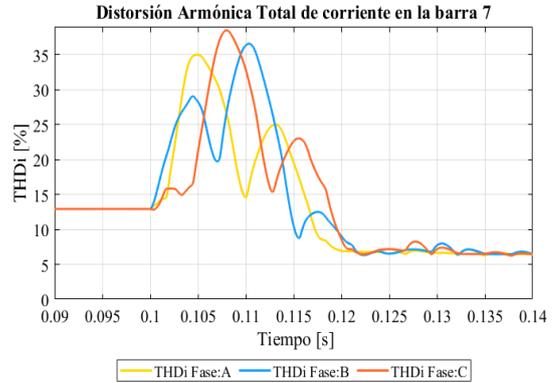


Figura 16. THDV [%] en la barra 7

Tabla 8. Datos del transitorio

Datos	Valor	Unidad
Pico THDi en la barra 7	38.5	%
Voltaje fase-neutro transitorio en la barra 7	300	V
Voltaje fase-neutro transitorio en la carga	295	V
Duración del transitorio de THDi	0.02	s
Tiempo de estabilidad (Ts)	0.06	s
Tiempo de subida (Tr)	0.008	s

En la figura 17 se muestra la potencia suministrada desde la barra 7 hacia la carga en el cual se ve un aumento de la potencia enviada debido a la conexión del filtro al sistema, se ve un pico de potencia de 2100 [W], el cual va disminuyendo en proporción a que el filtro UAPF-PV se estabiliza.

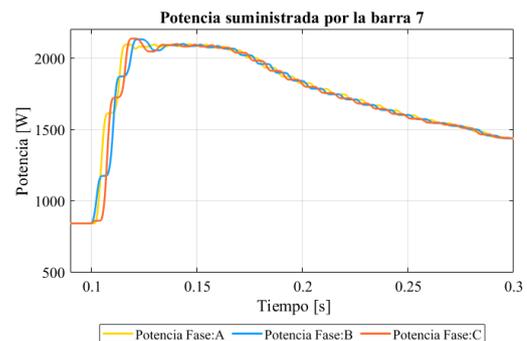


Figura 17. Potencia suministrada por la barra 7

En la figura 18 podemos ver el consumo de potencia realizado por el filtro UAPF en donde tenemos un pico de consumo en el instante de conexión y una disminución del consumo cuando el filtro se estabiliza.

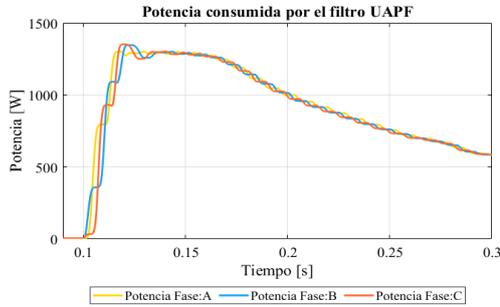


Figura 18. Potencia del filtro UAPF-PV

Las figuras 19 y 20 muestran la corriente y voltaje inyectados por el filtro UAPF-PV en donde se puede apreciar que en el momento de la activación del filtro se produce una corriente de inyección hacia la red del sistema y por otro lado la forma de onda de voltaje se ve reducida en la magnitud.

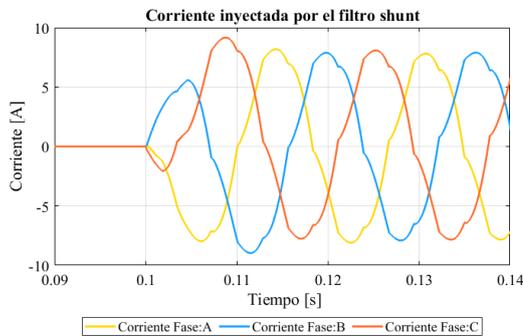


Figura 19. Corriente inyectada por el UAPF-PV

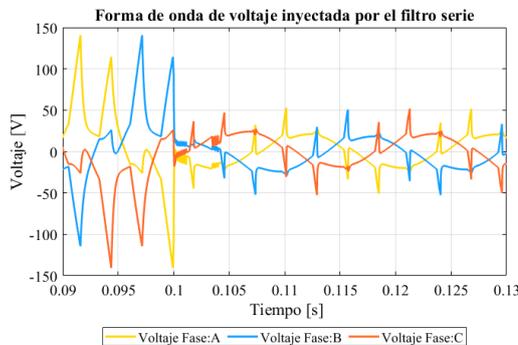


Figura 20. Onda de voltaje resultante al conectar el UAPF-PV

Como última medición tenemos la figura 21 en la cual se muestran los voltajes en [p.u] de todo el sistema de 13 de la IEEE, en el cual se puede ver todos los voltajes de la barra y en específico de la barra 7 la cual permanece en un voltaje de 1[p.u].

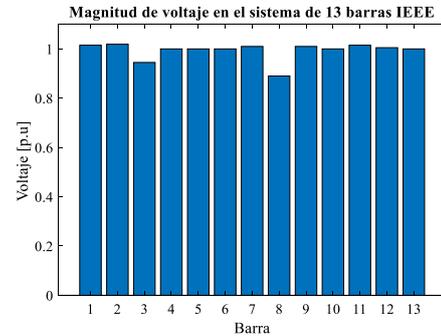


Figura 21. Voltajes [p.u] del sistema de 13 barras

5. Conclusiones

El diseño del filtro UAPF-PV simulado mediante la aplicación de Matlab/Simulink, reducen la componente armónica presente en las ondas de voltaje y corriente, en la cual los resultados fueron positivo al ver reflejado una disminución del THDi de un 7% y THDv en un 11% en el sistema.

La implementación del filtro UAPF-PV se realizó en un sistema de 13 barras de la IEEE con conexión en la barra 7 de una carga no lineal para el análisis de los armónicos, donde se obtuvo los siguientes resultados, una reducción del 13% al 6% en la forma de onda de corriente y una reducción del 14% al 3% en la forma de onda de voltaje medidas en la barra del sistema.

Al analizar los valores medidos en la carga se puede notar un pequeño descendimiento en la magnitud de voltaje a un valor de 0.95 [p.u], debido a que la conexión del filtro genera un transitorio, pero en cuanto el filtro llegue a la estabilidad la magnitud de voltaje vuelve a 1[p.u] en la barra 7.

Se puede apreciar en las diferentes gráficas que después de la conexión del filtro UAPF-PV, los valores del THDi desciende a un valor de 6% y se posiciona por debajo del límite del 8% expresado en la resolución Nro. ARCERNNR -017/2020 y del estándar IEEE 1159.

Para concluir el filtro UAPF-PV tiene un buen desempeño en las modelaciones, en el que se puede apreciar una disminución de la componente armónica en el sistema y además de su versatilidad al momento de mejorar la calidad de la energía.

6. Trabajos Futuros

Para trabajos futuros se puede considerar un control mucho más robusto y avanzado para poder considera un sistema general donde no se base a una carga en específico y el filtro UAPF-PV pueda manejar diferentes tipos de cargas en intervalos de tiempo variados además de cargas desbalanceadas no lineales.

7. Referencias

- [1] J. M. Boyd and G. T. Heydt, "Stability analysis of an energy managed smart distribution system," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672344.
- [2] J. S. Chalfant and C. Chrysostomidis, "Analysis of various all-electric-ship electrical distribution system topologies," *2011 IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2011*, pp. 72–77, 2011, doi: 10.1109/ESTS.2011.5770844.
- [3] V. Nakade and S. Patil, "Implementation of Power Quality Enhancement using Hybrid Series Active Filter," *Proc. 4th Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES 2019*, pp. 238–241, 2019, doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002378.
- [4] D. Committee, "IEEE Power and Energy Society General Meeting," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-Augus, 2018.
- [5] ARCERNNR, "Regulación-002-20.pdf." p. 36, 2020, [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf>.
- [6] R. Ortega González, J. C. Sosa, O. Carranza, and V. García, "Comparison controllers for inverter operating in island mode in microgrids with linear and nonlinear loads," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, no. 8, pp. 1441–1448, 2014, doi: 10.1109/TLA.2014.7014512.
- [7] M. -Barajas and B.- Sánchez, "Contaminación Armónica Producida Por Cargas No Lineales De Baja Potencia: Modelo Matemático Y Casos Prácticos Harmonic Pollution Produced By Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and Practical Cases," *Ing. Investig. y Tecnol. Núm.*, vol. 2, pp. 189–198, 2010, [Online]. Available: <http://scielo.unam.mx/pdf/iit/v11n2/v11n2a6.pdf>.
- [8] E. González, M. Salvador, M. Guerrero, J. Alejandro, C. Ramos, and L. Antonio, "Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones," *Concienc. Tecnológica*, no. 32, p. 0, 2006.
- [9] X. Wang and F. Blaabjerg, "Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power

- Systems: Concept, Modeling, and Analysis,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2858–2870, 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2812712.
- [10] D. R. Joca, A. U. Barbosa, D. S. Oliveira, P. P. Praca, L. H. S. C. Barreto, and R. N. A. L. Silva, “Analysis of a modulation technique applied to FC inverter for THD reduction,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol. 2015-May, no. May, pp. 2261–2268, 2015, doi: 10.1109/APEC.2015.7104664.
- [11] S. Rezazade, M. Salehi, M. Changizian, and E. Afjei, “Analysis of PFC Improvement and THD Reduction Achieved by PFC-based Zeta Converter and PWM-Rectifier,” *34th Int. Power Syst. Conf. PSC 2019*, pp. 441–446, 2019, doi: 10.1109/PSC49016.2019.9081524.
- [12] L. P. S. Raharja, O. A. Q., Z. Arief, and N. A. Windarko, “Reduction of Total Harmonic Distortion (THD) on Multilevel Inverter with Modified PWM using Genetic Algorithm,” *Emit. Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 91–118, 2017, doi: 10.24003/emitter.v5i1.174.
- [13] J. James and M. Durango, “Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia,” vol. 21, pp. 15–31, 2017, doi: 10.14483/udis-trital.jour.tecnura.2017.2.a01.
- [14] Y. G. Park, M. Park, and I. K. Yu, “Novel concept of a PV power generation system adding the function of shunt active filter,” *Ser. Energy Power Syst.*, pp. 92–96, 2005, doi: 10.1109/tdc.2002.1176849.
- [15] J. Leovaldo da Silva Mello, D. Antônio Amâncio, M. Chagury, L. Antônio Rasia, H. Furlan, and M. Amorim Fraga, “TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL Harmonic detection and energy optimization of electrical installations using an Arduino microcontroller system Detección de armónicos y optimización energética de instalaciones eléctricas mediante un sistema de microcontrolador Arduino,” vol. 42, no. 1, p. 1501, 2021, [Online]. Available: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE1>.
- [16] S. Devassy and B. Singh, “Control of a Solar Photovoltaic Integrated Universal Active Power Filter Based on a Discrete Adaptive Filter,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 3003–3012, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2778346.
- [17] S. Devassy and B. Singh, “Control of Renewable Energy Integrated Universal Active Filter for Modern Distribution Systems,” *India Int. Conf. Power Electron. IICPE*, vol. 2018-Decem, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709525.
- [18] R. Chilipi, N. Al Sayari, and J. Y. Alsawalhi, “Control of single-phase solar power generation system with universal active power filter capabilities using least mean mixed-norm (LMMN)-based adaptive filtering method,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 879–893, 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2911852.
- [19] S. Devassy and B. Singh, “Implementation of Solar Photovoltaic System with Universal Active Filtering Capability,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 4, pp. 3926–3934, 2019, doi:

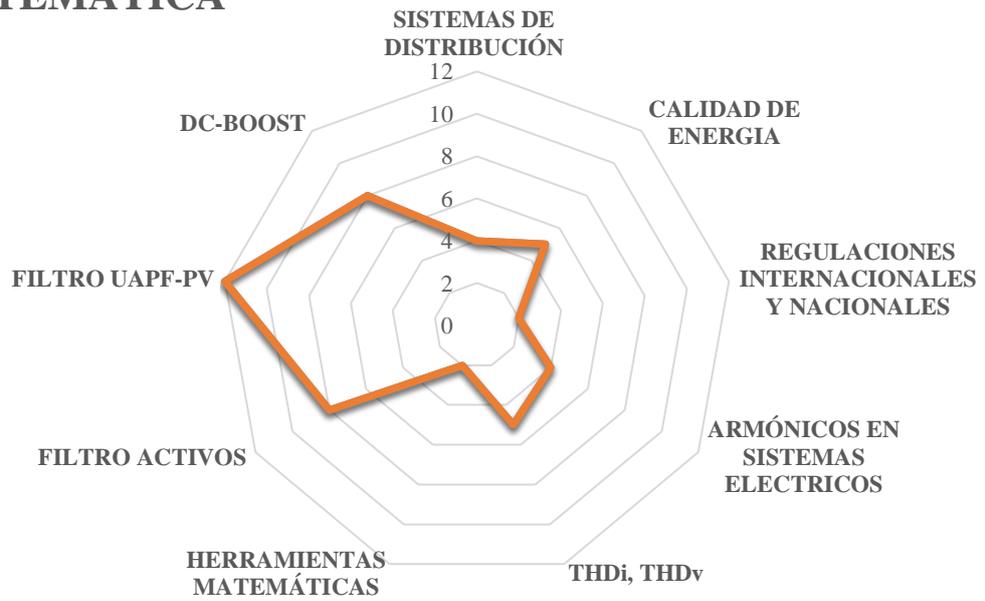
- 10.1109/TIA.2019.2906297.
- [20] M. Golla, S. Sankar, and K. Chandrasekaran, "Renewable integrated UAPF fed microgrid system for power quality enhancement and effective power flow management," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 133, no. May, p. 107301, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107301.
- [21] W. R. N. Santos *et al.*, "The transformerless single-phase universal active power filter for harmonic and reactive power compensation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 7, pp. 3563–3572, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2280691.
- [22] M. Golla, K. Chandrasekaran, and S. P. Simon, "PV integrated universal active power filter for power quality enhancement and effective power management," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 61, pp. 104–117, 2021, doi: 10.1016/j.esd.2021.01.005.
- [23] S. Devassy and B. Singh, "Control of solar energy integrated active power filter in weak grid system," *2017 7th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2017*, pp. 573–578, 2018, doi: 10.1109/ICPES.2017.8387359.
- [24] W. D. P. Vallejos, "Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control," *2017 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. - Lat. Am. ISGT Lat. Am. 2017*, vol. 2017-January, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126705.
- [25] W. C. Lai, S. L. Jang, C. Y. Huang, and M. H. Juang, "Fully-Integrated CMOS DC-DC Boost Converter," vol. 1, pp. 84–88, 2019.
- [26] L. Padrón Suárez, L. Gutiérrez Urdaneta, R. Hidalgo González, and C. de la Incera Núñez, "Uso de paneles bifaciales en sistemas fotovoltaicos de ángulo fijo y de seguimiento horizontal de un eje," *Ing. Energética*, vol. 41, no. 3, pp. 1–11, 2020.
- [27] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. González, G. J. López, and I. Isaac, "Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode," *Heliyon*, vol. 5, no. 12, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [28] J. Dixon, Y. Del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L. Morán, and C. Maffrand, "A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 5, pp. 982–989, 2003, doi: 10.1109/TIE.2003.817604.
- [29] B. Rooholahi and P. L. Reddy, "Concept and application of PID control and implementation of continuous PID controller in Siemens PLCs," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 35, 2015, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i35/82262.
- [30] S. Thomsen, N. Hoffmann, and F. W. Fuchs, "PI control, PI-based state space control, and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads-A comparative study," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3647–3657, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2089950.
- [31] M. Andreasson, D. V. Dimarogonas, H. Sandberg, and K. H. Johansson, "Distributed PI-control with applications to power systems frequency control," *Proc. Am. Control Conf.*, pp. 3183–3188, 2014, doi:

- 10.1109/ACC.2014.6858999.
- [32] S. Pinzón and W. Pavón, “Diseño de Sistemas de Control Basados en el Análisis del Dominio en Frecuencia,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 15, no. 2, pp. 76–82, 2019, doi: 10.37116/revistaenergia.v15.n2.2019.380.

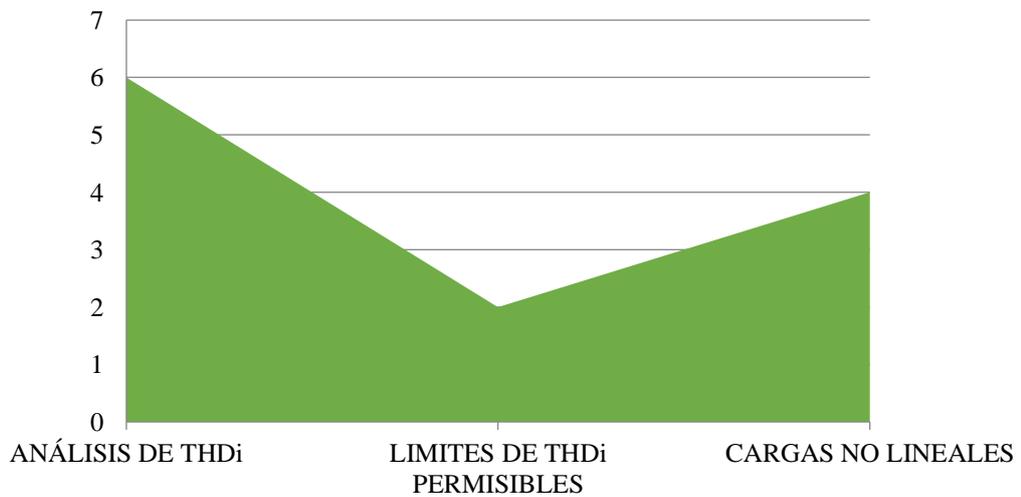
CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

DATOS		TEMÁTICA									FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	SECTORES DE DISTRIBUCIÓN	CALIDAD DE ENERGÍA	REGULACIONES INTERNACIONALES Y NACIONALES	ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	THDI, THDV	HEBRAMIENTAS MATEMÁTICAS	FILTRO ACTIVOS	FILTRO UAPF-PV	DC-BOOST	ANÁLISIS DE THDI	LÍMITES DE THDI PERMISIBLES	CARGAS NO LINEALES	THDI	NIVEL DE TENSION	OSCILACIONES DEL CONTROL PI	UAPF-PV	SIMULACIONES	LÍMITES PERMISIBLES DE THDI	FILTRO UAPF-PV TRIFÁSICO	CONTROL PI	COMPENSACION DE CORRIENTES ARMÓNICAS
1	2013	Stability analysis of an energy managed smart distribution system	✗																				
2	2011	Analysis of various all-electric-ship electrical distribution system topologies	✗																				
3	2019	Implementation of Power Quality Enhancement using Hybrid Series Active Filter	✗																				
4	2018	IEEE Power and Energy Society General Meeting		✗	✗		✗				✗	✗		✗	✗					✗			
5	2020	ARCERNR, "Regulación-002-20"		✗	✗		✗				✗	✗		✗	✗					✗			
6	2014	Comparison controllers for inverter operating in island mode in microgrids with linear and nonlinear loads		✗							✗		✗										
7	2010	Contaminación Armónica Producida Por Cargas No Lineales De Baja Potencia: Modelo Matemático Y Casos Prácticos Harmonic Pollution Produced By Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and		✗		✗					✗		✗		✗								
8	2006	Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones		✗		✗					✗		✗										
9	2019	Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis				✗							✗										
10	2015	Analysis of a modulation technique applied to FC inverter for THD reduction				✗	✗				✗												
11	2019	Analysis of PFC Improvement and THD Reduction Achieved by PFC-based Zeta Converter and PWM-Rectifier					✗																✗
12	2017	Reduction of Total Harmonic Distortion (THD) on Multilevel Inverter with Modified PWM using Genetic Algorithm					✗																✗
13	2017	Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia						✗															✗
14	2005	Novel concept of a PV power generation system adding the function of shunt active filter							✗	✗								✗					
15	2021	Harmonic detection and energy optimization of electrical installations using an Arduino microcontroller system Detección de armónicos y optimización energética de instalaciones eléctricas mediante un sistema							✗	✗								✗					✗

TEMÁTICA



FORMULACIÓN DEL PROBLEMA



SOLUCIÓN DADA MEDIANTE

