

**REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA
MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA
MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE
POTENCIA CONTROLADO POR LA
FUNCIÓN DE LYAPUNOV**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA
MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA
MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE
POTENCIA CONTROLADO POR LA
FUNCIÓN DE LYAPUNOV**

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

AUTOR: MICHAEL BRANDON CHAMORRO LUCAS
TUTOR: WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS

Quito -Ecuador
2023

Michael Brandon Chamorro Lucas

**REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA
MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA
FUNCIÓN DE LYAPUNOV**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Michael Brandon Chamorro Lucas (Y'1999). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Militar “Eloy Alfaro” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la reducción armónica en un sistema de distribución mediante el uso de un filtro activo que utiliza un control basado en Lyapunov.
mchamorro@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@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

©2023 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Michael Brandon Chamorro Lucas con documento de identificación N° 1726325689 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, 17 de octubre del año 2023

Atentamente,



Michael Brandon Chamorro Lucas
1726325689

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

Yo, Michael Brandon Chamorro Lucas con documento de identificación No. 1726325689, 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: “Reducción de armónicos para mejorar la calidad de energía mediante un filtro activo de potencia controlado por la función de Lyapunov”, 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, 17 de octubre del año 2023

Atentamente,



Michael Brandon Chamorro Lucas


1726325689

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: REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV, realizado por Michael Brandon Chamorro Lucas con documento de identificación N° 1726325689, 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, 17 de octubre del año 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'W' followed by several loops and a long horizontal stroke extending to the right. The signature is positioned above a dashed horizontal line.

Ing. Wilson David Pavón Vallejos, MSc.
1719224311

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Redes de distribución.....	3
2.2	Generación distribuida	4
2.3	Calidad de Energía	4
2.4	Armónicos	5
2.5	Filtros activos.....	6
2.5.1	Tipos de filtros.....	6
2.6	Funcionamiento del control de Lyapunov	7
3	Planteamiento del problema	8
3.1	Filtro activo de potencia hibrido.....	9
3.2	Modelación del filtro.....	9
3.3	Estrategia de control basado en Lyapunov	12
3.4	Caso de estudio	14
4	Análisis de resultados	15
5	Conclusiones.....	18
6	Trabajos futuros.....	19
7	Referencias.....	19
7.1	Matriz de Estado del Arte	23
7.2	Resumen de Indicadores.....	28
8	Anexos.	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de distribución [autor].	3
Figura 2. Generación Distribuida [autor].	4
Figura 3. Configuración tradicional del APF de potencia paralelo.	6
Figura 4. Configuración tradicional del APF de potencia en serie.	7
Figura 5. Topología del SHAPF conectado en derivación.	8
Figura 6. Diagrama de bloques del controlador.	13
Figura 7. Sistema de 13 barras IEEE.	14
Figura 8. Sistema IEEE 13 barras con SHAPF	15
Figura 9. Voltaje del lado de la fuente antes del filtrado en [pu].	16
Figura 10. Corriente del lado de la fuente antes del filtrado en [pu].	16
Figura 11. Corriente del lado de la carga antes del filtrado en [pu].	16
Figura 12. THDi del lado de la fuente antes del filtrado.	16
Figura 13. Voltaje del lado de la fuente después del filtrado en [pu].	17
Figura 14. Corriente del lado de la fuente después del filtrado del filtrado en [pu].	17
Figura 15. Corriente del lado de la carga en [pu].	17
Figura 16. Voltaje del capacitor del filtro	17
Figura 17. THDi después del filtrado.	17
Figura 18. Distorsión armónica mediante la transformada rápida de Fourier antes del filtrado. 18	
Figura 19. Distorsión armónica mediante la transformada rápida de Fourier después del filtrado	18
Figura 20. Voltajes de las barras con el filtro en [pu].	18
Figura 21. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	28
Figura 22. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	28
Figura 23. Indicador de solución - Estado del arte.	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de voltaje en MV Distribución.....	3
Tabla 2. Niveles de voltaje en BV Distribución.....	3
Tabla 3.Límites de distorsión de voltaje norma IEEE Std 519-2022.....	6
Tabla 4. Límites de distorsión de corriente armónica norma IEEE Std 519-2022.....	6
Tabla 5.Parametros del transformador	15
Tabla 6.Parametros de la NLL	15
Tabla 7.Parametros de SAPF	15
Tabla 8. Comparación de THDi antes y después del filtrado.....	18
Tabla 9: Matriz de estado del arte.	23
Tabla 10. Información de las líneas aéreas del sistema IEEE 13 barras.	30
Tabla 11. Información de las líneas soterradas del sistema IEEE 13 barras.	30
Tabla 12. Información de la distancia de las líneas del sistema IEEE 13 barras.	30
Tabla 13.Informacion de los transformadores del sistema IEEE 13 barras.	30
Tabla 14.Información de los capacitores del sistema IEEE 13 barras	30
Tabla 15.Información de las cargas del sistema IEEE 13 barras.	31

REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV

Resumen

En el artículo se realizó la mejora de la calidad de energía mediante la reducción de armónicos, donde se utiliza un filtro activo de potencia híbrido (SHAPF), que se controla mediante la función de Lyapunov, el cual utiliza la retroalimentación de estados para encontrar la estabilidad del sistema. Se plantea una carga no lineal (NLL) que es la que inyecta armónicos a la red.

Se usa el sistema de distribución de 13 barras de la IEEE el cual es ejecuta mediante Simulink. Para la modelación del filtro se utilizan los bloques de Simulink y Matlab tanto como para su respectivo control y extracción de los datos de la distorsión armónica obtenida, para realizar la comparación del sistema con el filtro y su control, y sin el filtro.

Además, se obtuvo una reducción de los armónicos de alrededor de 25% en cada fase donde se mejoró la calidad de energía (CE).

Palabras Clave: Cargas no lineales, Control, Distorsión armónica, Filtro activo, Generación Distribuida, Lyapunov.

Abstract

The paper aims to improve the power quality by reducing harmonics, where a hybrid active power filter (SHAPF) is used, which is controlled by Lyapunov function, which uses state feedback to find the system stability. A nonlinear load (NLL) is considered, which is the one that injects harmonics to the network.

The IEEE 13-bar distribution system is used, which is executed by means of Simulink. Simulink and MATLAB blocks are used for the modeling of the filter, as well as for its respective control and extraction of the harmonic distortion data obtained, to compare the system with the filter and its control, and without the filter.

In addition, a harmonic reduction of about 25% was obtained in each phase where the power quality was improved.

Keywords: Non-linear loads, Control, Harmonic distortion, Active filter, Distributed generation, Lyapunov.

1 Introducción

Los requerimientos de energía eléctrica han experimentado un aumento significativo en gran parte debido a la urbanización, y el precipitado crecimiento de las zonas industriales y una dependencia cada día mayor a la tecnología. Los sistemas eléctricos se enfrentan a importantes problemas como consecuencia del aumento de la demanda, ya que deben de trabajar para satisfacer las necesidades energéticas y mantener el suministro de electricidad [1].

Las NLL toman cada vez más importancia en el mundo actual. Estas cargas están formadas por componentes que no tienen una línea recta entre la tensión que se les aplica y la corriente generada [2].

La CE es una de las cualidades que posee la electricidad y que repercute en el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos. Se trata de un ámbito multidimensional que incluye factores como la estabilidad de la tensión, las fluctuaciones de frecuencia, las perturbaciones transitorias y la presencia de armónicos. Los armónicos, en particular son formas de onda sinusoidales indeseables que se apartan de la onda sinusoidal ideal [3].

Los filtros activos de potencia (APF) han evolucionado como instrumentos útiles para solventar los problemas derivados de una CE no adecuada. Los APF son avanzados dispositivos que trabajan en tiempo real, detectan, evalúan y corrigen dinámicamente las distorsiones armónicas, la potencia reactiva y otros problemas. Estos pueden reducir armónicos, limitar las oscilaciones de voltaje y mejorar la CE introduciendo activamente corrientes de compensación en el sistema eléctrico [2].

Del mismo modo, la noción de DG ha ganado aceptación en los últimos años. Esta supone producir energía eléctrica más cerca del punto de uso empleando diversas

fuentes de energía eléctrica, como la solar, la eólica [4]. Las ventajas de la DG incluyen reducción de las pérdidas de transmisión, el aumento de la fiabilidad del sistema y la posibilidad de integrar varios sistemas de energía renovable son algunas [5].

Esto da a entender que la combinación acertada de los APF y la DG es enormemente prometedora. Estas dos tecnologías complementarias pueden funcionar juntas, pueden crear una coexistencia entre la generación y el consumo de la energía eléctrica. Los APF pueden regular activamente los armónicos y otros problemas de la CE causados por la DG, que permite una transición hacia un entorno energético más limpio y confiable [2], [5].

Esto recalca la importancia que tienen los APF en la actualidad y el futuro de la energía eléctrica, además se debe de tomar en cuenta el comportamiento de los mismos y las diferentes maneras en las se puede ejercer una forma de control, que permita garantizar su correcto funcionamiento para el beneficio del sistema eléctrico [6].

En este artículo se toma una medida para reducir los armónicos, los cuales son señales múltiplos de la frecuencia fundamental en los Sistemas Eléctricos, los mismos que provocan la formación de ondas senoidales deformadas de voltaje o corriente que son causadas por NLL [7]. En la red de distribución (DN) las corrientes armónicas que ingresan al sistema producen varios problemas.

Para combatir a los armónicos en este artículo se utiliza un APF que mediante un controlador que utiliza Lyapunov, inyecta las respectivas corrientes de compensación a la red.

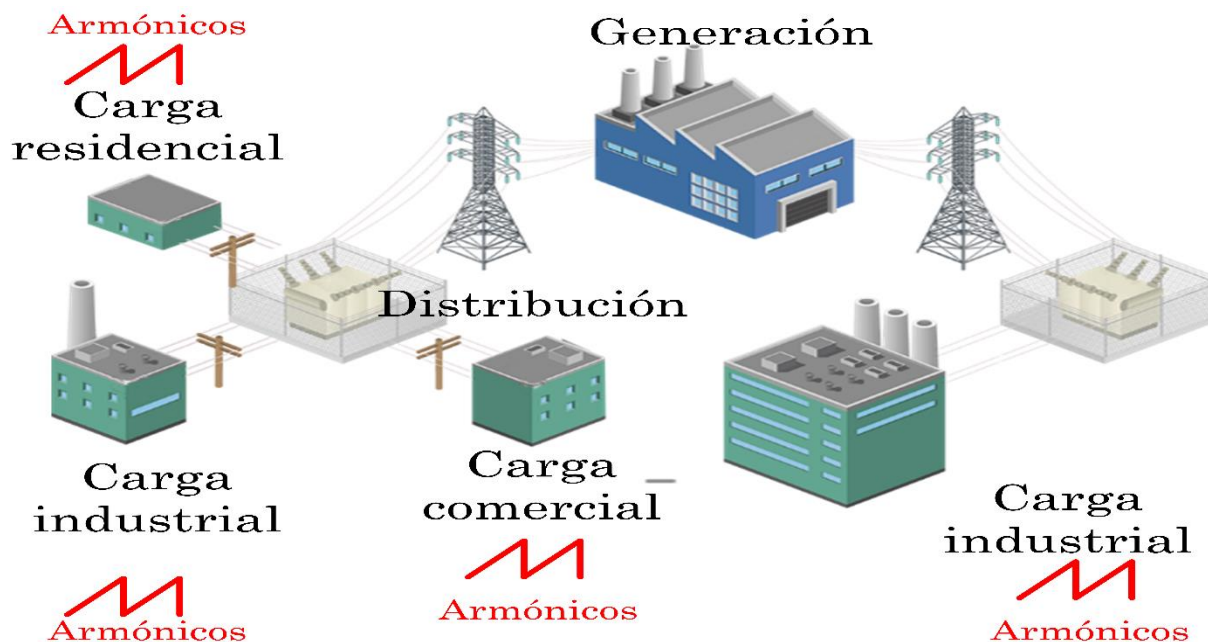


Figura 1. Red de distribución [autor].

Esta investigación se organiza de manera que en la parte 2, marco teórico se establecen varios conceptos necesarios para la comprensión del artículo, como también el funcionamiento del APF y control por Lyapunov. En la parte 3, planteamiento del problema se identifica y se define las problemáticas y la carga no lineal implementada, que produce los armónicos. En la parte 4, Análisis de resultados se muestran los datos obtenidos antes y después del procedimiento de filtrado. En la parte 5, conclusiones se puede leer la sintetización de los resultados obtenidos que dan respuesta a los objetivos, y la parte 6 donde se describe los trabajos a futuro que se puede realizar

2 Marco teórico

En este artículo se toma una medida para reducir los armónicos

2.1 Redes de distribución

Las redes de distribución eléctrica están conformadas por grupos de elementos como líneas de distribución, transformadores, etc. Los cuales permiten que alimente diferentes tipos de cargas como lo son las NLL y las

cargas lineales, a diferentes tipos de voltaje como la muesta la tabla 1 y la tabla 2, de manera que el suministro energético sea confiable y eficiente buscando tener la menor cantidad de pérdidas[8].

Las redes de distribución de energía eléctrica tienen la ventaja de poder ser simplificadas en el momento de diseñarlas al igual que las protecciones que estas llevan [9].

Tabla 1. Niveles de voltaje en MV Distribución

Niveles de MV	Unidad
6,3	kV
13,2	kV
22,8	kV

Tabla 2. Niveles de voltaje en BV Distribución

Tipo	Niveles de BV	Unidad
Trifásico	220/127	V
Monofásico	240/120	V

El objetivo principal que poseen las redes de distribución es el transporte de energía desde la subestación de distribución

hasta el usuario buscando que las necesidades energéticas del mismo sean cubiertas y buscando que la misma sea entregada al usuario con la mayor calidad posible [10].

2.2 Generación distribuida

La DG se refiere a la generación de electricidad cerca de los usuarios finales, en lugar de en centrales eléctricas centralizadas se lo visualiza en la figura 2. Esto podría incluir fuentes de energía renovable a escala reducida, como paneles solares, turbinas eólicas, sistemas micro hidroeléctricos, o incluso sistemas combinados de calor y energía (CHP) que generan tanto calor como electricidad [11].

Los efectos de la DG en la DN pueden ser tanto favorables como desfavorables. En el lado favorable, la DG puede aumentar la confiabilidad y la resiliencia de la red eléctrica, reducir las pérdidas de transmisión y distribución y aumentar la eficiencia energética. En el lado negativo, la DG puede aumentar la complejidad de la red eléctrica, lo que podría generar problemas como el aumento de voltaje, problemas de CE y una mayor demanda en la DN. Además, la integración de la DG en la red a menudo requiere mejoras significativas en la infraestructura existente [6].

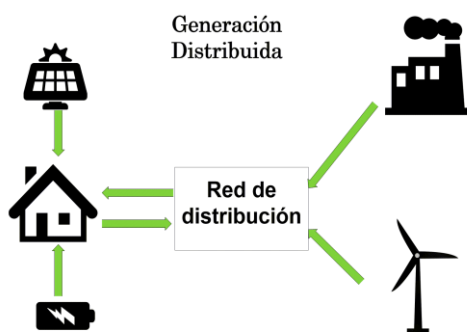


Figura 2. Generación Distribuida [autor].

2.3 Calidad de Energía

El término CE surgió a fines del siglo XX como una forma de describir los diversos

factores que pueden afectar la calidad energética del suministro eléctrico a partir del establecimiento de estándares para medir y el aumento de la calidad energética [3].

La CE es de gran importancia para muchas industrias y empresas, así como para las personas, ya que puede tener un impacto importante en el rendimiento y la eficiencia de los equipos y dispositivos eléctricos [3],[12].

Según la IEEE, la CE se la puede precisar como un sistema tiene la capacidad de suministrar las ondas de voltaje y corriente de una forma apropiada para la carga. En otras palabras, la CE se trata de garantizar que la electricidad que se suministra a una ubicación o dispositivo en particular tenga el voltaje, la corriente y la estabilidad suficientes para satisfacer las necesidades de la carga [13].

Hay un gran número de factores que pueden llegar a alterar la CE:

- Las fluctuaciones de voltaje pueden ocurrir por una variedad de razones, incluidos cambios en la carga del sistema de energía, la presencia de equipos defectuosos o problemas con la transmisión o distribución de electricidad [12].
- Los cortes de energía, también conocidos como apagones, pueden ser causados a partir de una gran variedad de elementos, que incluyen tormentas, accidentes y fallas en los equipos [13].
- Los armónicos son oscilaciones de alta frecuencia en la corriente eléctrica que pueden causar problemas con el funcionamiento de ciertos tipos de equipos eléctricos [13].

IEEE ha establecido una serie de estándares para cuantificar y optimizar la CE, incluido el Estándar 1100: Práctica recomendada para el suministro y conexión

a tierra de dispositivos electrónicos y el Estándar 1159. Estos estándares brindan pautas para identificar y abordar problemas con la CE y para garantizar que los suministros de energía eléctrica sean seguros y confiables [13].

Un método común para medir la CE es mediante el uso de analizadores de CE. Estos dispositivos se utilizan para medir una variedad de parámetros que tienen que ver con la calidad de un suministro de energía eléctrica, incluidos el voltaje, la corriente y la frecuencia. Es posible utilizar dispositivos de análisis de la CE para identificar problemas con la CE y diagnosticar la causa de esos problemas [14].

Hay varias formas de mejorar la CE, incluido el uso de equipos de acondicionamiento de energía, como reguladores de voltaje y protectores contra sobretensiones. Los equipos de adecuación de energía pueden ayudar a estabilizar los niveles de voltaje, reducir el impacto de los armónicos y proteger contra cortes de energía y otras interrupciones [15].

2.4 Armónicos

Los armónicos se refieren a la presencia de varias frecuencias en un sistema eléctrico que son múltiplos de la fundamental. Estas frecuencias, también conocidas como armónicos, en su mayoría son causadas por NLL como dispositivos electrónicos, variadores de frecuencia y convertidores de potencia [7], [16].

Hay dos tipos principales de armónicos: impares y pares.

Los armónicos pares, son menos comunes y, por lo general, menos preocupantes para el sistema eléctrico. Por lo general, son causados por la interacción de múltiples fuentes armónicas en el sistema. Los armónicos pares pueden causar

algunas pérdidas de potencia y distorsión, pero normalmente son menos graves que los armónicos impares [17].

Los armónicos impares suelen ser causados por NLL, como dispositivos electrónicos, variadores de frecuencia y convertidores de potencia. Estos armónicos tienden a ser más frecuentes y pueden causar mayores pérdidas de potencia y distorsión en el sistema eléctrico [17].

La siguiente ecuación nos da la cantidad de distorsión armónica total:

$$THDi(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} In^2}}{If} \quad (1)$$

Donde:

In : Elemento armónico de corriente.

If : Elemento fundamental de corriente.

n : orden del armónico.

La presencia de armónicos en una DN eléctrica puede tener varios efectos negativos tanto en la red como en los equipos conectados a la misma, la cantidad de estos está delimitada por las tablas 3 y 4. Los armónicos pueden provocar un incremento de la corriente, un aumento del voltaje y un aumento del consumo de energía, lo que hace que exista un mayor desgaste de los equipos y una disminución su eficiencia [17], [18]. También pueden causar problemas de factor de potencia, lo que genera un aumento de los costos para la compañía que presta el servicio eléctrico y una disminución de la CE para los clientes [18].

Tabla 3. Límites de distorsión de voltaje norma IEEE Std 519-2022.

Nivel de tensión (V)	Distorsión armónica total permisible (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.5

Tabla 4. Límites de distorsión de corriente armónica norma IEEE Std 519-2022

I_{sc}/I_t	Distorsión armónica total permisible (%)
< 20	5
$20 < 50$	8
$50 < 100$	12
$100 < 1000$	15
> 1000	20

Los armónicos pueden provocar un aumento de la corriente en el conductor neutro, lo que provoca un aumento del calentamiento y posibles daños al conductor, además un aumento de la tensión crea una distorsión de voltaje que puede provocar fallas en los equipos [7], [19].

Estos asimismo generan un mayor consumo de energía en la DN. Ya que aportan pérdidas en la red. También pueden causar un mayor consumo de energía en cargas individuales [19].

Para disminuir los efectos que producen las componentes armónicas en la DN eléctrica, se pueden utilizar varias técnicas. Una técnica son los APF, que pueden cancelar activamente las frecuencias [20].

Otra manera es el uso de filtrado pasivo, que incluye el uso de componentes pasivos

como reactores y condensadores para filtrar las frecuencias armónicas [20], [21].

2.5 Filtros activos

Los filtros armónicos son dispositivos que utilizan elementos activos como la electrónica de potencia empleados para disminuir la distorsión armónica en un sistema de energía eléctrica. La distorsión armónica es causada por NLL. Los filtros armónicos se utilizan para mitigar los problemas, al filtrar las frecuencias armónicas y reducir la distorsión armónica en el sistema eléctrico [22].

Los APF se usan más comúnmente en sistemas de potencia en un rango de medio a alto, donde la distorsión armónica es severa. También se utilizan en situaciones en las que la distorsión armónica está bien definida y se conocen las frecuencias armónicas [22], [23].

2.5.1 Tipos de filtros

Los filtros activos se pueden clasificar en términos generales en dos categorías: filtros activos en derivación y filtros activos en serie [2].

Los filtros activos de derivación, se lo aprecia en la figura 3, están conectados en paralelo con la carga y extraen corriente del sistema de alimentación para filtrar la distorsión armónica [2].

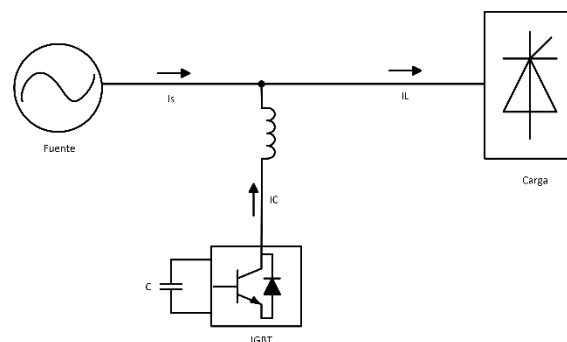


Figura 3. Configuración tradicional del APF de potencia paralelo.

Los APF en serie, se lo aprecia en la figura 4, están conectados en serie con la carga e inyectan corriente en el sistema de potencia para filtrar la distorsión armónica [2].

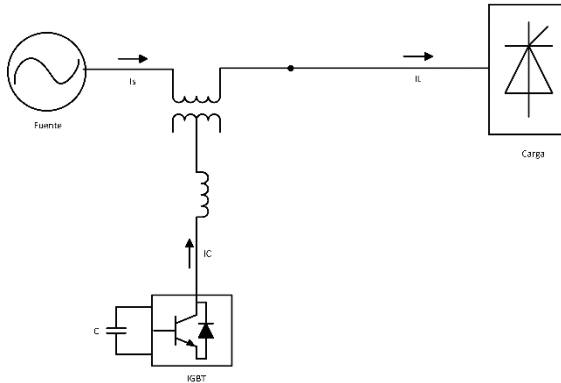


Figura 4. Configuración tradicional del APF de potencia en serie.

Los APF pueden tener varias configuraciones como en [24] donde el artículo presenta una propuesta para un filtro activo unificado de potencia (UAPF) con el objetivo de reducir la distorsión armónica total (THD). Que, para ello, se utiliza una generación fotovoltaica (PV) como fuente del UAPF, junto con un convertidor boost.

2.6 Funcionamiento del control de Lyapunov

La idea básica detrás del control de Lyapunov es encontrar una función de Lyapunov, que es una función escalar que describe la energía o el potencial del sistema [25].

El cambio en la función de Lyapunov con el tiempo se usa para determinar la estabilidad del sistema. Si el cambio en la función de Lyapunov es negativo, el sistema se considera estable. La ley de control está diseñada para conducir el sistema a su comportamiento deseado modificando el cambio en la función de Lyapunov [25].

Las ventajas del control de Lyapunov incluyen la capacidad de proporcionar una prueba matemática de estabilidad, que es útil para demostrar que la ley de control producirá el comportamiento deseado [26].

Además, el control de Lyapunov se puede usar para diseñar leyes de control para sistemas no lineales, que pueden ser difíciles de controlar con otros métodos [26].

A pesar de su desventaja, el control de Lyapunov es un método ampliamente utilizado y bien establecido para la esquematización de sistemas de control. Es especialmente útil en el planteamiento de sistemas de control para sistemas no lineales complejos y se ha aplicado en una variedad de campos [25], [26].

En los documentos [27],[28] se establece que este método y más preciso que el método tradicional de análisis de estabilidad y es útil para elegir valores de regulación parametrizados adecuados para garantizar un buen resultado de compensación de corriente armónica manteniendo el sistema estable.

2.6.1 Control PI

El controlador PI se utiliza comúnmente en el control de convertidores electrónicos de potencia y también en el control de inversores que interactúan con la red eléctrica. Por lo general, las constantes de estos controladores se determinan mediante diferentes metodologías y el modelo matemático del sistema, empleando métodos como el de Ziegler-Nichols. Diversos factores, como el ruido pueden afectar el rendimiento del controlador [29].

La ecuación 2 en el dominio de tiempo muestra el cálculo del mismo:

$$x(t) = k_p * e(t) + k_i \int_0^t e t dt \quad (2)$$

El controlador PI tiene una ganancia proporcional (k_p) y una ganancia integral (k_i) y $e(t)$ corresponde a la función del sistema.

2.6.2 PWM

La modulación por ancho de pulso (PWM) se puede ver como una especie de esquema cuantizado. Convierte la señal en niveles, lo que corresponde al encendido y apagado del controlador. En el contexto del control PWM, el tiempo se divide en una serie de ciclos iguales, y luego la señal de control PWM enciende el controlador durante una parte de cada ciclo y lo apaga durante el resto del ciclo. Sin embargo, es importante señalar que el controlador de encendido y apagado introduce características no lineales fuertes, como la discontinuidad y la saturación, en el sistema [30].

3 Planteamiento del problema

El control de un APF se lleva a cabo con el propósito de mejorar la CE en un sistema de potencia. Esta tarea implica la constante supervisión y ajuste de los parámetros del filtro con el fin de asegurar una respuesta óptima y eficiente ante las perturbaciones, principalmente los armónicos presentes en el sistema eléctrico. Esto implica la búsqueda constante de diferentes formas para controlar a los APF y obtener una mejora de la CE [5].

Para solucionar este problema se plantea la utilización de un SHAPF el cual está controlado a partir de Lyapunov, el mismo que permite la disminución de la distorsión armónica en la red eléctrica.

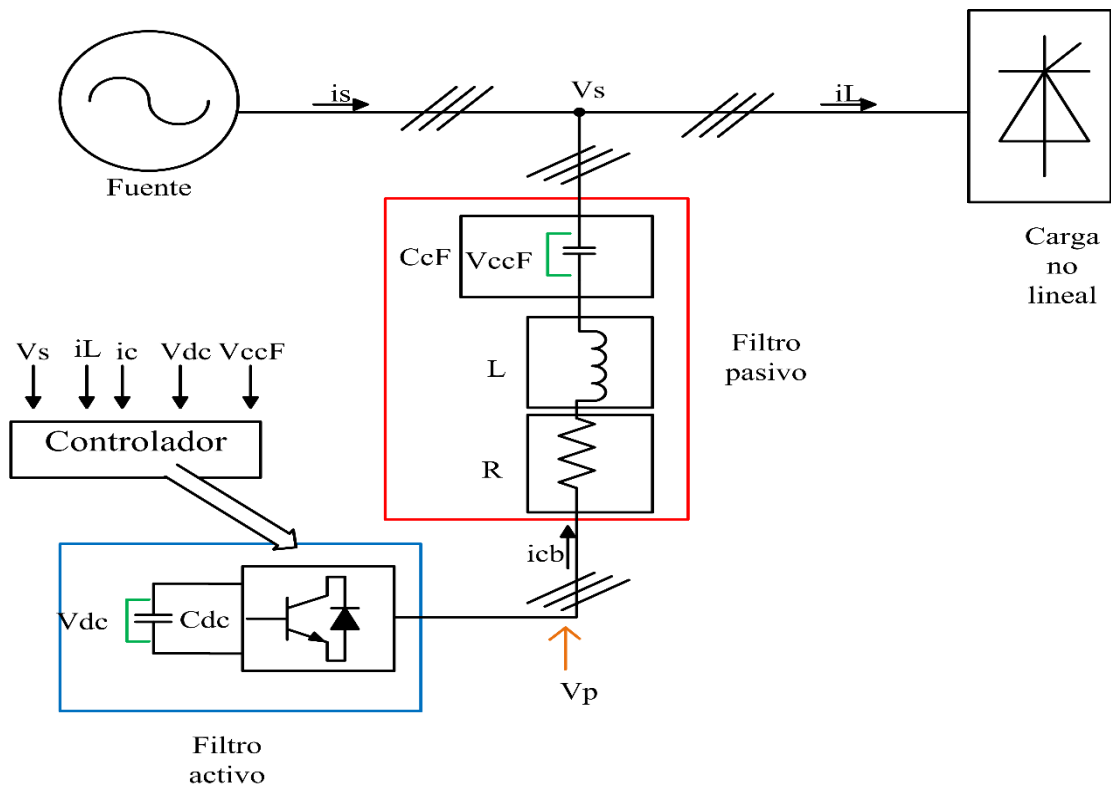


Figura 5. Topología del SHAPF conectado en derivación.

3.1 Filtro activo de potencia híbrido

La Figura 5 muestra la topología del filtro el cual consiste en un inversor del voltaje trifásico que está conectado en serie a un filtro pasivo y a su vez está conectado en su punto común a una NLL la cual se compone de un diodo rectificador con una carga R-L, que es una representación de una NLL que va a ser compensada [31], [32].

3.2 Modelación del filtro

Para encontrar el comportamiento matemático que tiene el filtro se utiliza las leyes de Kirchhoff tanto de voltaje como de corriente [33], [34] se puede deducir:

$$Vsa = L \frac{dica}{dt} + R * ica + VccFa + Vap + Vpq \quad (3)$$

$$Vsb = L \frac{dich}{dt} + R * ich + VccFb + Vbp + Vpq \quad (4)$$

$$Vsc = L \frac{dics}{dt} + R * ics + VccFc + Vcp + Vpq \quad (5)$$

$$ifa = CcF \frac{dVccFa}{dt} \quad (6)$$

$$ifb = CcF \frac{dVccFb}{dt} \quad (7)$$

$$ifc = CcF \frac{dVccFc}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{dVdc}{dt} = \frac{1}{Cdc} * idc \quad (9)$$

Se asume que los voltajes del sistema se encuentran balanceados:

$$Vsa + Vsb + Vsc = 0 \quad (10)$$

$$Vpq = -\frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 Vnp \quad (11)$$

Donde se obtiene que m es la función de cambio.

$$cm = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$Vmp = Cm * Vdc \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{diCm}{dt} = & -\frac{R}{L} * iCm - \frac{VccFm}{L} \\ & - \frac{1}{L} \left(Cm \right. \\ & \left. - \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 Cn \right) * Vdc \\ & + \frac{Vsm}{L} \end{aligned} \quad (14)$$

Que a su vez nos da una función de conmutación que se encuentra definida por:

$$dmm = \left(Cm - \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 Cn \right)_m \quad (15)$$

Por los estados permisibles del APF se realiza la conversión de Cm a dmm dado por:

$$\begin{bmatrix} dm1 \\ dm2 \\ dm3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Debido a que dmm no tiene componente de secuencia cero. El modelo del componente DC se encuentra expresado por:

$$\begin{aligned} \frac{dVdc}{\partial t} &= \frac{1}{Cdc} idc \\ &= \frac{1}{Cdc} \sum_{n=1}^3 Cn * icn \end{aligned} \quad (17)$$

Donde se demuestra que:

$$\sum_{n=1}^3 dmn * icn = \sum_{n=1}^3 Cn * icn \quad (18)$$

Y se obtiene la relación:

$$\frac{dVdc}{dt} = \frac{1}{Cdc} \sum_{n=1}^3 dmn * icn \quad (19)$$

En ausencia de corriente del componente cero en ac y la función dmm se da la siguiente ecuación diferencial en el lado dc.

$$\begin{aligned} \frac{dVdc}{dt} &= \frac{1}{Cdc} [2 * dm1 \\ &\quad + dm2] ica \\ &\quad + \frac{1}{Cdc} [dm1 + 2 \\ &\quad * dm2] icb \end{aligned} \quad (20)$$

El modelo completo del filtro en las tres fases por tanto es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} ica \\ icb \\ Vdc \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{dm1}{L} \\ 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{dm2}{L} \\ \frac{2*dm1+dm2}{Cdc} & \frac{dm1+2*dm2}{Cdc} & 0 \end{bmatrix} * & \quad (21) \\ \begin{bmatrix} ica \\ icb \\ Vdc \end{bmatrix} &- \frac{1}{L} \begin{bmatrix} VccFa \\ VccFb \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Las tres fases se transforman a un sistema de referencia rotatorio síncrono de dos fases. La matriz está dada por

$$\begin{aligned} Adq^{123} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Se representa el ángulo de fase actual donde $\theta = \omega t$.

La consecuencia de la transformada da como resultado:

$$\begin{aligned} \frac{did}{dt} &= -\frac{R}{L} id + \omega iq - \frac{1}{L} VccFd \\ &\quad - \frac{dm1}{L} Vdc \\ &\quad + \frac{1}{L} Vsd \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{diq}{dt} &= -\frac{R}{L} iq - \omega id - \frac{1}{L} VccFd \\ &\quad - \frac{dm2}{L} Vdc \\ &\quad + \frac{1}{L} Vsq \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{dVccFd}{dt} = \frac{1}{CcF} id + \omega VccFq \quad (24)$$

$$\frac{dVccFq}{dt} = \frac{1}{CcF}iq + \omega VccFd \quad (25)$$

$$\frac{dVdc}{dt} = \frac{dmd}{Cdc}id + \frac{dmq}{Cdc}iq \quad (26)$$

Se escoge $x1 = id - id^*$, $x2 = iq - iq^*$, $x3 = VccFd - Vccfd^*$, $x4 = Vccfq - Vccfq^*$, $x5 = Vdc - Vdc^*$ donde $x1$, $x2$, $x3$, $x4$ y $x5$ son las variables de estado del sistema.

Las relaciones obtenidas son:

$$\begin{aligned} \frac{dx1}{dt} = & -\frac{R}{L}x1 + \omega x2 - \frac{x3}{L} \\ & - \frac{1}{L}dmd(x5 \\ & + Vdc^*) \\ & - \frac{Dmd}{L}Vdc^* \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx2}{dt} = & -\frac{R}{L}x2 - \omega x1 - \frac{x4}{L} \\ & - \frac{1}{L}dmq(x5 \\ & + Vdc^*) \\ & - \frac{Dmq}{L}Vdc^* \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx3}{dt} = & \frac{1}{CcF}x1 + \omega x4 - \frac{dVccFd^*}{dt} \\ & + \frac{1}{CcF}id^* \\ & + \omega VccFq^* \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx4}{dt} = & \frac{1}{CcF}x2 + \omega x3 - \frac{dVccFq^*}{dt} \\ & + \frac{1}{CcF}iq^* \\ & - \omega VccFd^* \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx5}{dt} = & \frac{1}{Cdc}[dmd(x1 + id^*) \\ & + dmq(x2 + iq^*) \\ & + Dmd id^* \\ & + Dmq iq^*] \end{aligned} \quad (31)$$

Donde Dmd y Dmq son las funciones de conmutación de estado estacionario, dmd y dmq son las funciones de conmutación globales

$$\begin{aligned} Dmd = & \frac{L}{Vdc^*} \left[-\frac{did^*}{dt} - \frac{R}{L}id^* \right. \\ & + \omega iq^* - \frac{VccFd^*}{L} \\ & \left. + \frac{1}{L}Vsd \right] \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} Dmq = & \frac{L}{Vdc^*} \left[-\frac{diq^*}{dt} - \frac{R}{L}iq^* \right. \\ & - \omega id^* - \frac{VccFq^*}{L} \\ & \left. + \frac{1}{L}Vsq \right] \end{aligned} \quad (33)$$

Además, en estado estacionario se puede obtener las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} -CcF \frac{dVccFd^*}{dt} + id^* \\ + CcF\omega VccFq^* \\ = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} -CcF \frac{dVccFq^*}{dt} + id^* \\ + CcF\omega VccFd^* \\ = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Obteniendo la siguiente relación

$$\frac{dx3}{dt} = \frac{1}{CcF}x1 + \omega x4 \quad (36)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = \frac{1}{CcF} x_2 - \omega x_3 \quad (37)$$

3.3 Estrategia de control basado en Lyapunov

La teoría de control de Lyapunov se basa en el concepto de equilibrio, lo que determina la estabilidad del filtro a través de una función de energía, esta es llamada normalmente función de Lyapunov $V(x)$, todos los sistemas ya sean lineales o no lineales son globalmente asintóticamente constantes si $V(x)$ es capaz de cumplir con las siguientes características [28], [33], [35] :

$$V(0, t) = 0$$

$$V(x, t) > 0 \text{ para todas las } x \neq 0$$

$$\dot{V}(x, t) < 0 \text{ para todas las } x \neq 0$$

$$V(x, t) \rightarrow \infty \text{ conforme } \|x\| \rightarrow \infty$$

La función de Lyapunov viene dada de acuerdo a:

$$V = \frac{3}{2} L x_1^2 + \frac{3}{2} L x_2^2 + \frac{3}{2} CcF x_3^2 + \frac{3}{2} CcF x_4^2 + \frac{1}{2} Cdc x_5^2 \quad (38)$$

El sistema global es estable, la derivada de la función es negativa.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & 3x_1(-Rx_1 + L\omega x_2 - x_3 \\ & - dmd(x_5 + Vdc^*)) \\ & - Dmd Vdc^*) \\ & + 3x_2(-Rx_2 - L\omega x_1 - x_4 \\ & - dmq(x_5 + Vdc^*) \\ & - Dmq Vdc^*) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & + 3x_3(x_1 + CcF\omega x_4) \\ & + 3x_4(x_2 - CcF\omega x_3) \\ & + x_5(dmd(x_1 + id^*) \\ & + dnq(x_2 + iq^*) + Dmd id^* \\ & + Dmq iq^*) \end{aligned}$$

Lo que hace posible expresar a (39) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -3R x_1^2 - 3R x_2^2 \\ & + dmd(x_5 id^* - 3x_1 Vdc^*) \\ & + dnq(x_5 iq^* - 3x_2 Vdc^*) \\ & + Dmd(x_5 id^* - 3x_1 Vdc^*) \\ & + Dmq(x_5 iq^* - 3x_2 Vdc^*) \\ & - 2dmd x_1 x_5 - 2dmq x_2 x_5 \end{aligned} \quad (40)$$

De manera que (40) se representa como:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -3R x_1^2 - 3R x_2^2 \\ & + dmd \\ & \left(x_5 id^* - 3x_1 \left(Vdc^* + \frac{2}{3} x_5 \right) \right) \\ & + dnq \\ & \left(x_5 iq^* - 3x_2 \left(Vdc^* + \frac{2}{3} x_5 \right) \right) \\ & + Dmd(x_5 id^* - 3x_1 Vdc^*) \\ & + Dmq(x_5 iq^* - 3x_2 Vdc^*) \end{aligned} \quad (41)$$

Se concluye por lo tanto que:

$$Vdc^* > x_5$$

Entonces

$$Vdc^* + \frac{2}{3} x_5 \cong Vdc^* \quad (42)$$

A causa de lo antes mencionado en (42) se determina que:

$$\begin{aligned}
 &+(dmd + Dmd) \\
 &(x5 id^* - 3x1 Vdc^*) \\
 &+(dmq + Dmq) \\
 &(x5 iq^* - 3x2 Vdc^*)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dV}{dt} == -3R x1^2 - 3R x2^2 \quad (43)$$

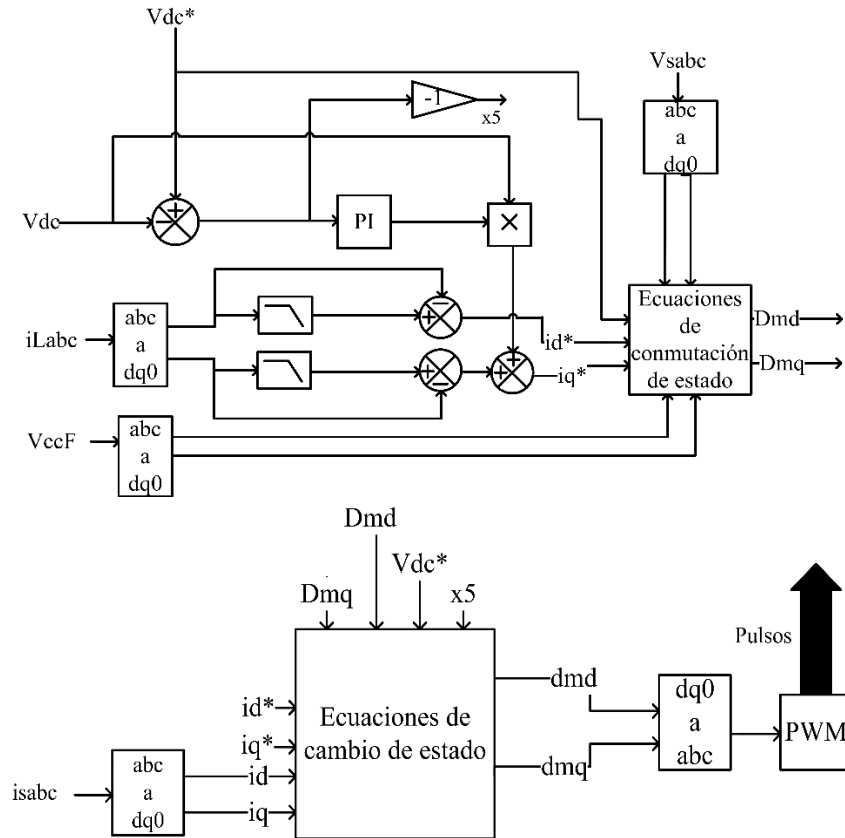


Figura 6. Diagrama de bloques del controlador.

Los primeros dos términos de la ecuación son negativos $-3R x1^2, -3R x2^2$ y se elige a las ecuaciones de cambio de estado como:

$$dmd = \alpha(x5 id^* - 3x1 Vdc^*) - Dmd \quad (44)$$

$$dmq = \alpha(x5 iq^* - 3x2 Vdc^*) - Dmq \quad (45)$$

Con un $\alpha < 0$, donde α es la ganancia del controlador.

Para la implementación de las ecuaciones de conmutación de estado donde se obtiene las señales Dmd y Dmq se ejecuta el pseudocódigo de la tabla 5.

Pseudocódigo de obtención de las señales de conmutación

Inicio
Paso 1: Entradas / Salidas

- Entradas \rightarrow L, Vdc, id, iq, Vsd, Vsq,
R, Θ , VccFd, VccFq
- Paso 2: Salidas \rightarrow Dmd ,Dmq
Extracción de datos de las señales
Vdc
id
iq
Vsd
Vsq
VccFd
VccFq
- Paso 3: Se deriva las señales de corriente
id, iq
- Paso 4: Cálculo de D_md
Solución de la ecuación para la
obtención Dmd
- Paso 5: Cálculo de D_mq
Solución de la ecuación para la
obtención Dmq
- Paso 6: Salida
Retornar D_md y D_mq
- Fin**
-

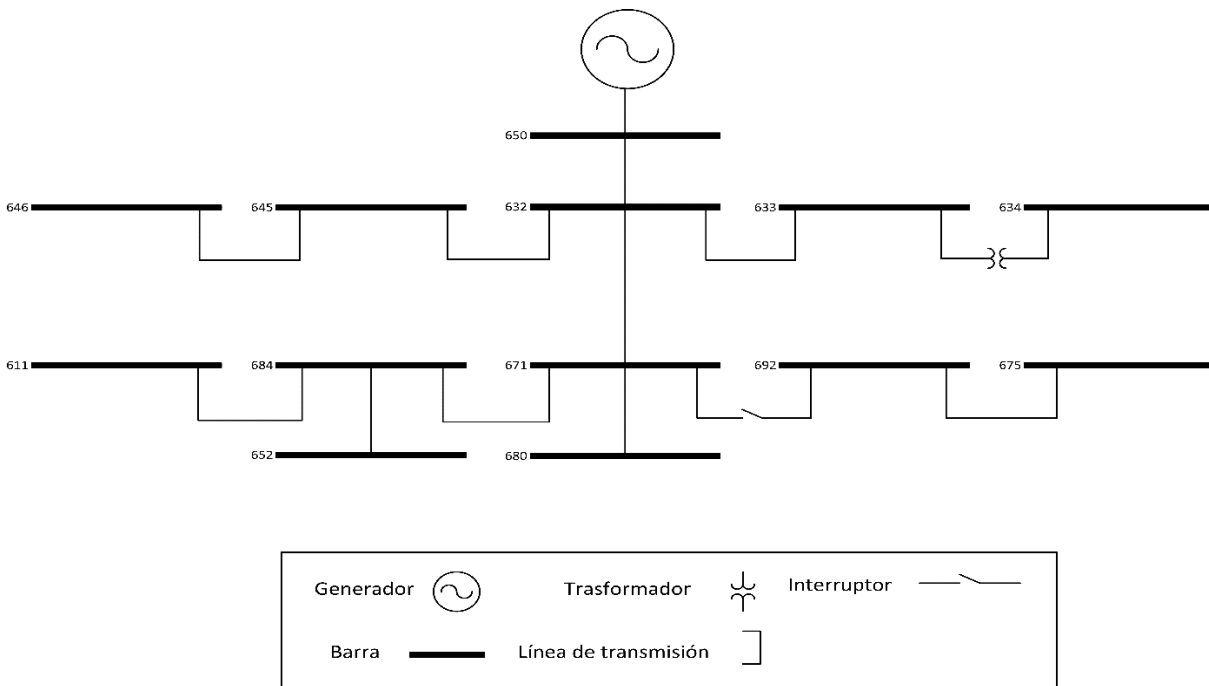


Figura 7. Sistema de 13 barras IEEE

3.4 Caso de estudio

Para el análisis del caso se utiliza el sistema de 13 barras es un circuito pequeño, con una configuración radial y usado para probar características que son frecuentes en los sistemas de distribución, tiene la cualidad de tener una carga relativamente alta y desbalanceada.

El sistema como en su nombre se resalta está compuesto por 13 barras representado en la Figura 7, el sistema esta alimentado en el nodo 650 por un voltaje de 115kV, opera a 4.16kV en el resto de sus ramales, tiene un regulador de voltaje que opera como una subestación de 115/4.16kV y un

transformador reductor de 4.16kV a 480 V, además de estar conectado por un total de 10 líneas, posee ocho cargas repartidas en el sistema.

Al sistema se le agrega en la barra 680 un transformador con las características dadas en la tabla 5, una NLL con las características dadas en la tabla 6 y el correspondiente SHAPF controlado por Lyapunov con sus propiedades en la tabla 7, representado en la figura 8.

Tabla 5. Parametros del transformador.

Datos	Valores	Unidades
Voltaje	480	V
Transformador	13.8/480	kV/V
Frecuencia	60	Hz
Conexión	Yg/Yg	-

Tabla 6. Parametros de la NLL.

Datos	Valores	Unidades
Resistencia	20	Omh
Inductancia	15	mH
Resistencia del diodo	1	mOmh
Inductancia del diodo	0	mOmh

Tabla 7. Parametros de SAPF.

Datos	Valores	Unidades
Resistencia	2	mOmh
Inductancia	15	mH
Capacitancia	200	mF
Capacitancia dc	3000	uF
Voltaje inicial de la capacitancia	0	V
Voltaje de referencia	1000	v

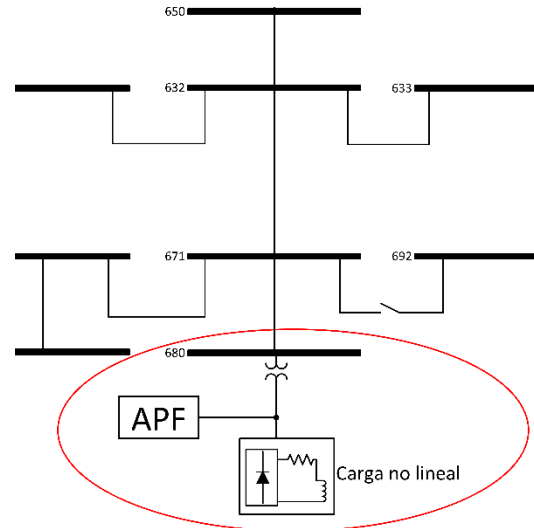


Figura 8. Sistema IEEE 13 barras con SHAPF

4 Análisis de resultados

Se considera el sistema de distribución a una frecuencia de 60 [Hz] de la Figura 7 y al mismo se le aplica lo propuesto en la figura 8 donde ya se encuentra colocada la NLL junto al SHAPF, para la realización de la simulación en simulink donde se toma un tiempo de 300 milisegundos el cual se considera suficiente para el filtrado de los armónicos.

4.1 Sin el filtro

Se realiza la desactivación del filtro para realizar el posterior análisis donde se puede mostrar las gráficas respectivas tanto de voltaje como de corriente del lado de la fuente, la corriente del lado de la carga y el THDi porcentual.

En la figura 9 se observa como el voltaje de la fuente en por unidad no se ve notablemente afectado por la NLL, ya que el mismo no muestra indicios de distorsión armónica, ni supera los límites de voltaje que van desde más 1.05 y de menos 0.95 por unidad.

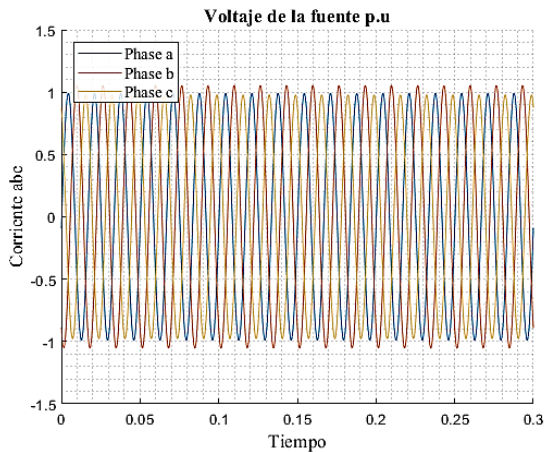


Figura 9. Voltaje del lado de la fuente antes del filtrado en [pu].

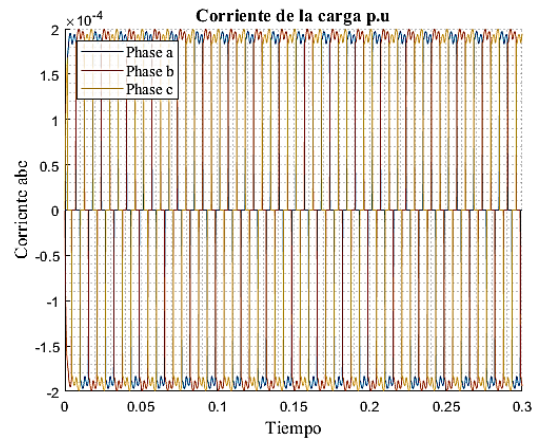


Figura 11. Corriente del lado de la carga antes del filtrado en [pu].

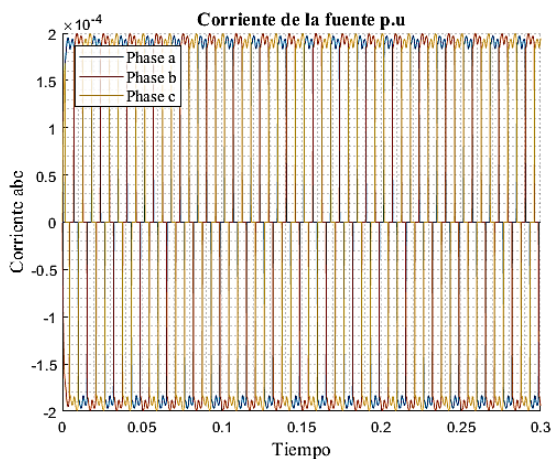


Figura 10. Corriente del lado de la fuente antes del filtrado en [pu].

En la figura 10 se puede observar como la corriente del lado de la fuente se encuentra afectada por la NLL lo que provoca una deformación a la onda y es exactamente igual a la figura 11 donde se mide la corriente de la NLL. La cual comienza su deformación desde que empieza la simulación hasta el término de la misma.

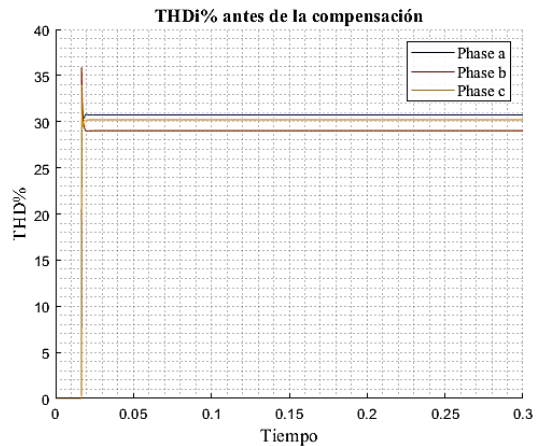


Figura 12. THDi del lado de la fuente antes del filtrado.

En la figura número 12 se plasma la deformación armónica observada en las figuras 10 y 11 donde el THDi producido por la NLL en cada una de las fases, las mismas que llegan a los valores de 31,13% en la primera fase, 29,34% en la segunda fase y de 30,55% en la tercera fase excediendo los valores que se describen en la tabla 4, donde el THDi al inicio de la simulación no supera el 35 por ciento de contenido armónico y este se estabiliza antes de los 50 milisegundos.

4.2 Con el filtro

Para la prueba con el filtro el SHAPF se activa al inicio de la simulación el cual a partir de la figura 13 se puede constatar que no afecta a la onda de voltaje la cual no se encontraba distorsionada, demostrando que

el filtro no influye de manera negativa al voltaje.

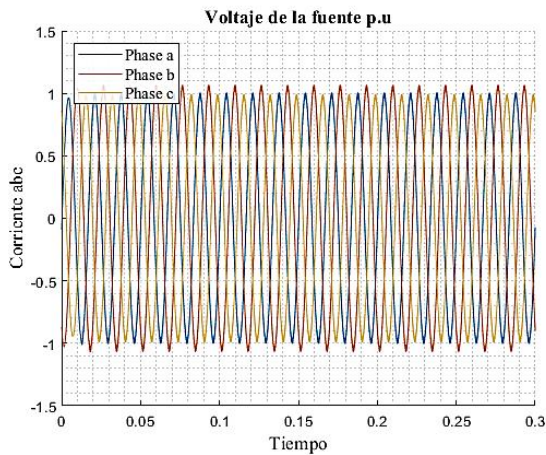


Figura 13. Voltaje del lado de la fuente después del filtrado en [pu].

En la figura 14 se visualiza el filtrado realizado por el SHAPF, donde al principio se puede observar un incremento de la corriente en un tiempo menor a los 50 milisegundos y la estabilización del mismo para igualar a la corriente de la carga que se observa en la figura 15, además se puede comparar la forma de onda del lado de la fuente y del lado de la carga, reflejando que el SHAPF cumple con su propósito haciendo a la onda de corriente de la fuente lo más parecido posible a una onda sinusoidal.

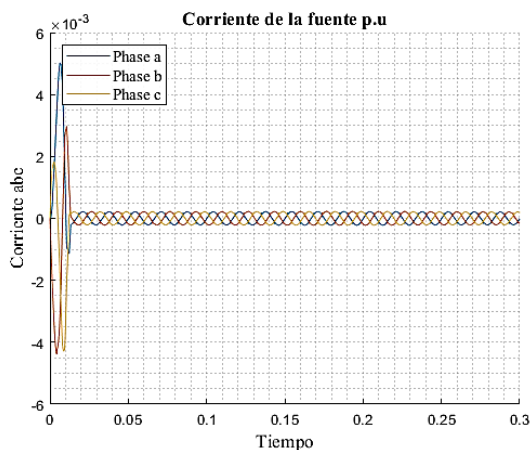


Figura 14. Corriente del lado de la fuente después del filtrado del filtrado en [pu].

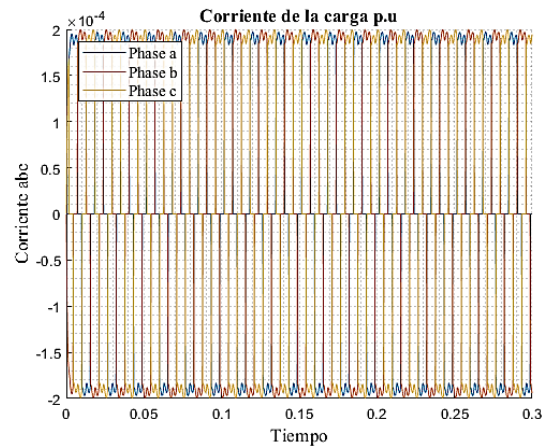


Figura 15. Corriente del lado de la carga en [pu].

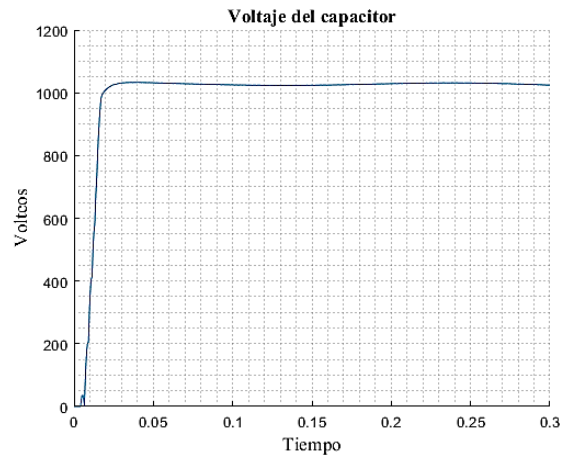


Figura 16. Voltaje del capacitor del filtro

En la figura 16 se observa el voltaje del capacitor y de como este se incrementa para llegar al voltaje de referencia para mantenerse estable, se aprecia que es el mismo tiempo menor a 50 milisegundos en el que también se estabiliza el SHAPF.

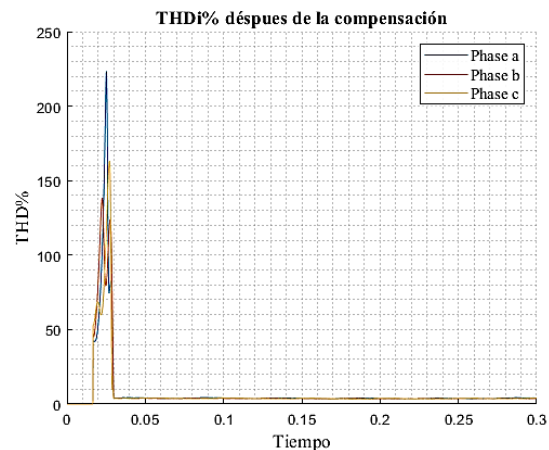


Figura 17. THDi después del filtrado.

En la figura 17 se observa el THDi del lado de la fuente ya filtrado y se visualiza el incremento a más de 200% del THDi por un pequeño instante, donde antes de los 50 milisegundos se puede percibir una drástica reducción. A partir de los datos que se obtienen se puede apreciar a estos en la tabla 8 donde existe una comparación del THDi, se demuestra la reducción de THDi a valores permisibles como que se encuentran en el estándar de la tabla 4.

Tabla 8. Comparación de THDi antes y después del filtrado.

Fases	Antes del filtrado	Después del filtrado
A	31.13%	4.009%
B	29.34%	3.758%
C	30.55%	4.098%

En las figuras 18 y 19 se visualiza el orden de los armónicos mediante la transformada de Fourier (FFT) y con conocimiento de que la componente fundamental es 60 [Hz], se observa que los principales armónicos que resultan de nuestra carga son mayormente impares y se encuentra en el orden desde el quinto armónico al quinceavo.

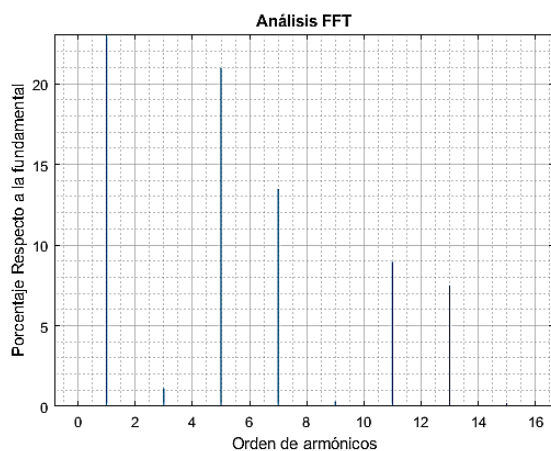


Figura 18. Distorsión armónica mediante la transformada rápida de Fourier antes del filtrado.

En la figura 19 se visualiza la reducción de los armónicos impares, de los cuales ninguno supera el 1.5% de contenido armónico.

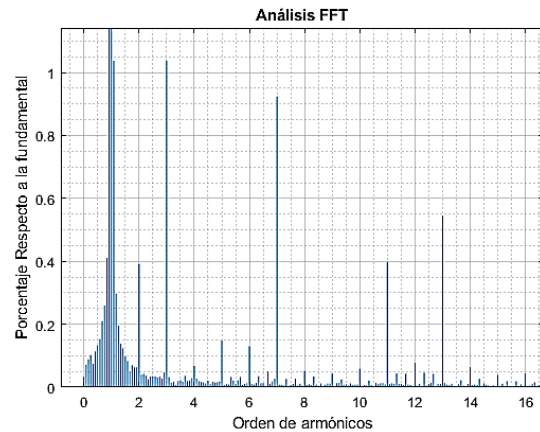


Figura 19. Distorsión armónica mediante la transformada rápida de Fourier después del filtrado

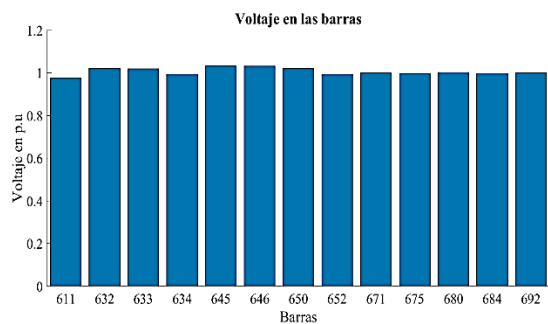


Figura 20. Voltajes de las barras con el filtro en [pu].

En la figura 20 se visualiza las magnitudes de voltaje en [pu] en cada una de las barras, no se encuentra afección alguna por parte del filtro a los voltajes de las barras ya que estos no superan los límites de voltaje que van desde más 1.05 y de menos 0.95 por unidad.

5 Conclusiones

Los modelos del filtro activo de potencia y del sistema de distribución del IEEE de 13 barras además de la carga no lineal permitieron la creación de un modelo matemático y su implementación en Matlab /Simulink. Se utilizaron los datos y especificaciones del sistema de distribución de la IEEE durante este proceso, así como las características y parámetros del filtro

activo de potencia híbrido y de la carga no lineal. El modelo resultante que se obtiene como consecuencia permite la simulación y el estudio del comportamiento del sistema.

Para implementar un controlador en el filtro activo de potencia híbrido, se utilizó la función de Lyapunov, una herramienta matemática utilizada en el diseño de controladores. Esta función facilitó la creación de una función de energía que garantiza el rendimiento y la estabilidad deseados del sistema. Para lograr los objetivos de control establecidos, es necesario ajustar varios parámetros y las ecuaciones del filtro activo de potencia híbrido para la correcta implementación del controlador.

La evaluación del rendimiento del sistema de distribución original en comparación con el sistema modificado, que utiliza un filtro activo de potencia híbrido controlado mediante Lyapunov. Se obtienen, a partir de la realización de pruebas y análisis armónicos comparativos en ambos sistemas. Donde el SHAPF con el controlador de Lyapunov logra reducir los armónicos no deseados en el sistema de distribución, los datos denotan una reducción del THDi de alrededor de 25% en cada fase, dando como resultado que el THDi en cada una de las fases sea menor al 5% el que resulta un valor porcentual por debajo al dado por el estándar IEEE 519-2022 de esta manera se comprueba la mejora en la CE dada por el filtro con su respectivo controlador.

6 Trabajos futuros

Para próximos trabajos se puede implementar en el control para diferentes tipos de filtros activos y comparar la eficiencia que el control nos da para cada uno de ellos.

La aplicación de los filtros activos a una Microred con múltiples convertidores y la

optimización del control por Lyapunov mediante aprendizaje automático entre otras.

7 Referencias

- [1] T. Ahmad and D. Zhang, “A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far,” *Energy Reports*, vol. 6. Elsevier Ltd, pp. 1973–1991, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.egy.2020.07.020.
- [2] J. Gong, D. Li, T. Wang, W. Pan, and X. Ding, “A comprehensive review of improving power quality using active power filters,” *Electric Power Systems Research*, vol. 199. Elsevier Ltd, Oct. 01, 2021. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107389.
- [3] N. K. Swarnkar, O. P. Mahela, and M. Lalwani, “Multivariable signal processing algorithm for identification of power quality disturbances,” *Electric Power Systems Research*, vol. 221, p. 109480, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109480.
- [4] W. Llumitaxi, W. Pavón, L. Ortíz, and N. Pozo, “Hybrid Active Power Filter (APF) with Photovoltaic Generation integration for Voltage Profile Improvement,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 19, no. 1, pp. 100–109, Jul. 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.523.
- [5] H. Eroğlu, E. Cuce, P. Mert Cuce, F. Gul, and A. Iskenderoğlu, “Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48. Elsevier Ltd, Dec. 01, 2021. doi: 10.1016/j.seta.2021.101566.
- [6] Y. Naderi, S. H. Hosseini, S. Ghassem Zadeh, B. Mohammadi-Ivatloo, J. C. Vasquez, and J. M.

- Guerrero, "An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93. Elsevier Ltd, pp. 201–214, Oct. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.013.
- [7] M. El-Habrouk, M. K. Darwish, and Pmehta, "Active power filters: A review."
- [8] A. Aguila T Ellez, G. L. Opez, I. Isaac, and J. W. Gonz Alez, "Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review," *Heliyon*, vol. 4, p. 746, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.
- [9] IEEE Staff, *2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2013.
- [10] B. Xu, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Harbin Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Proceedings of 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC 2018) : December 14-16, 2018, Chongqing, China*.
- [11] M. Yadav, N. Pal, and D. K. Saini, "Low voltage ride through capability for resilient electrical distribution system integrated with renewable energy resources," *Energy Reports*, vol. 9. Elsevier Ltd, pp. 833–858, Dec. 01, 2023. doi: 10.1016/j.egy.2022.12.023.
- [12] P. Zhang, Q. Feng, R. Chen, D. Wang, and L. Ren, "Classification and Identification of Power Quality in Distribution Network," in *2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy, ICPRE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, pp. 533–537. doi: 10.1109/ICPRE51194.2020.9233147.
- [13] D. Committee of the IEEE Power and E. Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Developed by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society," 2019. [Online]. Available: <http://www.ieee.org/web/aboutus/whatis/policies/p9-26.html>.
- [14] S. A. Temerbaev and V. P. Dovgun, "Improvement of power quality in distributed generation systems using hybrid power filters," in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, IEEE Computer Society, 2014, pp. 694–698. doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842761.
- [15] X. Piao, J. Zou, and P. Wang, "Power Distribution Control Strategy of Energy Storage Unified Power Quality Controller with Fixed Power Angle," in *Proceedings - 2021 Power System and Green Energy Conference, PSGEC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2021, pp. 145–149. doi: 10.1109/PSGEC51302.2021.9542036.
- [16] X. Chang, R. Mao, M. Zhang, S. Li, L. Gao, and N. Ma, "An Analysis Method of the Influence of Distributed PV Location on Voltage and Harmonic Distribution of the Distribution Network; An Analysis Method of the Influence of Distributed PV Location on Voltage and Harmonic Distribution of the Distribution Network," *2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, 2020, doi:

- 10.1109/ICPES51309.2020.9349720/20/\$31.00.
- [17] 519-2022 - *IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*.
- [18] Q. Meini, L. Dehua, and G. Chao, "Harmonic signal detection method for high voltage distribution network based on multi spectral line interpolation algorithm," in *Proceedings - 2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 370–375. doi: 10.1109/ICMTMA54903.2022.00077.
- [19] A. Heidary, K. Ghorbanyan, H. Radmanesh, and H. R. R. Khamse, "Voltage sag and harmonic analysis in distribution network," in *21st Electrical Power Distribution Network Conference, EPDC 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2016, pp. 102–105. doi: 10.1109/EPDC.2016.7514791.
- [20] S. Ravikumar, H. Vennila, and R. Deepak, "Hybrid power generation system with Total Harmonic Distortion minimization using improved Rider Optimization Algorithm: Analysis on converters," *J Power Sources*, vol. 459, May 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228025.
- [21] A. Yadav, D. Yadav, K. Kishore, L. Varshney, and M. Sajid Alam, "Dynamic Voltage Restorer along with Active and Passive Filter for Power Quality Improvement in Distribution Network.," in *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering, ICACITE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2021, pp. 714–717. doi: 10.1109/ICACITE51222.2021.9404554.
- [22] B. Sahoo, M. M. Alhaider, and P. K. Rout, "Power quality and stability improvement of microgrid through shunt active filter control application: An overview," *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp. 139–173, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ref.2022.12.006.
- [23] R. Guzman, L. G. De Vicuna, A. Camacho, J. Miret, and J. M. Rey, "Receding-Horizon Model-Predictive Control for a Three-Phase VSI with an LCL Filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 6671–6680, Sep. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2877094.
- [24] P. Tupiza, W. Pavón, D. Jaramillo, J. Muñoz, C. Barrera-Singaña, and M. Tipan, "Strategy for Reducing Total Current Harmonics Distortion using an Unified Active Power Filter (UAPF) with Photovoltaic generation," in *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, IEEE, Mar. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087658.
- [25] M. Parvez Akter, S. Mekhilef, N. Mei Lin Tan, and H. Akagi, "Modified Model Predictive Control of a Bidirectional AC-DC Converter Based on Lyapunov Function for Energy Storage Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 704–715, Feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2478752.
- [26] M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, and J. P. S. Catalao, "Direct lyapunov control technique for the stable operation of multilevel converter-

- based distributed generation in power grid,” in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2014, pp. 931–941. doi: 10.1109/JESTPE.2014.2346016.
- [27] M. Asadi and A. Jalilian, “Lyapunov Control Method of Shunt Active Power Filter,” 2014.
- [28] L. Li, H. Yang, W. Guo, Y. Liu, F. Xu, and W. Gong, “Nonlinear Lyapunov-based stable control method of the single-phase shunt active power filter,” in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1390–1393. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.354-355.1390.
- [29] Pavón Wilson, Mejía André, and Ortiz Leony, “Comparative study of PI and fuzzy control techniques for voltage stability of a three-phase inverter in photovoltaic systems, evaluating the voltage in transitory and stable state,” *SMARTTECH-IC 2021*, pp. 139–161, 2021.
- [30] L. Chang, X. Shao, and D. Zhang, “Stabilization for a class of strict-feedback nonlinear systems via the PWM control law,” *J Franklin Inst*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jfranklin.2023.06.027.
- [31] S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad, and A. I. Alolah, “A DSP-based implementation of an instantaneous current control for a three-phase shunt hybrid power filter,” *Math Comput Simul*, vol. 91, pp. 229–248, 2013, doi: 10.1016/j.matcom.2012.09.013.
- [32] W. Lu, C. Li, and C. Xu, “Sliding mode control of a shunt hybrid active power filter based on the inverse system method,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 57, pp. 39–48, May 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.11.044.
- [33] S. Sajjad Seyedalipour, S. Bayhan, and H. Komurcugil, “Lyapunov-Function-Based Control Approach for Three-Level Four-Leg Shunt Active Power Filters with Nonlinear and Unbalanced Loads.”
- [34] W. Lu, C. Li, and C. Xu, “Sliding mode control of a shunt hybrid active power filter based on the inverse system method,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 57, pp. 39–48, May 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.11.044.
- [35] M. Krstić and P. V Kokotović, “Control Lyapunov functions for adaptive nonlinear stabilization*,” 1995.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 9: Matriz de estado del arte.

REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV																									
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
			NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	Redes de distribución	Calidad de Energía	Cargas no lineales	Funcionamiento del control de Lyapunov	Estrategias de control	Mejora de la calidad de energía	Armónicos	Distorsión armónica	Modelación del filtro activo	Distorsión armónica total	Evaluación de la calidad de energía	Orden de armónicos	Variables de entrada	Implementación del control por Lyapunov	Filtros activos	Variables de salida	Modelación matemática	Implementación del Filtro activo	Análisis de parámetros relacionados a la calidad de energía	Disminución del THDi	Control basado en Lyapunov	
1	2020	A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far	392	☒	☒																				
2	2021	A comprehensive review of improving power quality using active power filters	79		☒			☒	☒				☒										☒		
3	2023	Multivariable signal processing algorithm for identification of power quality disturbances	1		☒	☒																☒			
4	2022	Hybrid Active Power Filter (APF) with Photovoltaic Generation integration for Voltage Profile Improvement	1		☒					☒													☒		
5	2021	Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review	32									☒	☒		☒										☒
6	2018	An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks	134	☒	☒							☒													
7	2000	Active power filters: A review.	1062																						☒

REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	Redes de distribución	Calidad de Energía	Cargas no lineales	Funcionamiento del control de Lyapunov	Estrategias de control	Mejora de la calidad de energía	Armónicos	Distorsión armónica	Modelación del filtro activo	Distorsión armónica total	Evaluación de la calidad de energía	Orden de armónicos	Variables de entrada	Implementación del control por Lyapunov	Filtros activos	Variables de salida	Modelación matemática	Implementación del Filtro activo	Análisis de parámetros relacionados a la calidad de energía	Disminución del THDi	Control basado en Lyapunov
8	2018	Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review	92					☒	☒		☒	☒	☒									☒	☒	
9	2013	IEEE Staff, 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE	122		☒	☒				☒	☒		☒	☒	☒							☒	☒	
10	2018	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Harbin Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, Proceedings of 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference	2	☒		☒								☒										
11	2023	Low voltage ride through capability for resilient electrical distribution system integrated with renewable energy resources	2		☒				☒	☒	☒													
12	2020	Classification and Identification of Power Quality in Distribution Network	10	☒	☒				☒		☒		☒											
13	2019	IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Developed by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society	35		☒	☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒									
14	2015	Improvement of power quality in distributed generation systems using hybrid power filters	16		☒				☒	☒														

REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	Redes de distribución	Calidad de Energía	Cargas no lineales	Funcionamiento del control de Lyapunov	Estrategias de control	Mejora de la calidad de energía	Armónicos	Distorsión armónica	Modelación del filtro activo	Distorsión armónica total	Evaluación de la calidad de energía	Orden de armónicos	Variables de entrada	Implementación del control por Lyapunov	Filtros activos	Variables de salida	Modelación matemática	Implementación del Filtro activo	Análisis de parámetros relacionados a la calidad de energía	Disminución del THDi	Control basado en Lyapunov
15	2021	Power Distribution Control Strategy of Energy Storage Unified Power Quality Controller with Fixed Power Angle	2		☒				☒				☒											
16	2020	An Analysis Method of the Influence of Distributed PV Location on Voltage and Harmonic Distribution of the Distribution Network; An Analysis Method of the Influence of Distributed PV Location on Voltage and Harmonic Distribution of the Distribution Network	1	☒						☒			☒											
17	2022	519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.	2						☒	☒	☒		☒	☒	☒							☒	☒	
18	2022	Harmonic signal detection method for high voltage distribution network based on multi spectral line interpolation algorithm							☒		☒				☒							☒	☒	
19	2016	Voltage sag and harmonic analysis in distribution network	5	☒						☒	☒			☒	☒									
20	2020	Hybrid power generation system with Total Harmonic Distortion minimization using improved Rider Optimization Algorithm: Analysis on converters	11							☒												☒	☒	
21	2021	Dynamic Voltage Restorer along with Active and Passive Filter for Power Quality	3		☒	☒				☒														

REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	Redes de distribución	Calidad de Energía	Cargas no lineales	Funcionamiento del control de Lyapunov	Estrategias de control	Mejora de la calidad de energía	Armónicos	Distorsión armónica	Modelación del filtro activo	Distorsión armónica total	Evaluación de la calidad de energía	Orden de armónicos	Variables de entrada	Implementación del control por Lyapunov	Filtros activos	Variables de salida	Modelación matemática	Implementación del Filtro activo	Análisis de parámetros relacionados a la calidad de energía	Disminución del THDi	Control basado en Lyapunov
		Improvement in Distribution Network																						
22	2023	Power quality and stability improvement of microgrid through shunt active filter control application: An overview					☒	☒			☒													
23	2019	Receding-Horizon Model-Predictive Control for a Three-Phase VSI with an LCL Filter	73				☒										☒							
24	2023	Strategy for Reducing Total Current Harmonics Distortion using an Unified Active Power Filter (UAPF) with Photovoltaic generation		☒	☒		☒			☒					☒									☒
25	2016	Modified Model Predictive Control of a Bidirectional AC-DC Converter Based on Lyapunov Function for Energy Storage Systems	175				☒									☒								
26	2014	Direct lyapunov control technique for the stable operation of multilevel converter-based distributed generation in power grid,	42	☒	☒		☒									☒								☒
27	2014	Lyapunov Control Method of Shunt Active Power Filter	2				☒									☒	☒	☒			☒			☒
28	2012	Nonlinear Lyapunov-based stable control method of the single-phase shunt active power filter	5				☒	☒		☒							☒	☒	☒		☒			☒

REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA CONTROLADO POR LA FUNCIÓN DE LYAPUNOV

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	Redes de distribución	Calidad de Energía	Cargas no lineales	Funcionamiento del control de Lyapunov	Estrategias de control	Mejora de la calidad de energía	Armónicos	Distorsión armónica	Modelación del filtro activo	Distorsión armónica total	Evaluación de la calidad de energía	Orden de armónicos	Variables de entrada	Implementación del control por Lyapunov	Filtros activos	Variables de salida	Modelación matemática	Implementación del Filtro activo	Análisis de parámetros relacionados a la calidad de energía	Disminución del THDi	Control basado en Lyapunov
29	2021	Comparative study of PI and fuzzy control techniques for voltage stability of a three-phase inverter in photovoltaic systems, evaluating the voltage in transitory and stable state		☒	☒				☒			☒												
30	2023	Stabilization for a class of strict-feedback nonlinear systems via the PWM control law				☒		☒													☒			☒
31	2013	A DSP-based implementation of an instantaneous current control for a three-phase shunt hybrid power filter	57				☒	☒			☒				☒	☒	☒	☒			☒			☒
32	2014	Sliding mode control of a shunt hybrid active power filter based on the inverse system method	48				☒	☒			☒				☒	☒	☒	☒						☒
33	2018	Lyapunov-Function-Based Control Approach for Three-Level Four-Leg Shunt Active Power Filters with Nonlinear and Unbalanced Loads	7				☒			☒	☒				☒	☒	☒	☒	☒					☒
34	2014	Sliding mode control of a shunt hybrid active power filter based on the inverse system method	48					☒		☒	☒					☒	☒	☒	☒		☒			☒
35	1995	Control Lyapunov functions for adaptive nonlinear stabilization	103				☒	☒							☒	☒		☒	☒					☒
CANTIDAD:			9	14	7	8	12	10	13	12	6	10	6	6	8	8	10	8	4	8	6	6	10	

7.2 Resumen de Indicadores

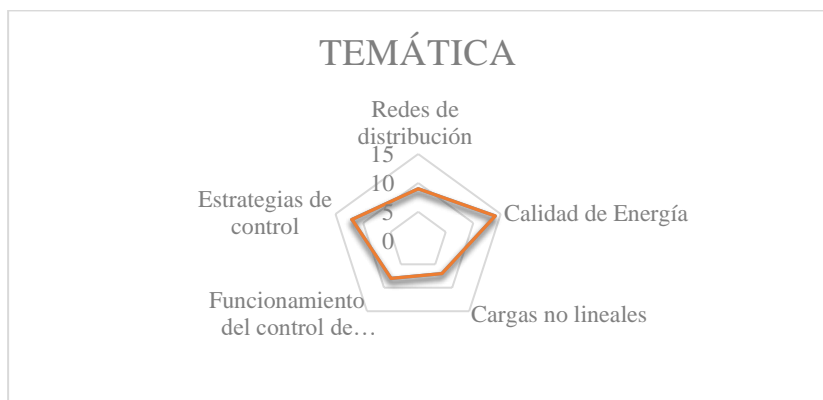


Figura 21. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

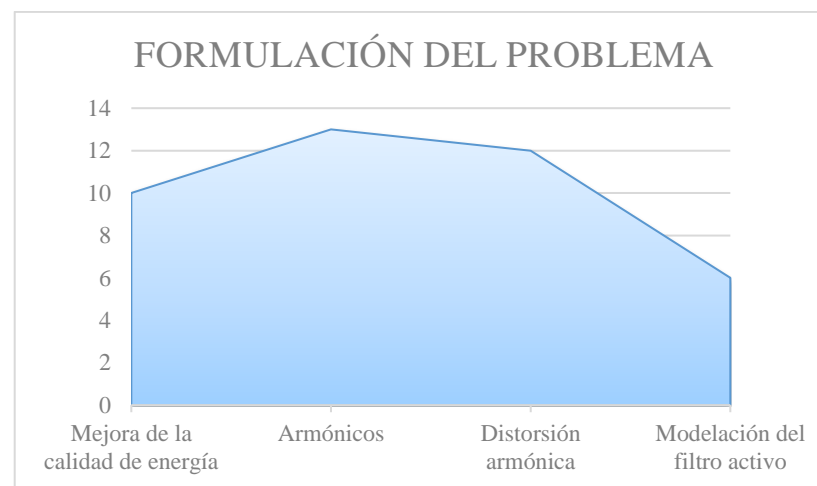


Figura 22. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

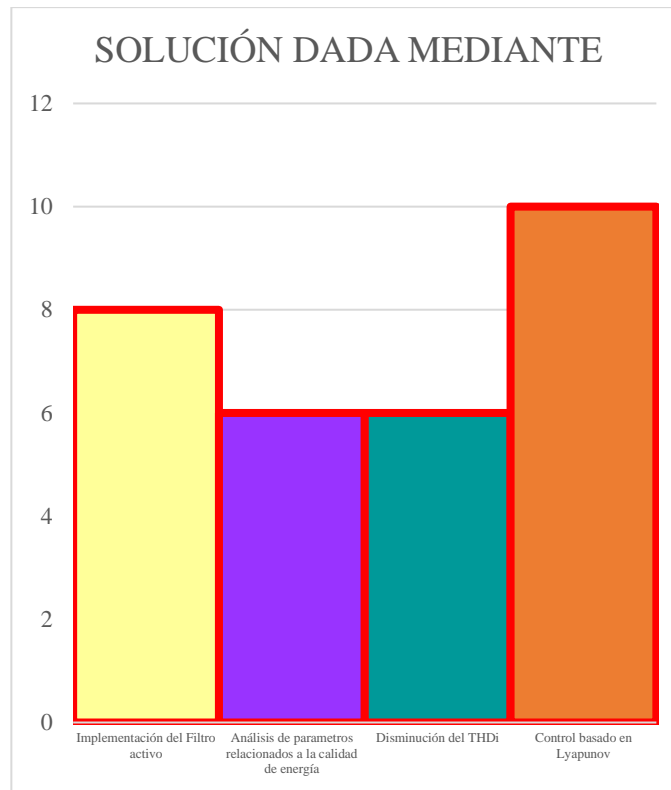


Figura 23. Indicador de solución - Estado del arte.

8 Anexos.

Tabla 10. Información de las líneas aéreas del sistema IEEE 13 barras.

Configuración	Fases	Fase	Neutro	ID
		ACSR	ACSR	
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510

Tabla 11. Información de las líneas soterradas del sistema IEEE 13 barras.

Configuración	Fases	Cable	Neutro	ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Tabla 12. Información de la distancia de las líneas del sistema IEEE 13 barras.

Barra A	Barra B	Longitud(ft.)	Configuración
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Tabla 13. Información de los transformadores del sistema IEEE 13 barras.

	kVA	kV-Primario	kV-Secundario	R - %	X - %
Subestación:	5,000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8
XFM -1	500	4.16 - Gr.W	0.48 - Gr.W	1.1	2

Tabla 14. Información de los capacitores del sistema IEEE 13 barras

Node	Fase-A kVAr	Fase-B kVAr	Fase-C kVAr
675	200	200	200
611			100

Tabla 15. Información de las cargas del sistema IEEE
13 barras.

Barra	Fase-1	Fase-1	Fase-2	Fase-2	Fase-3	Fase-3
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	160	110	120	90	120	90
645	0	0	170	125	0	0
646	0	0	230	132	0	0
652	128	86	0	0	0	0
671	385	220	385	220	385	220
675	485	190	68	60	290	212
692	0	0	0	0	170	151
611	0	0	0	0	170	80