

## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA DE ELECTRICIDAD

#### "DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA CONSIDERANDO EL FACTOR DE SENSIBILIDADA LA PÉRDIDA (LSF)"

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

AUTOR: PEDRO SANTIAGO REINOSO QUISHPE TUTOR: LUIS FERNADO TIPÁN VERGARA

> Quito -Ecuador 2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Pedro Santiago Reinoso Quishpe con documento de identificación N° 1722526363 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, 10 de septiembre del año 2024

Atentamente,

\_\_\_\_\_

Pedro Santiago Reinoso Quishpe 1722526363

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

Yo, Pedro Santiago Reinoso Quishpe con documento de identificación No. 1722526363, 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: "Diseño de un filtro activo para el mejoramiento de la calidad de la energía considerando el factor de sensibilidad a la pérdida (LSF)", 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, 10 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Pedro Santiago Reinoso Quishpe 1722526363

#### CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara con documento de identificación N° 1717329005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA CONSIDERANDO EL FACTOR DE SENSIBILIDAD A LA PÉRDIDA (LSF)", realizado por Pedro Santiago Reinoso Quishpe con documento de identificación N° 1722526363, 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, 10 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Ing. Luis Fernando Tipán Vergara, MSc 1717329005

## ÍNDICE GENERAL

1	Int	rodu	cción2
2	Ма	rco	teórico3
	2.1	Cal	idad de la Energía3
	2.1	.1	Factores que Afectan la Eficiencia Energética
	2.1	.2	Factor de Potencia 4
	2.2	Arn	nónicos4
	2.2	.1	Perfiles permitidos de armónicos5
	2.3	Est	abilidad de Voltaje6
	2.3	5.1	Elementos de conmutación7
	2.3	.2	Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT)7
3	Мс	dela	miento matemático7
	3.1	Téc	nica del factor de sensibilidad de perdida7
	3.2	Dis	eño Filtro Activo de Potencia8
4	Pla	intea	amiento del Problema8
	4.1	Ubi	cación de filtros en el sistema a examinar10
	4.2	Ana	álisis de LSF para las Barras Candidatas11
	4.3	Ana	álisis de la presencia armónica en el sistema11
	4.4	Mo	delamiento del Filtro Activo de Potencia12
5	An	álisis	s de resultados12
	5.1	Per	turbación armónica THD12
	5.2	Cor	nexión del filtro a las barras candidatas13
	5.2	.1	Filtro activo conectado a la barra 633 13
	5.2	2.2	Filtro activo conectado a la barra 63414
	5.2	.3	Filtro activo conectado a la barra 68015
6	Co	nclu	siones16
	6.1	Tra	bajos futuros17
7	Re	ferei	ncias17
	7.1	Ma	triz de Estado del Arte
8	An	exos	5

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arguitectura del sistema eléctrico con conexión de un APF [autor]	2
Figura 2. Onda sinusoidal y sus variantes por presencia de armónicos[autor]	4
Figura 3. Estructura interna de IGBT.	7
Figura 4. Diagrama radial del modelo básico de un SEP [autor]	7
Figura 5. Diagrama unifilar de APF [autor]	8
Figura 6. Diagrama de fluio para el uso del LSF para la ubicación del APF [autor]	9
Figura 7. Diagrama de fluio para disminuir armónicos y meiorar la calidad de	
energía [autor]	9
Figura 8. Sistema de 13 barra IEEE	10
Figura 9. Nivel de tensión en cada barra de sistema de 13 barras sin compensar	
[autor].	11
Figura 10. Nivel de tensión en cada barra de sistema de 13 barras después de la	
conexión del filtro activo [autor]	11
Figura 11. Carga no lineal lautori.	12
Figura 12. Espectro armónico de voltaie del sistema obtenido de la simulación FF	τ
sin filtro	12
Figura 13. Espectro armónico de voltaie del sistema obtenido de la simulación FF	τ
con filtro	12
Figura 14. Espectro armónico de voltaie en la barra 633 sin conexión de filtro	13
Figura 15. Espectro armónico de voltaie en la barra 633 después de la conexión o	del
filtro.	13
Figura 16. Onda de voltaie sin filtro en la barra 633	13
Figura 17. Onda de voltaie con filtro en la barra 633.	13
Figura 18. Potencia P/Q sin filtro en la barra 633.	14
Figura 19. Potencia P/Q con filtro en la barra 633.	14
Figura 20. Espectro armónico de voltaje en la barra 634 sin conexión de filtro	14
Figura 21. Espectro armónico de voltaje en la barra 634 después de la conexión o	del
filtro.	14
Figura 22. Onda de voltaje sin filtro en la barra 634	14
Figura 23. Onda de voltaje con filtro en la barra 634.	15
Figura 24. Potencia P/Q sin filtro en la barra 634.	15
Figura 25. Potencia P/Q con filtro en la barra 634	15
Figura 26. Espectro armónico de voltaje en la barra 680 sin conexión de filtro	15
Figura 27. Espectro armónico de voltaje en la barra 680 después de la conexión o	del
filtro	15
Figura 28. Onda de voltaje sin filtro en la barra 680	15
Figura 29. Onda de voltaje con filtro en la barra 680.	16
Figura 30. Potencia P/Q sin filtro en la barra 680.	16
Figura 31. Potencia P/Q con filtro en la barra 680	16
Figura 32. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	24
Figura 33. Indicador de formulación del problema - Estado del arte	24
Figura 34. Indicador de solución - Estado del arte	25
Figura 35. Sistema de 13 barras IEEE con conexión de filtro APF diseñado en	
simulink	26
Figura 36. Filtro APF diseñado en simulink	27

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Secuencia de armónicos según su orden	5
Tabla 2. Perfiles permisibles de armónicos según la norma IEEE519 y EN50160	6
Fabla 3. Datos obtenidos del LSF para la ubicación del filtro.	10
Tabla 4. Valores de perfil de voltaje resultante antes y después de la ubicación del	
iltro activo	10
Tabla 5. Valores para diseño de APF.	12
Fabla 6: Matriz de estado del arte.	20

## "DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA CONSIDERANDO EL FACTOR DE SENSIBILIDAD A LA PÉRDIDA(LSF)"

#### Resumen

En esta investigación propuesta se plantea el diseño digital de un filtro activo de potencia (APF) para mejorar la calidad de la energía mitigando así la presencia de armónicos los cuales son generados por cargas resistivas, inductivas y capacitivas dentro de un sistema eléctrico de potencia (SEP), estos (APF) serán ubicados mediante el uso de un modelo matemático de factor de sensibilidad a la perdida (LSF). Para obtener lo antes indicado, se procederá a el diseño del filtro y su ubicación el cual deberá reducir el espectro armónico de tención mejorado los variables de calidad de energía entregados hacia la red. Para la obtención del modelo, se utilizará el sistema IEEE de 13 barras en MATLAB -Simulink y el modelo matemático de LSF. Los resultados obtenidos del sistema modelo serán examinados y analizados, los cuales ayudarán a determinar la instalación de los filtros APF, corrigiendo así los perfiles de disminuyendo voltaje y la presencia armónica.

*Palabras Clave:* Armónicos, voltaje, inductivas, capacitivas.

#### Abstract

In this proposed research, the digital design of an active power filter (APF) is proposed to improve the quality of energy, thus mitigating the presence of harmonics which are generated by resistive, inductive and capacitive loads within an electrical power system (SEP), these (APF) will be located through the use of a loss sensitivity factor (LSF) mathematical model. To obtain the above, the APF must reduce the harmonic tension spectrum and improve the power quality variables delivered to the network. To obtain the model, the IEEE 13-bar system in MATLAB-Simulink and the LSF mathematical model will be used. The results obtained from the model system will be examined and analyzed, which will help determine the installation of the APF filters, thus correcting the voltage profiles and reducing the harmonic presence.

*Keywords:* Harmonics, voltage, current, inductive, capacitive.

### 1 Introducción

Con el crecimiento acelerado de la humanidad y la rápida expansión de las grandes urbes, los sistemas eléctricos se han visto con la necesidad de una expansión a la sistemas misma velocidad. los de distribución se han llevado a grandes distancias desde su punto de generación, esto conlleva a generar problemas de calidad de energía con mayores pérdidas y mala regulación de voltaje, la necesidad de tener un sistema eficiente y eficaz se ha vuelto más urgente e importante[1][9][3]. En este sentido, se han propuesto diversas soluciones entre los cuales se añaden bancos de condensadores como (APF) en sistemas de distribución, para disminuir el impacto de la presencia de armónicos en corriente y voltaje, avudando así a corregir el Factor de Potencia, reduciendo la potencia reactiva y afinado así el perfil de voltaje[1][2], [3].

La calidad del suministro y los parámetros que determinan la misma deben considerar la capacidad de compensar las cargas fluctuantes en el tiempo, como la energía activa y reactiva que ocasionan algunos elementos lineales y no lineales, los cuales están presentes en los (SEP).

Con esto en mente, el diseño y la ubicación de estos (APF) se debe examinar a profundidad. La colocación óptima de capacitores ha sido investigada durante décadas por distintos autores y sus diversos métodos propuestos ayuda a mitigar estos problemas[1][2], [3].

Para su correcta ubicación del (APF), se lo ha analizado mediante el uso del Factores de Sensibilidad de Pérdida (LSF). Estos datos nos ayudaran a la estimación del nivel requerido, de compensación capacitiva para mejorar el perfil de voltaje y eliminar la presencia de armónicos[9][3].

Los filtros activos de potencia se pueden ubicar en distintos puntos de la red eléctrica, sujetándose a la ubicación de las cargas no lineales que ocasionan la presencia de armónicos[9][3]. En general, los filtros activos se colocan lo más cerca posible de la fuente de armónico para maximizar su efectividad en la reducción de los mismos[9][3].

La ubicación específica de los filtros activos depende de las características del SEP cono se muestra en la figura 1, así también dependerán del modelo eléctrico y de la demanda no lineal que se encuentran en la misma[6][2].

Los APF pueden ser de dos tipos: de corriente y de voltaje. La función de los filtros activos de corriente es la reducción de armónicos de corriente en la red eléctrica, mientras que por otra parte el filtro de voltaje reduce los armónicos de tensión[6][2] [9].

En general, los filtros activos son más eficientes que los filtros pasivos, ya que no ocasionan pérdidas calóricas de energía y pueden adaptarse a diferentes condiciones de carga en la red eléctrica[6][2].

También pueden ser controlados por microprocesadores, lo que permite una mayor precisión y manejo de los mismos[6][2].

Los filtros activos se emplean en una gran escala de aplicaciones, como la reducción de armónicos en edificios comerciales e industriales, la mejora de la calidad de la energía en la red, la reducción en la pérdida de energía en los transformadores y la mitigación de las interferencias electromagnéticas[6][2] [9].



Figura 1. Arquitectura del sistema eléctrico con conexión de un APF [autor].

### 2 Marco teórico

El incremento del consumo eléctrico, gracias al constante crecimiento de los últimos años y con el ingreso de nuevas tecnologías para la productividad, hacen que el estándar en cuanto a la calidad energética sea mayor para las empresas generadoras de energía [3].

#### 2.1 Calidad de la Energía

Se considera como la ausencia total o parcial de interrupciones del servicio, variación del voltaje, frecuencia y presencia armónica de tención y corriente entre otras variable; la presencia de estos en el suministro genera problemas que ocasionan el desperdicio energético en las empresas y áreas urbanas, provocando el mal desempeño de los elementos eléctricos dentro del SEP[1][2], [3].

Los parámetros que determinan la calidad del suministro deben considerar la capacidad de compensar las cargas fluctuantes y no productivas, como la energía reactiva que ocasionan algunos elementos eléctricos con elementos no lineales y su respectiva generación de armónicos [1], [4][2], [3].

#### 2.1.1 Factores que Afectan la Eficiencia Energética

Al conectar generadores cerca del punto de consumo, se producen algunos beneficios para el sistema eléctrico; como por ejemplo, se reduce el porcentaje de pérdidas en las líneas, ya que las distancias de distribución se reducen [5]. Mejora los índices de confiabilidad, seguridad de operación y calidad del suministro. Además, se permite una rápida gestión de compra – venta de energía eléctrica en el punto de consumo[9][8].

Para reducir las pérdidas en la distribución energética, se implementan diversas estrategias mediante el uso de tecnologías, aumentando así la eficiencia de

los elementos tales como la generación y distribución eléctrica de un SEP[9][8].

La selección de materiales conductores de baja resistividad, el uso de tecnologías de medición avanzada y la ejecución de sistemas inteligentes de supervisión, han mejorado la eficiencia de los sistemas eléctrico, minimizando pérdidas y garantizando la mayor eficiencia del sistema eléctrico, así también reduciendo el impacto ambiental asociado a la generación adicional de energía para compensar las pérdidas[6][2].

Factores que afectan la eficacia de un SEP:

- Armónicos en la Red
- Resistencia en Conductores
- Calentamiento de Elementos
- Corrientes Parásitas
- Pérdidas por Radiación
- Transformación de Voltaje

#### A. Armónicos en la red

La aparición de armónicos (elementos de frecuencia no fundamental) en la red eléctrica puede generar pérdidas adicionales y afectar la eficiencia del sistema[7][8].

#### B. Resistencia en conductores

Cuando la electricidad se trasporta a través de los cables de transmisión y distribución, se encuentra con resistencia en los conductores. Esta resistencia genera calor y provoca pérdidas de energía, a lo largo de las redes conectadas a cada uno de los ramales del sistema[9][8].

#### C. Calentamientos de elementos

Los transformadores, interruptores y otros elementos utilizados en la distribución de energía, pueden calentarse debido a la corriente eléctrica que fluye a través de ellos. Este calentamiento también contribuye a las pérdidas de energía[9][8].

#### D. Corrientes parasitas

En algunos casos, se pueden generar corrientes parásitas o corrientes de Foucault

en las estructuras metálicas utilizadas en las líneas de transmisión. Estas corrientes inducidas también ocasionan calor y causan pérdidas afectando así el sistema de distribución[9][3][10]–[12].

#### E. Perdidas por radiación

Las líneas de transmisión emiten radiación electromagnética, lo que lleva a pérdidas de energía en aspecto de ondas de radio y calor descargadas hacia el ambiente[9][7].

#### F. Trasformación de voltaje

Durante el proceso de transformación de voltaje en generación y subestaciones, se producen pérdidas debido a la resistencia en los devanados de los transformadores disminuyendo así la efectividad del mismo[7].

#### 2.1.2 Factor de Potencia

Los valores que se establecen entre 0 y 1, muestra la eficacia en el empleo de la energía eléctrica. Un factor de potencia (FP) cercano a 1, muestra que la totalidad de la energía que se emplea para llevar a cabo trabajo útil. Al contrario, un FP cercano a 0, refleja un uso ineficiente de la energía con alta cantidad de potencia reactiva. El FP se puede relacionar, como el vínculo entre la potencia activa responsable de realizar el trabajo util, y la potencia reactiva no aporta al trabajo útil, sino que induce pérdidas en el sistema eléctrico[13][10]–[12].

## A. Factor de potencia como indicador de eficiencia

La eficiencia energética se refiere al vínculo entre la energía útil producida y la energía total consumida.

El mejoramiento del FP puede llevar a una uso más eficaz de la energía, mermando la carga en las líneas y perfeccionando la capacidad del sistema eléctrico[13][10]– [12].

#### 2.2 Armónicos

Son las ondas de la señal eléctrica, que contiene una frecuencia de trabajo que es representada como un múltiplo entero de la misma señal fundamental, de la red eléctrica. En una red eléctrica típica, la frecuencia fundamental es de 50 o 60 Hz dependiendo su localización [13][14], [15]. Los armónicos se ocasionan debido a la presencia de elementos electrónicos no lineales, como inversores, rectificadores y convertidores de frecuencia, que introducen distorsiones en el espectro de onda de la corriente y el voltaje eléctrica. Esta señal generada por la distorsión armónica se presenta en la figura 2 [13][14]–[16].

Para minimizar los armónicos, se utilizan filtros pasivos y activos, que reducen o eliminan las señales armónicas no deseadas. También se han establecido normas y estándares para limitar los perfiles de armónicos [17][14].

Su impacto en la calidad de la energía es motivo de preocupación, sin embargo, la cuantificación de la impedancia armónica de la red ha demostrado ser una tarea compleja en sí misma. Estas distorsiones pueden causar problemas en la red eléctrica, pérdidas como de energía, sobrecalentamiento los cables de V elementos, y afectar a otros elementos conectados a la red.[7], [17].



Figura 2. Onda sinusoidal y sus variantes por presencia de armónicos[autor].

Los métodos de evaluación de impedancia armónica, se basan en una fuente de corriente armónica dominante en el lado del cliente que genera un cambio en el armónico de voltaje en la red[7], [17].

Se clasifican en tres parámetros:

#### A. El orden de los armónicos

El número de orden de los armónicos es determinada empezando desde la frecuencia fundamental, dependiendo de los sistemas y cargas puede haber múltiplos de 2 de 3 o de 6 el orden va desde el armónico fundamental[3], [12] [7], [18].

#### B. La secuencia

Dependiendo de secuencia y rotación, presentaran diferentes efectos en la red eléctrica, la secuencia se verá con respecto al armónico fundamental[7], [18].

- Secuencia (+)
- Secuencia (-)
- Secuencia (0)

Orden	Frecuencia (Hz)	Secuencia
1er	60	+
2do	120	-
3ro	180	+
4to	240	-
5to	300	+
6to	360	-
7mo	420	+
8vo	480	-
9no	540	+
•••		
n.º	60*n	

#### C. Distorsión armónica total THD

Por distintos modelos de cargas, la corriente y tensión se verán afectados debido a la electrónica de potencia, especialmente por los variadores de frecuencia en los motores, rectificadores, elementos de frío, iluminarias led, cargadores de baterías, y elementos con construcción electrónica[18], [19].

La distorsión armónica total es el vínculo del porcentaje de la alteración de todas las frecuencias con respecto a la potencia final[3], [12] [18], [19].

La distorsión armónica se evalúa individualmente,

- (THDI) de corriente
- (THDV) de voltaje.

Los principales efectos que causa una distorsión armónica son[18], [19]:

- Pérdidas de energía de trabajo (Potencia Activa)
- Incremento de consumo de Potencia Reactiva.
- Restricciones en el suministro
- Desgaste prematuro, mantenimientos frecuentes en los elementos conectados al sistema
- Paradas en producción por acción intempestivos de diferenciales
- Incremento del riesgo de incendio por sobrecalentamiento en conductores y conexiones

#### 2.2.1 Perfiles permitidos de armónicos

La presencia de armónicos no está ligado directamente a la generación de cada una de la empresa generadora de energía, estos son producidos por las cargas generadas por los cada uno de los usuarios y se clasifican así: Tomando en cuenta estos perfiles es necesario basarnos a las normas de la IEEE519 y la norma EN50160 las cuales ayudara a delimitar el porcentaje de THD permitido para cada uno de las normas, estas son utilizadas dentro de los estudios referenciados a este trabajo[20], [21].

Tabla 2. Perfiles	permisibles de	armónicos	según l	la
norm	a IEEE519 y E	N50160.		

EN50160	IEEE519
8%	8%
5%	5%
6%	5%
5%	5%
1,5%	5%
3,5%	5%
	EN50160 8% 5% 6% 5% 1,5% 3,5%

En la tabla se detalla el porcentaje de THD total para las 2 normas no debe sobrepasar el 8% en ambos casos, así mismo se tiene que el porcentaje de cada una de las ordenes de armónico varía según su orden[20], [21].

#### 2.3 Estabilidad de Voltaje

Cuando se acopla a la red eléctrica, los distintos tipos de cargas ocasionan un alto contenido de corriente y voltaje armónico, lo que da como resultado problemas de calidad de la energía eléctrica (PQ), que en consecuencia causan implicaciones monetarias a los consumidores y empresas de generación eléctrica[13], [22].

Además de las corrientes armónicas anteriormente mencionado, hay otros problemas de PQ con las implicaciones en el voltaje del PG, presentándose algunos ejemplos como[9], [22][10], [11], [23]:

- Armónicos
- Interrupciones momentáneas
- Sobretensiones momentáneas (swells)
- Subtensiones momentáneas (huecos)
- Fluctuaciones de tención
- Muescas de tención

 Transitorios de tención Desequilibrios de voltaje en sistemas trifásicos

El desarrollo del APF es un área de interés en la actualidad, los cuales presentan soluciones capaces de, adaptar su funcionalidad de acuerdo a los problemas de PQ que presentan el sistema eléctrico. Se clasifican en base a los parámetros de: número de fases, topología y tipo de inversor[9], [22].

El número de fases de APF se basa en tres categorías:

- Monofásico,
- Trifásico sin neutro
- Trifásico con neutro.

En relación con las topologías APF, hay cuatro topologías fundamentales[9]:

- Serie APF (SeAPF)
- Shunt APF (ShAPF)
- APF híbrido (HyAPF)
- Calidad de energía unificada Acondicionador (UPQC)

Los primeros APF, SeAPF y ShAPF, representan las topologías primordiales, que se utilizan con frecuencia para compensar problemas de voltaje y corriente, respectivamente. Cuando estas dos topologías se combinan, se crea un UPQC[9], [24].

Finalmente, la clasificación de la APF en cuanto al tipo de inversor se hace según el almacenamiento y elemento utilizado en el DC-Link del convertidor de potencia y se configura en[10], [11], [23] [9], [24]:

- Inversor con fuente de voltaje (VSI)
- Inversor con fuente de corriente (CSI)

Los APF están compuestos por un sistema de adquisición y con el convertidor de potencia, proporciona mitigación autónoma de problemas de armónicos[9], [24].

#### 2.3.1 Elementos de conmutación

Los elementos funcionan como interruptores de potencia (switch) tanto en corriente (AC) como en corriente (DC), su uso como interruptores estáticos o contactores para la activación de los APF[25], [26].

Las aplicaciones de estos elementos semiconductores de potencia se clasifica así [25], [26]:

- Tiristor
- Transistores de potencia
- Diodo de potencia.

Para la activación de un estado a otro no se realiza en tiempo cero, por lo que cada elemento cuenta con el tiempo requerido para las conmutaciones entre cada estado (0 y 1), este será un factor que restringe el uso del elemento en alta frecuencia[25], [26][10], [11], [23].

#### 2.3.2 Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT)

Su uso permite aumentar la eficiencia, asegurando el mejor rendimiento en el desempeño del elemento controlador del APF presentado en la figura 3; regulando la potencia de los sistemas eléctricos a su máxima eficiencia[6].

Los (IGBT) son elementos que han combinado características de elementos de la electrónica de potencia como son los MOSFET y los BJT[27], [28].

La parte física es muy parecida al MOSFET y en su desempeño eléctrico similar al BJT, su manejo se lo realiza por voltaje como el MOSFET[27], [28].

Una de las características es su alta impedancia al ingreso y pocas pérdidas durante su desempeño[10], [23], [29]. Pueden ser conectados en paralelo produciendo un modelo que ayuda a manejan altas intensidades [27], [28].



Figura 3. Estructura interna de IGBT.

### 3 Modelamiento matemático

Para esta sección se procederá a la ver el uso del factor que determinará la ubicación de los filtros dentro de un sistema de prueba.

#### 3.1 Técnica del factor de sensibilidad de perdida

La investigación de la ubicación óptima de los filtros de potencia activa se puede determinar realizando varios cálculos de flujo de potencia dentro del sistema a simular [30][29], [31].

El análisis de puede realizarse utilizando cálculos de flujo de carga hacia adelante y / o hacia atrás, como se denota en la Figura 4[30][12], [31].



Figura 4. Diagrama radial del modelo básico de un SEP [autor].

$$P_{i,t} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \left[ \alpha_{ij} (P_{i,t} P_{j,t} + Q_{i,t} Q_{j,t}) + \beta_{ij} (Q_{i,t} P_{j,t} - P_{i,t} Q_{j,t}) \right]$$
(1)

El método LSF es una técnica que se basa en el principio de linealización de la "fórmula de pérdida exacta" no lineal dada en la ecuación (1) [32][31]. Determina qué la sensible es la pérdida del sistema a la inyección de potencia activa o reactiva en cualquier barra. Trabajos anteriores calcularon el LSF basándose únicamente en la carga máxima. Este valor obtenido ayudara a identificar la ubicación óptima del APF[30], [33].

$$LSF_{t} = \frac{\partial P_{L,t}}{\partial Q_{i,t}} = 2 \sum_{j=1}^{N} (\alpha_{ij} Q_{j,t}) - 2 \sum_{j=1}^{N} (\beta_{ij} P_{j,t})$$
(2)

Para una mejor apreciación de la ubicación del filtro se realiza una evaluación del perfil de voltaje obtenido de la simulación del sistema de 13 barras[32][31].

Considerando estas opiniones se toma en cuenta que el voltaje p.u. no debe estar por encima del 1,05 y por otra parte no debe estar por debajo de los 0,95 datos admisibles por las normativas de la IEEE[32][31].

#### 3.2 Diseño Filtro Activo de Potencia

En esta parte se presenta el modelo y control matemático de los APF a conectas en paralelo a la red con la finalidad de reducir los elementos armónicos que se ocasionan por las cargas no lineales conectadas al sistema, en la figura 5 se denota la estructura de APF que consiste en un arreglo o banco de capacitores, una fuente con trasformador de tención y una inductancia de conexión requerida para el enlace en paralelo al modelo del SEP[13][10], [29].



Figura 5. Diagrama unifilar de APF [autor].

En la sección inicial, se calcula la tensión de DC suministrada por la fuente en el conjunto de capacitores. Resulta crucial tener en cuenta que esta tensión debe anticipar las fluctuaciones máximas ocasionadas por la activación del convertidor[13][10], [29].

$$V_{DC}(APF) = \frac{2}{ma}\widehat{Vs}$$
(3)

Se procederá a determinar la magnitud de la inductancia de acoplamiento, facilitando así que el APF inyecte corriente compensatoria al sistema. Esto es esencial para lograr la compensación energética requerida. Un elemento clave en el diseño es el límite máximo aceptable del rizado en DC[34][10], [29].

$$L_f(APF) = \frac{V_s}{6\sqrt{2}fswi_{rz}} \tag{4}$$

En la determinación de las especificaciones del capacitor, se toma en cuenta el límite máximo de fluctuación en el voltaje DC que se permite, como un criterio clave de diseño[10], [29].

$$c(APF) = \frac{P_{out}}{V_s \cdot \sqrt{6} \cdot f s w \cdot v_{rz}}$$
(5)

Tras haber desarrollado el filtro activo de potencia para su integración en el sistema, el siguiente paso es establecer su metodología de control. Así, en el marco de la simulación se crea un módulo usando la plataforma Simulink. Este módulo tendrá el objetivo de neutralizar los armónicos presentes en el modelo que se está analizando[34][10], [29].

#### 4 Planteamiento del Problema

Se realiza el modelamiento de LSF mediante el uso de herramientas Matlab,

procediendo con la obtención de datos los cuales se obtendrán del sistema de 13 barras de la IEEE, en la figura 6 se expondrá un flujograma explicando el uso del LSF paso a paso para el sistema propuesto.



Figura 6. Diagrama de flujo para el uso del LSF para la ubicación del APF [autor].

Para el análisis de este factor LSF se utiliza como referencia la potencia activa total de la carga en cada barra y con su contra parte la potencia reactiva en cada barra, tomando estos valores se realiza la segmentación P sobre Q en cada barra que tiene el sistema así también se corrobora el perfil de voltaje en las barras candidatas.

Tomando en cuenta la desviación por consecuencia de la penetración de cargas no lineales nuestro sistema se verá afectado por la presencia de armónicos los cuales provocaran la perdida de la calidad de la energía, el uso de LSF ayudara a identificar las barras que cuente con mayor afectación por presencia de armónicos, así también el perfil de voltaje ayuda a corroborar dichas afectaciones.

Con los datos que nos genere el sistema de 13 barras se podrá diseñar un filtro activo de potencia el cual tendrá la función de mitigar la presencia armónica, mejorar el perfil de voltaje y la calidad de la energía.

Para la disminución de armónicos y mejoramiento de la calidad de energía se analiza los datos obtenidos del LSF y se ubica el APF en las barras cándidas, a continuación, se presenta un flujograma en la figura 7 de los pasos que se seguirá para obtener el objetivo que se propone en este artículo.



Figura 7. Diagrama de flujo para disminuir armónicos y mejorar la calidad de energía [autor].

AL finalizar con la simulación realizada en los programas propuestos para este trabajo se pudo realizar diferentes pruebas con los datos obtenido de los mismos se procede a generar las distintas afirmaciones que se encontraron en este caso de estudio. Mediante el uso del factor de sensibilidad a la perdida se pudo determinar la ubicación idónea para cada uno de los filtros, para el estudio se utilizó el sistema de 13 barra presente en la figura 8.

Para perfeccionar el perfil de tensión y la eficiencia del modelo se procedió a generar 3 escenarios en los cuales se propone la ubicación de los filtros APF para un mejoramiento en la curva sinuosidad de voltaje y la reducción del consumo de potencia reactiva.



Figura 8. Sistema de 13 barra IEEE.

Se realiza el estudio en el sistema de 13 barras de la IEEE en la cual se conectará el filtro y la carga no lineal, en la figura se muestra el sistema en el cual nos basaremos para generarlo en la herramienta simulink.

#### 4.1 Ubicación de filtros en el sistema a examinar

Para poder determinar esta ubicación se utilizó el modelo del factor de sensibilidad a la perdida, el cual propone el análisis de la potencia y el voltaje para un resultado mediante valores analizados para cada una de las barras del sistema.

Tabla 3. Datos obtenidos del LSF para la ubicación del filtro.

Bus	P(out) MW	Q(out) Mvar	LSF (P/Q)	V(out)
611	0,51	0,28	1,821	1,0001

Bus	P(out) MW	Q(out) Mvar	LSF (P/Q)	V(out)
675	0,639	0,365	1,747	0,9991
646	0,23	0,132	1,742	1,0001
645	0,399	0,256	1,55	1,0001
652	0,128	0,086	1,488	1,0001
671	2,957	2,376	1,244	1,0001
632	3,757	3,377	1,112	1,002
650	3,757	3,377	1,112	1,0001
692	1,014	1,051	0,965	1,0001
675	0,83	0,9	0,936	0,9991
634	0,399	0,699	0,571	0,9618
633	0,399	0,7433	0,538	0,9867
680	0,15	0,3	0,5	0,9867

Analizando los datos obtenidos en la tabla después de la aplicación del LSF nos genera como barras candidatas para la compensación a las barras 633, 634 y 680 ya que las cuales por tener un bajo factor y mantener perfiles por debajo del nominal son idóneas para la ubicación del APF, mediante el cual presentamos un gráfico en la figura 9 y 10.

Tabla 4. Valores de perfil de voltaje resultante antes y después de la ubicación del filtro activo.

Bus 13 IEEE	Sin compensar V (p.u)	Compensado V (p.u)
611	1,0001	1,0001
632	1,002	1,002
633	0,9867	1,01
634	0,9618	1,01
645	1,0001	1,0001
646	1,0001	1,0001
650	1,0001	1,001
652	1,0001	1,0001
671	1,0001	1,001
675	1,0001	0,99

Bus 13 IEEE	Sin compensar V (p.u)	Compensado V (p.u)
680	0,987	1,001
684	0,9867	0,9967
692	1,0001	1,0001



Figura 9. Nivel de tensión en cada barra de sistema de 13 barras sin compensar [autor].

Como podemos notar las barras seleccionadas para la ubicación tienden a tener un nivel bajo de voltaje con respecto a las otras, según las normas de la IEEE los valores permisibles para el voltaje sean 0,95 a 1,05 p.u.



Figura 10. Nivel de tensión en cada barra de sistema de 13 barras después de la conexión del filtro activo [autor].

De la anterior simulación se puede obtener los siguientes datos con respecto al perfil de voltaje.

#### 4.2 Análisis de LSF para las Barras Candidatas

Para determinar el factor de LSF se tomará como referencia la potencia extraída del

flujo de potencias en los programas antes mencionado.

• Paso 1

Para este paso se toma encuentra el valor extraído de la potencia activa y reactiva en cada barra, esta posteriormente tendrá un proceso matemático de segmentación, entre el valor de la carga de potencia activa vs el valor de la carga de potencia reactiva.

• Paso 2

El valor obtenido del anterior paso será analizado tomando encuentra los valores menores al 0,6 obtenido, el cual nos da a entender que la carga de potencia reactiva es mayor que la potencia activa dentro de cada barra.

• Paso 3

En esta sección se procederá a comparar los valores de tensión en las barras con menor valor del LSF, y comparando con su nivel de voltaje el cual claramente dejar ver una significativa reducción del voltaje, así mismo se llegará a la conclusión que las barras con estos inconvenientes serán las barras propicias a una compensación mediante el APF.

# 4.3 Análisis de la presencia armónica en el sistema

La presencia armónica en el sistema es dada por la carga no lineal presentada en la figura11, aplicada en la simulación del sistema de 13 barras.

Por consecuencia del mismo podemos ver afectaciones tales como:

- Incremento de algunos armónicos por la resonancia serie paralelo.
- Disminución en la capacidad de los sistemas de generación, trasporte y distribución.
- Deterioro de los aislamientos y algunos componentes de las redes y como consecuencia la disminución de la calidad de la energía.

- Fallas en medidores y protecciones por valores erróneos de medidas acusa de fluctuaciones en el valor de corriente y voltaje.
- Así también existe la sobrecarga en el cableado neutro del sistema provocando así problemas de sobrecalentamiento en el conductor.



Figura 11. Carga no lineal [autor].

Partiendo de la primicia de las afectaciones que tienen las cargas no lineales y la aparición de armónicos se tomara en cuenta las barras afectadas por este fenómeno, se modelara y analiza la presencia armónica del sistema de 13 barras, para que posteriormente se ubicara los filtros en las barras candidatas.

## 4.4 Modelamiento del Filtro Activo de Potencia

El diseño y modelamiento del filtro se lo realizo en la herramienta Matlab – simulink, este consta de dos, elementos resistivos e inductivos.

Mediante este filtro se procederá a disminuir la presencia armónica y mejorar la eficiencia del sistema de 13 barras mediante un el cual se obtendrá los siguientes resultados.

Para el diseño se obtuvo los siguientes valores utilizando las ecuaciones (4), (5), (6), las cuales fueron mencionada en el apéndice 3.2 presentadas antes para obtener el valor de la fuente DC, inductancia y capacitancia del mismo:

Datos para el diseño de APF	Valores
C APF (F)	140*e-6
L APF (H)	17,5*e-3
(V)VDC	400
V-LL RMS	480

Tabla 5. Valores para diseño de APF.

#### 5 Análisis de resultados

Una vez echo cada uno del paso descrito en el flujograma de la figura 7 se procede al análisis obtenido de la simulación:

#### 5.1 Perturbación armónica THD

El análisis del THD presente en el sistema de 13 barras después de la conexión de la carga no lineal es la figura 12, una vez conectado el APF se obtuvo los siguientes resultados en la figura 13:



Figura 12. Espectro armónico de voltaje del sistema obtenido de la simulación FFT sin filtro.



Figura 13. Espectro armónico de voltaje del sistema obtenido de la simulación FFT con filtro.

El porcentaje de espectro armónico presente en el sistema después de la conexión de la carga no lineal es de un THD igual al 52,6%, comparando con los datos admisibles por parte de la norma IEEE 519 el cual nos dice que el valor del THD no debe sobrepasar el 8%. Una vez obtenido este dato se conecta los filtros en las barras candidatas obteniendo una reducción en el porcentaje de armónicos del sistema a 6,89% el cual se encuentra por debajo de valor admisible antes mencionado por la norma IEEE 519.

## 5.2 Conexión del filtro a las barras candidatas

En el caso de estudio del sistema de 13 barras se conectó el filtro activo antes diseñado teniendo los siguientes resultados:

#### 5.2.1 Filtro activo conectado a la barra 633

En esta barra se encuentra conectado cargas lineales y no lineales por los cual se ve afectado la eficiencia del sistema por presencia de armónicos, los cuales presentan TDH muy elevados como se muestra en la figura 14 y 15, se consideran afectadas la onda sinusoidal de voltaje cono se muestra en la figura 16 y 17, así también ocasionan un consumo de potencia reactiva elevada como se visualiza en la figura 18 y 19.



Figura 14. Espectro armónico de voltaje en la barra 633 sin conexión de filtro.

Como notamos el elevado porcentaje de TDH en las barras 633 ocasiona que la calidad de energía se vea afectada.



Figura 15. Espectro armónico de voltaje en la barra 633 después de la conexión del filtro.

Una vez insertado el filtro en estas barras vemos una disminución el porcentaje de TDH que superaba el 18.7%.







Figura 17. Onda de voltaje con filtro en la barra 633.



Figura 18. Potencia P/Q sin filtro en la barra 633.



Figura 19. Potencia P/Q con filtro en la barra 633.

La aparición de cargas no lineales en las barras 633, la cual produce cambios en la onda de tensión y corriente, el filtro procederá a la disminución y mejora la eficiencia del voltaje que se visualiza de mejor manera en la figura 17, perfeccionando el rizado de la onda sinusoidal y reduciendo en un 15.4% el consumo

de la potencia reactiva vs la consumida antes de la conexión del filtro.

Así también perfeccionando el perfil de voltaje en 1,00 p.u. con referente al presentado en la tabla 3.

#### 5.2.2 Filtro activo conectado a la barra 634

Al igual que en el anterior caso se verá la disminución del THD en figura 20 y 21, por otro lado, el las figuras 22 y 23 se procede a examinar el ruido presente por afección de los armónicos.

Para complementar el mejoramiento en la barra 634 se visualiza en las figuras 24 y 25





Figura 20. Espectro armónico de voltaje en la barra 634 sin conexión de filtro.

Así también el espectro armónico presente en esta barra es de 12,97% superando así el valor máximo de 8%.



Figura 21. Espectro armónico de voltaje en la barra 634 después de la conexión del filtro.

Una vez conectado el filtro a la barra se ve una clara disminución del TDH con porcentaje inferir al permisible en los sistemas de potencia.



Figura 22. Onda de voltaje sin filtro en la barra 634.



Figura 23. Onda de voltaje con filtro en la barra 634.



Figura 24. Potencia P/Q sin filtro en la barra 634.



Figura 25. Potencia P/Q con filtro en la barra 634.

Una vez conectado el filtro a la barra 634 se obtiene un mejoramiento en la onda sinusoidal, así también el consumo de potencia reactiva se ve disminuida en un 11% con respecto a la simulación inicial.

#### 5.2.3 Filtro activo conectado a la barra 680

De la misma manera se procede a conectar el filtro en la barra 680 y se obtiene la siguiente visualización de las figuras 26 y 27 del THD.

Para el mejoramiento del voltaje yan vez conectada el filtro se puede ver un mejor rizado en la onda fundamental presente en las figuras 28 y 29.



Figura 26. Espectro armónico de voltaje en la barra 680 sin conexión de filtro.

Del mismo modo se obtuvo un valor del 4,39% del THD en la barra 680, en este caso el valor está por debajo del máximo admisible, pero del mismo modo se conecta el filtro reduciendo el porcentaje a 0,01%.



Figura 27. Espectro armónico de voltaje en la barra 680 después de la conexión del filtro.



Figura 28. Onda de voltaje sin filtro en la barra 680.



Figura 29. Onda de voltaje con filtro en la barra 680.

Una vez que se conecto el filtro a la barra este tendrá un menor consumo de potencia activa y reactiva la cual se puede ver el las figuras 30 y 31.



Figura 30. Potencia P/Q sin filtro en la barra 680.



Figura 31. Potencia P/Q con filtro en la barra 680.

De la misma manera como podemos observar el mejoramiento de la onda de voltaje es notorio con respecto a la simulación inicial, así también se ve un mejoramiento de la potencia reactiva en un 30% con respecto a la simulación sin filtro.

#### 6 Conclusiones

Se concluyo después de realizar las simulaciones y el análisis de cada uno de los

escenarios propuestos, en nuestro sistema de 13 barras IEEE vemos que al no tener conectado una carga no lineal los valores de tensión son estables mayores al 0,98 p.u, una vez se da paso a la conexión de la carga no lineal vemos perturbación en las señales de tensión y corriente así también la presencia de armónicos de 3er armónico en adelante en las barras conectadas y las barras aledañas en menor proporción.

Al examinar la influencia que tiene la carga no lineal en un nodo al cual esté conectado, este presentara permutaciones tanto en su THDV con valores de 52,6% en la barra más conflictiva y con un valor de 15,4% en su menor valor, provocando así una desestabilización y perdiendo la eficiencia de trabajo del sistema, así también esto incrementa la presencia de potencia reactiva la cual no es deseada dentro los sistemas de potencia.

Vemos también que al utilizar el modelo matemático de LSF nos ayuda a predecir con mayor facilidad la ubicación de los filtros mediante el uso la potencia activa y reactiva como punto de partida cuando lsf <= 0,6 y corroborando con la cota de tensión medida en cada barra la cual no superar un nivel menor al 0,95 p.u.

Al compensar la potencia reactiva y filtrar los armónicos, contribuyen significativamente a elevar la calidad de la energía en un sistema llegando hasta un valor de 1.05 p.u. Esto es esencial para asegurar un suministro eléctrico fiable y eficiente.

Las tecnologías modernas de filtros activos utilizan controladores avanzados y algoritmos de procesamiento de señales para garantizar un rendimiento óptimo. Estos sistemas pueden responder rápidamente a cambios en la carga y actuando rápidamente en la presencia de armónicos, cabe recalcar que el tiempo de respuesta en cada uno de los casos dependerá de la implantación y especificaciones de cada filtro activo de potencia.

#### 6.1 Trabajos futuros

Dada la presente investigación, se propone como temas de investigación futura:

Determinar un control predictivo multiobjetivo para filtros APF para sistemas con cargas no lineales altas.

Uso de filtros activos para mitigar la conexión de centros de carga vehicular con alto consumo dentro de las ciudades en crecimiento.

#### 7 Referencias

- X.-P. Zhang and Z. Yan, "Energy Quality: A Definition," *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 7, pp. 430–440, 2020, doi: 10.1109/oajpe.2020.3029767.
- [2] G. Marin, "Methods for Improving the Quality of Electrical Energy in Distribution Networks," pp. 241– 245, 2021.
- [3] N. K. Bett and C. C. Maina, "New Approach for Design of Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement in a Three Phase Three Wire System," pp. 20–23, 2020.
- [4] Q. Ibrahim, R. Akbarzadeh, T. C. Jen, and D. M. Madyira, "Case study and energy analysis of power system management of confectionery factory in Jordan," *5th Int. Conf. Power Gener. Syst. Renew. Energy Technol. PGSRET 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/PGSRET.2019.8882688.
- [5] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and

issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.

- [6] A. Safavizadeh, G. R. Yousefi, and H. R. Karshenas, "Voltage variation mitigation using reactive power management of distributed energy resources in a smart distribution system," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 1907–1915, 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2781690.
- [7] D. Serfontein, J. Rens, and G. Botha, "Harmonic impedance assessment using prevailing phasors," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2018-May, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378872.
- [8] E. C. Systems, and E. C. Systems, "Optimal selection of metering points for quality power distribution measurements in system," 2020.
- [9] J. Fu, L. Chen, H. Zhao, and P. Zhang, "High and Low Frequency Control Strategy for APF DC Side Ripple Voltage under Unbalanced Load," 2019 IEEE 2nd Int. Conf. Electron. Commun. Eng. ICECE 2019, no. 1, pp. 326–330, 2019, doi: 10.1109/ICECE48499.2019.905851 0.
- [10] M. F. Braga, S. N. Duarte, M. Guilherme, and P. G. Barbosa, "Design method to reduce the dc link voltage of a three-wire three-phase hybrid active power filter."pp. 2019
- [11] K. Kalyan, "Improvement of power quality using series active power filter (SAPF)," pp. 0–4, 2020.
- [12] D. Daftary, "for Current Harmonics Mitigation," no. 4, pp. 4–7, 2019.
- S. Cheng, N. Zhang, X. Cui, and Z.
   Fu, "Research on Reactive Compensation Technology Based on SVC-APF," *Proc. 2018 IEEE 3rd*

*Adv. Inf. Technol. Electron. Autom. Control Conf. IAEAC 2018*, no. Iaeac, pp. 1547–1551, 2018, doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577530.

- [14] F. Mebrahtu, "Harmonics Mitigation in Industrial Sector by using Space Vector PWM and Shunt Active Power Filter," pp. 1–6, 2020.
- [15] A. Nafisi and M. Rezvani, "Harmonic Resonance Assessment Based on Field Measurements Data in an Industrial Plant," pp. 1–6, 2020.
- [16] M. Costea and T. Leonida, "The Difficulty to accurately assess the Active Losses due to Harmonics," 2022 20th Int. Conf. Harmon. Qual. Power, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/ICHQP53011.2022.980871 1.
- [17] F. W. Xu, L. Wang, J. S. Zhao, Y. Chen, L. Xu, and C. Hu, "A new method for harmonic impedance estimation," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2018-May, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378912.
- [18] J. Nomm, S. Ronnberg, and M. Bollen, "Harmonic voltage measurements in a single house microgrid," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2018-May, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378921.
- [19] N. Nakhodchi, T. Busatto, and M. Bollen, "Measurements of Harmonic Voltages at Multiple Locations in LV and MV Networks," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2020-July, pp. 5–9, 2020, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.917792 6.
- M. Mnisi, P. Bokoro, K. Roro, L. [20] Pratt, and M. B. Ayanna, "A comparison between harmonic indices in low voltage grid-tied photovoltaic system," IEEE AFRICON Conf., vol. 2019-Septe, 15–18, 2019. doi: pp.

10.1109/AFRICON46755.2019.913 3774.

- [21] P. Rodriguez-Pajaron, A. Hernandez, and J. V. Milanovic, "Probabilistic Assessment of Harmonics in a Residential Network," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2020-July, 2020, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.917787 3.
- [22] T. Xiong, W. Lou, J. Zhang, and H. Tan, "MIO: Enhancing Wireless Communications Security Through Physical Layer Multiple Inter-Symbol Obfuscation," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 10, no. 8, pp. 1678–1691, 2015, doi: 10.1109/TIFS.2015.2422264.
- [23] A. Ullah, I. Ul, H. Sheikh, S. Arshad, and F. Saleem, "Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System," 2019 16th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol., pp. 384– 388, 2019.
- Y. Fu *et al.*, "Study on compensation to dead-time effect of three-level APF," *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2019-July, pp. 7275–7279, 2019, doi: 10.23919/ChiCC.2019.8866621.
- [25] I. P. Nevirkovets, O. Chernyashevskyy, J. Walter, and O. A. Mukhanov, "Superconducting-ferromagnetic injection-controlled switching device," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/TASC.2019.2898326.
- [26] Q. Luo *et al.*, "Self-Rectifying and Forming-Free Resistive-Switching Device for Embedded Memory Application," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 39, no. 5, pp. 664–667, 2018, doi: 10.1109/LED.2018.2821162.
- [27] S. Nakamura, "Compact, low-loss, and polarization insensitive silicon

photonic switch device and module," *OECC/PSC* 2019 - 24th *Optoelectron. Commun. Conf. Conf. Photonics Switch. Comput.* 2019, vol. 2, pp. 1–3, 2019, doi: 10.23919/PS.2019.8817665.

- [28] S. Xu, C. Wang, Q. Qian, J. Zhu, W. Sun, and H. Li, "A single-switched high-switching-frequency quasiresonant flyback converter with zerocurrent-switching and vallevswitching," Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. -APEC, vol. 2019-March, pp. 2123-2127, 2019, doi: 10.1109/APEC.2019.8721815.
- [29] R. I. O. Dqg et al., "Harmonics mitigation in industrial sector to the problems reactive currents" 2020 5th IEEE Int. Conf. Recent Adv. Innov. Eng. pp. 30–31, 2020.
- J. K. Bhutto, A. B. Barnawi, M. [30] Abdullah, and S. K. Gupta, "Integration of Solar Photovoltaic Grid Systems to using Loss Sensitivitity Factor method for Improvement of Voltage Profile," 2020 5th IEEE Int. Conf. Recent Adv. Eng. Innov. ICRAIE 2020 Proceeding, vol. 2020, pp. 1-4, 2020, doi: 10.1109/ICRAIE51050.2020.93582 84.
- [31] S. Kamel, A. Selim, F. Jurado, J. Yu, K. Xie, and T. Wu, "Capacitor Allocation in Distribution Systems Using Fuzzy Loss Sensitivity Factor with Sine Cosine Algorithm," 2019 IEEE Innov. Smart Grid Technol. -Asia (ISGT Asia), pp. 1276–1281, 2019.
- [32] D. Q. H. Junainah Sardi, N. Mithulananthan, "A Loss Sensitivity Factor Method for Lacating ES in a Distribution System with PV units," *IEEE PES 2015*, vol. 3, pp. 3–7, 2015.
- [33] R. Lq, D. V. H. R. I. Dxowv, E.

Kpdg, K. Dqgl, and G. Oohu, "Improvement of Voltage Profile and Mitigation of Power Losses in Case of Faults Using DG Units," 2020 5th IEEE Int. Conf. Recent Adv. Innov. Eng. ICRAIE 2020 -Proceeding, vol. 2018, pp. 1–6, 2018.

[34] R. Roshan, P. Samal, and P. Sinha, "Optimal placement of FACTS devices in power transmission network using power stability index and fast voltage stability index," *Int. Conf. Electr. Electron. Eng. ICE3* 2020, pp. 246–251, 2020, doi: 10.1109/ICE348803.2020.9122975.

#### 7.1 Matriz de Estado del Arte

#### Tabla 6: Matriz de estado del arte.

	D	ISEÑO DE UN ENERGÍA CO	I FII DNS	LTF IDF	RO . ERA	AC" ANE	TIV DO I	'O ] EL	PAI FA	RA CT	EL OR	MI DE	EJO SE	RA 2NS	MI IBI	EN'. LID	ГО AD	DE A	LA LA	CA PÉR	LID. DID	AD I A (I	DE I LSF)	LA	
		DATOS		TEMÁTICA						FOR	MULA PROB FUNC OBJE	CIÓN LEMA IONES TIVO	DEL	REST PR	FRICCI S DEL OBLEI	IONE MA	PR	OPUE RESO PRO	STAS I LVER BLEM	PARA EL A	SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	ŌŇŌ	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Calidad de la Energía	Sistema de Distribución	Modulación del Perfil de Voltaje	Implementación de filtros Activos de Potencia	Ubicación del Filtros Activos de Potencia	Modelación de Sistemas Desbalanceados	Filtros Activos de Potencia	Estabilidad del Índice de Potencia	Estabilidad del Índice de Tensión	Uso del Factor de Sensibilidad a la Perdida	Evaluación de la Calidad de la Energía y el uso de Filtros	Topología de la Red	Niveles de Potencia	Flujo de Potencia Óptimo	Registro de Medidas de Voltaje en el Sistema	Diseño del Filtro Activo de Potencia	Validación de la Ubicación de los Filtros activos	Mejora de Estabilidad - Eficiencia - Rendimiento	Diseño e Implementación del Filtro Activo de Potencia	Ubicación del filtro mediante el LFS	Validación de los Parámetros Asociados a la Calidad de la Energía	
1	2020	Energy Quality: A Definition	15		₩		æ	¥	¥	₩				₩	₩	æ					₩				
2	2021	Methods for Improving the Quality of Electrical Energy in Distribution Networks	33		₩				₩	₩				₩	Ð	₩							¥		
3	2020	New Approach for Design of Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement in a Three Phase Three Wire System	51			æ	₩							¥							×				
4	2015	Case study and energy analysis of power system management of confectionery factory in Jordan	59		¥		æ			₩						¥			æ		æ				
5	2016	Distributed generation: definition, benefits and issues	49		æ		æ					₩	¥			₩	Æ					¥			
6	2019	Voltage variation mitigation using reactive power management of distributed energy resources in a smart distribution system	30			¥	¥			₽				₩				₽		æ				¥	
7	2018	Harmonic impedance assessment using prevailing phasors	82			¥	¥	¥					¥			¥			¥			₽			

	D	ENERGÍA (	CON	SID	<b>E</b> R	AN	DO	) EI	LF	AC'	ΓΟ	R D	E S	EN	SIB	ILI	DAD	AL	A P	ÉRD	DIDA	(L	<b>SF</b> )	-
		DATOS	TEMÁ	ÁTICA			FOR	MULA PROB FUNC OBJE	CIÓN LEMA IONES TIVO	DEL	REST PR	FRICCI S DEL OBLEI	IONE MA	PR RESOI	OPUEST LVER EL	AS PAR PROBI	A LEMA	SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	τίτυιο del artículo	CITAS	Calidad de la Energía	Sistema de Distribución	Modulación del Perfil de Voltaje	Implementación de filtros Activos de Potencia	Ubicación del Filtros Activos de Potencia	Modelación de Sistemas Desbalanceados	Filtros Activos de Potencia	Estabilidad del Índice de Potencia	Estabilidad del Índice de Tensión	Uso del Factor de Sensibilidad a la Perdida	Evaluación de la Calidad de la Energía y el uso de Filtros	Topología de la Red	Niveles de Potencia	Flujo de Potencia Óptimo	Registro de Medidas de Voltaje en el Sistema	Diseño del Filtro Activo de Potencia	Validación de la Ubicación de los Filtros activos	Mejora de Estabilidad - Eficiencia - Rendimiento	Diseño e Implementación del Filtro Activo de Potencia	Ubicación del filtro mediante el LFS	Validación de los Parámetros Asociados a la Calidad de la Energía
8	2020	Optimal selection of metering points for power quality measurements in distribution system	114		₩		₩			Ð				Ð		æ								
9	2019	High and Low Frequency Control Strategy for APF DC Side Ripple Voltage under Unbalanced Load	77			¥	¥	æ		Æ				æ										
10	2019	Design method to reduce the dc link voltage of a three-wire three-phase hybrid active power filter	113		₩		æ	₩		瘷			æ	Ħ						¥			æ	¥
11	2020	Improvement of power quality using series active power filter (SAPF)	62			æ	æ	¥					æ			¥				¥		æ	₩	₩
12	2019	for Current Harmonics Mitigation	56	₩	₩		₩			Ð						₩					Æ			
13	2018	Research on Reactive Compensation Technology Based on SVC-APF	170		₩		¥	¥		瘷				挼										
14	2020	Harmonics Mitigation in Industrial Sector by using Space Vector PWM and Shunt Active Power Filter	132			¥	¥	æ		Æ	₩					¥								
15	2020	Harmonic Resonance Assessment Based on Field Measurements Data in an Industrial Plant	356		¥				¥	¥					¥			¥						
16	2022	The Difficulty to accurately assess the Active Losses due to Harmonics	101			₩	₩			₩						æ								

# DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA

	D	CO	NSIDEF	RAN	DO	EL	FA	CT(	DR I	DE S	SEN	SIB	ILI	DAD	A		PÉ	RDI		(LSI	F)	51 1 1 2.	NUI	Α
		DATOS			TEM	ÁTICA			FO FUN	RMULA PROI	ACIÓN BLEMA S OBJE	REST DEL	RICCI PROBI	ONES .EMA	P	ROPUE RESO PRO	STAS P LVER E BLEMA	ARA L	SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	τίτυιο del artículo	CITAS	Calidad de la Energía	Sistema de Distribución	Modulación del Perfil de Voltaje	Implementación de filtros Activos de Potencia	Ubicación del Filtros Activos de Potencia	Modelación de Sistemas Desbalanceados	Filtros Activos de Potencia	Estabilidad del Índice de Potencia	Estabilidad del Índice de Tensión	Uso del Factor de Sensibilidad a la Perdida	Evaluación de la Calidad de la Energía y el uso de Filtros	Topología de la Red	Niveles de Potencia	Flujo de Potencia Óptimo	Registro de Medidas de Voltaje en el Sistema	Diseño del Filtro Activo de Potencia	Validación de la Ubicación de los Filtros activos	Mejora de Estabilidad - Eficiencia - Rendimiento	Diseño e Implementación del Filtro Activo de Potencia	Ubicación del filtro mediante el LFS	Validación de los Parámetros Asociados a la Calidad de la Energía
17	2018	A new method for harmonic impedance estimation	46			₩	₩			₩						₩			₩			₩		æ
18	2018	Harmonic voltage measurements in a single house microgrid	157			¥	¥				æ		¥			æ			¥		¥			
19	2020	Measurements of Harmonic Voltages at Multiple Locations in LV and MV Networks	670		*		₩	₩		*						æ			æ					₩
20	2019	A comparison between harmonic indices in low voltage grid-tied photovoltaic system	123		Æ				æ	¥			¥		₩		¥				¥			
21	2020	Probabilistic Assessment of Harmonics in a Residential Network	107		æ		¥	¥		æ			æ			₩				¥				æ
22	2018	MIO: Enhancing Wireless Communications Security Through Physical Layer Multiple Inter-Symbol Obfuscation	187	¥		¥	¥	¥		¥						¥	¥				Ħ	₩	æ	₩
23	2019	Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System	111		æ		₩							₩							挼			
24	2019	Study on compensation to dead-time effect of three-level APF	225	₩		₩	₩	₩		₩				₩	₩	₩	₩				Ð	¥	¥	₽
25	2019	Superconducting- ferromagnetic injection- controlled switching device	371			₩	₩			₩						₽	₽							₽

# DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

CONSIDERANDO EL FACTOR DE SENSIBILIDAD A LA PÉRDIDA (LSF)  DATOS  TEMÁTICA  FORMULACIÓN DEL RESTRICCIONES  PROPUESTAS PARA DESAL VED ET DIODUISTA															A									
		DATOS				TEMÁ	ÁTICA			FO FUN	RMULA PROE CIONE	ACIÓN BLEMA S OBJE	REST DEL	RICCI PROBI	ONES LEMA	P	ROPUE RESO PRO	STAS P. LVER E BLEMA	ARA L	SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	ΤΓ΄ΓULO DEL ΑΚΤΙ΄CULO	CITAS	Calidad de la Energía	Sistema de Distribución	Modulación del Perfil de Voltaje	Implementación de filtros Activos de Potencia	Ubicación del Filtros Activos de Potencia	Modelación de Sistemas Desbalanceados	Filtros Activos de Potencia	Estabilidad del Índice de Potencia	Estabilidad del Índice de Tensión	Uso del Factor de Sensibilidad a la Perdida	Evaluación de la Calidad de la Energía y el uso de Filtros	Topología de la Red	Niveles de Potencia	Flujo de Potencia Óptimo	Registro de Medidas de Voltaje en el Sistema	Diseño del Filtro Activo de Potencia	Validación de la Ubicación de los Filtros activos	Mejora de Estabilidad - Eficiencia - Rendimiento	Diseño e Implementación del Filtro Activo de Potencia	Ubicación del filtro mediante el LFS	Validación de los Parámetros Asociados a la Calidad de la Energía
26	2019	Self-Rectifying and Forming- Free Resistive-Switching Device for Embedded Memory Application	125		₩				₩	₩			¥		æ		æ				æ			
27	2019	Compact, low-loss, and polarization insensitive silicon photonic switch device and module	378	æ		₩		₩		₩				₩	¥	₽	₩				æ	¥		æ
28	2019	A single-switched high- switching-frequency quasi- resonant flyback converter with zero-current-switching and valley-switching	57			¥	¥			æ						×			¥			×		æ
29	2020	Harmonics mitigation in industrial sector to the problems reactive currents	48			₩							₩			₩			¥		¥			
30	2020	Integration of Solar Photovoltaic Systems to Grid using Loss Sensitivitity Factor method for Improvement of Voltage Profile	178		₩		₩	₩		₩						₩			¥					₩
31	2019	Capacitor Allocation in Distribution Systems Using Fuzzy Loss Sensitivity Factor with Sine Cosine Algorithm	167		₩		¥	₩		₩			¥	æ						æ		×		
32	2018	A Loss Sensitivity Factor Method for Lacating ES in a Distribution System with PV units	194			₩	₩	₩					¥			æ	₩							₩
33	2020	Improvement of Voltage Profile and Mitigation of Power Losses in Case of Faults Using DG Units	45	₩	₩					₩						₩	₩						¥	
34	2020	Optimal placement of FACTS devices in power transmission network using power stability index and fast voltage stability index	67	₩		₩	₩	₩		₩				₩	¥	₩	₩				æ	₩		₩
			CANTIDAD:	6	17	17	27	11	16	19	3	6	13	8	20	17	12	2	12	4	12	9	5	8

# DISEÑO DE UN EU TRO ACTIVO DADA EL MEJODAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERCÍA



Figura 32. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.



Figura 33. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.







Discrete 5e-05 s.



Figura 35. Sistema de 13 barras IEEE con conexión de filtro APF diseñado en simulink.



Figura 36. Filtro APF diseñado en simulink.