

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO

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

AUTOR: DIEGO MANUEL CHECA TIMBILA TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

> Quito -Ecuador 2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Manuel Checa Timbila con documento de identificación Nº 1722439252 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, 20 de septiembre del año 2024

Atentamente, reca Pa

Diego Manuel Checa Timbila 1722439252

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

Yo, Diego Manuel Checa Timbila con documento de identificación No. 1722439252, 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 la mitigación de perturbaciones armónicas inyectadas por electrolineras en una red de distribución usando el método de referencia síncrono", 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, 20 de septiembre del año 2024

Atentamente, LECC PO

Diego Manuel Checa Timbila 1722439252

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO, realizado por Diego Manuel Checa Timbila con documento de identificación N° 1722439252, 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, 20 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, MSc. 0503503336

ÍNDICE GENERAL

1]	Intr	oduc	cción	2
2	l	Maı	co te	eórico	3
	2.1		Fun	damentos de Calidad de Energía Eléctrica	4
	2.2)	Fen	ómeno armónico en el sistema eléctrico	5
	2	2.2.	1	Definición y efectos de las perturbaciones armónicas	6
	4	2.2.	2	Normativas y estándares relevantes para perturbaciones armónicas	7
	2.3	5	Esta	aciones de carga o electrolineras para vehículos eléctricos	7
	4	2.3.	1	Modos de recarga para un vehículo eléctrico enchufable	8
	4	2.3.	2	Dimensionamiento técnico de una electrolinera	9
	2	2.3.	3	Generación de Armónicos en la red por las Estaciones de Carga de VE	. 10
	2.4	ŀ	Teo	ría de filtros para armónicos	. 10
	2	2.4.	1	Filtros pasivos de potencia	. 10
	2	2.4.	2	Filtros activos de potencia FAP	.11
	2.5	5	Estr	ategias de control de los filtros activos de potencia	. 12
	2	2.5.	1	Métodos de control de los FAP en el dominio de la frecuencia	. 12
	4	2.5.	2	Métodos de control de los FAP en el dominio del tiempo	. 12
	2	2.5.	3	Métodos de Referencia Síncrono	. 12
3]	Des	cripo	ción y Modelamiento del Problema	. 13
	3.1		Sist	ema IEEE de 30 barras	. 13
	3.2	2	Elec	ctrolinera	. 14
	3.3	5	Dise	eño del Filtro Activo de Potencia	. 15
	3.4	ŀ	Dise	eño del controlador del Filtro Activo de Potencia	. 17
	3.5	,	Aná	ilisis de Resultados	. 19
		3.5.	1	Escenario 1	. 19
		3.5.	2	Escenario 2	. 20
4	(Con	clus	iones	. 21
	4.1		Tral	bajos futuros	. 22
5]	Ref	eren	cias	. 22
	5.1		Mat	riz de Estado del Arte	. 26
	5.2	2	Res	umen de Indicadores	. 31
6	1	Ane	exos.		. 32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de vehículos eléctricos7
Figura 2. Modos de recarga de un VE enchufable
Figura 3. Esquema de conexión de VE a la red de distribución10
Figura 4. Diagrama de bloque de FAP paralelo11
Figura 5. Diagrama de bloque de FAP serie12
Figura 6. Modelo implementado, Sistema, Electrolinera y Filtro Activo Potencia
Figura 7. Sistema IEEE de 30 barras13
Figura 8. Diagrama de bloques de la electrolinera en Matlab Simulink15
Figura 9. Estructura del Filtro Activo de Potencia15
Figura 10. Transformación de la corriente del Filtro Activo de Potencia y de la corriente armónica de referencia de la electrolinera a un sistema giratorio ortogonal
Figura 11. Lazo de control de voltaje implementado18
Figura 12. Lazo de control de corriente implementado18
Figura 13. Modelo de prueba implementado en Matlab Simulink19
Figura 14. Corriente nodo 30 Sistema IEEE 30 barras – sin compensar – Escenario 1 20
Figura 15. Corriente de Filtro vs Corriente Referencia componentes d,q – Escenario 1 20
Figura 16. Corriente en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras, Corriente del Filtro Activo de Potencia, Corriente de la electrolinera – Estado compensado – Escenario 1
Figura 17. Corriente nodo 30 Sistema IEEE de 30 barras – sin compensar – Escenario 2 21
Figura 18. Corriente de Filtro vs Corriente Referencia componentes d,q – Escenario 2 21
Figura 19. Corriente en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras, Corriente del Filtro Activo de Potencia, Corriente de la electrolinera – Estado compensado – Escenario 2
Figura 20. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte
Figura 21. Indicador de formulación del problema - Estado del arte
Figura 22. Indicador de solución - Estado del arte

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipología de carga de VE por cable	8
Tabla 2. Estaciones de carga de VE conocidas	.9
Tabla 3. Voltajes en p.u. del Sistema IEEE de 30 barras en condiciones iniciales 1	14
Tabla 4. Parámetros de diseño de la electrolinera1	15
Tabla 5.Parámetros del diseño del Filtro Activo de Potencia 1	16
Tabla 6. Parámetros diseñados del controlador PID del lazo de control de corriente 1	18
Tabla 7. Parámetros diseñados del controlador PID del lazo de control de voltaje 1	18
Tabla 8. Variables empleadas en el diseño del controlador 1	19
Tabla 9. Comparación del nivel de contenido armónico de la corriente del nodo 30 dSistema IEEE de 30 barras con la electrolinera sin compensar y compensado medianteFAP – Escenario 12	lel el 20
Tabla 10. Comparación del nivel de contenido armónico de la corriente del nodo 30 dSistema IEEE de 30 barras con la electrolinera sin compensar y compensado medianteFAP – Escenario 2	el el 21
Tabla 11: Matriz de estado del arte. 2	26
Tabla 12. Datos de líneas del sistema IEEE de 33 barras.	32
Tabla 13. Datos de cargas del sistema IEEE de 33 barras.	32

DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO

Resumen

El presente estudio analiza el nivel de distorsión armónica en una red de distribución IEEE de 30 nodos, causado por la operación de estaciones de carga de vehículos eléctricos. La creciente integración de estas estaciones en las redes de distribución ha suscitado preocupaciones respecto al impacto de los armónicos en la calidad de la energía y el rendimiento del sistema. Para abordar esta problemática, se han realizado simulaciones y mediciones detalladas de los armónicos presentes en la red, identificando los nodos más afectados y evaluando el impacto general en 1a estabilidad y eficiencia del sistema.

Con el propósito de mitigar estos efectos adversos, se ha diseñado e implementado un filtro activo conforme a la normativa IEEE 519-2014. Este filtro activo ha sido optimizado para minimizar la distorsión armónica total (THD) en la red de distribución. meiorando de manera significativa la calidad de la energía suministrada. Los resultados de la implementación demuestran una reducción efectiva de los armónicos, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa y evidenciando la viabilidad del uso de filtros activos en redes de distribución con alta penetración de estaciones de carga.

Palabras Clave: filtros activos, estaciones de carga, redes de distribución, calidad de energía, distorsión armónica total.

Abstract

The present study analyzes the level of harmonic distortion in an IEEE distribution network of 30 nodes, caused by the operation of electric vehicle charging stations. The increasing integration of these stations into distribution networks has raised concerns regarding the impact of harmonics on energy quality and system performance. To address this problem, detailed simulations and measurements of the harmonics present in the network have been carried out, identifying the most affected nodes and evaluating the general impact on the stability and efficiency of the system.

In order to mitigate these adverse effects, an active filter has been designed and implemented in accordance with IEEE 519-2014 regulations. This active filter has been optimized to minimize total harmonic distortion (THD) in the distribution network, significantly improving the quality of the energy supplied. The results of the implementation demonstrate an effective reduction of harmonics, complying with the limits established by the regulations and showing the feasibility of the use of active filters in distribution networks with high penetration of charging stations.

Keywords: active filters, charging stations, distribution network, power quality total harmonic distortion.

1 Introducción

La creciente demanda de movilidad sostenible ha impulsado la rápida adopción de vehículos eléctricos (VE) en todo el mundo, lo que ha llevado a un aumento significativo necesidad en la de infraestructura de carga. Las estaciones de carga para vehículos eléctricos, conocidas como electrolineras, se están convirtiendo en una parte integral del paisaje urbano y del sistema eléctrico en general. Estas electrolineras permiten a los propietarios el acceso a la carga para sus vehículos de manera conveniente, facilitando así la transición hacia una movilidad más limpia y sostenible [1].

Sin embargo, la conexión de electrolineras al sistema de distribución eléctrica puede introducir perturbaciones no deseadas en la red, como los armónicos. Muchos dispositivos eléctricos no lineales distorsionan las formas de onda de corriente, incluso con un voltaje sinusoidal [2]. Estos dispositivos generan armónicos que causan problemas en la red eléctrica (como resonancia en la red afectando equipos sensibles y de protección). Los armónicos son componentes de frecuencia múltiple de la frecuencia fundamental de la red eléctrica y pueden ser generados por cargas no lineales, como los convertidores de potencia utilizados en las electrolineras. Estos armónicos pueden afectar negativamente la calidad de la energía eléctrica, provocando distorsiones en la forma de onda de la corriente y voltaje, así como problemas de funcionamiento en los equipos eléctricos[3].

Para abordar estos problemas, se han establecido normativas estándares y específicos para limitar los niveles de armónicos y otras perturbaciones en el sistema eléctrico. Estas normativas, como las establecidas la Comisión por Electrotécnica Internacional (IEC) y el Ingenieros Eléctricos Instituto de V Electrónicos (IEEE), establecen límites de armónicos y especifican métodos de

medición y mitigación de estos fenómenos para garantizar la calidad de la energía suministrada a los consumidores [4].

Para la eliminación de armónicos se ha planteado enfoque que usa tecnología de energía personalizada [5], otro aplica métodos de control anticipativo del inversor para suprimir armónicos [6]. El inversor es un componente activo que puede controlar y generar corrientes armónicas bajo ciertas instrucciones de control, esto se aprovecha los inversores para contrarrestar de armónicos y equilibrar la corriente en la red [7]. Los académicos han estudiado dos enfoques para reducir armónicos con: impedancia virtual y métodos activos de filtrado de armónicos. Donde el método de impedancia virtual implica agregar una impedancia armónica virtual al inversor para absorber las corrientes armónicas en la red, mitigando así los armónicos de la red como en [8], [9]donde se evita que los armónicos fluyan hacia los recursos energéticos distribuidos. También para evitar la sobrecarga, investigadores en [10] escalaron la impedancia virtual de acuerdo con las capacidades de los inversores, con el objetivo de ecualizar la potencia armónica en proporción a la capacidad restante, al igual que en [11] se implementaron control de hundimiento en función de la diferencia entre la capacidad restante y la potencia armónica, mejorando así la calidad del voltaje de la red. Sin embargo, el método de impedancia virtual se queda corto a la hora de cuantificar la contribución de los filtros activos de potencia en la mitigación de armónicos de la red de distribución. Actualmente, la generación distribuida y los sistemas de almacenamiento funcionan con los filtros activos para compensar los armónicos [12], [13], además estos se pueden conectar en paralelo con la carga no lineal para realizar una compensación armónica [14]. En [15], se ha propuesto un método para compensar corrientes de armónicas y secuencia negativa utilizando un sistema de referencia síncrono múltiple, puede generar de forma rápida y precisa corrientes de compensación armónicas.

Como se mencionó una de las tecnologías utilizadas para mitigar los armónicos en el sistema eléctrico es el uso de filtros de potencia activos. Estos filtros componentes utilizan electrónicos controlados para generar corrientes que cancelan los armónicos presentes en la red, mejorando así la calidad de la energía eléctrica. Los filtros activos de potencia pueden instalarse en las electrolineras para reducir los armónicos generados por los convertidores de potencia y minimizar su impacto en la red eléctrica [16].

El control de los filtros de potencia es fundamental para garantizar su correcto funcionamiento y eficacia en la mitigación de armónicos. Los métodos de control más comunes incluyen el método de referencia síncrono, que ajusta la corriente de salida del filtro para que siga la forma de onda de la corriente de carga en fase con el voltaje de la red. Este método garantiza que los armónicos sean cancelados de manera efectiva, mejorando así la calidad de la energía suministrada [17].

En resumen, la aparición de vehículos eléctricos y electrolineras en el sistema eléctrico plantea desafíos en términos de calidad de la energía, especialmente en relación con la generación de armónicos. Sin embargo, mediante el uso de filtros de potencia y métodos de control adecuados, es posible mitigar estos problemas y garantizar un suministro de energía eléctrica seguro y eficiente para los usuarios de vehículos eléctricos.

En este estudio se propone evaluar el impacto de las electrolineras en la calidad de la energía eléctrica, centrándose específicamente en la distorsión armónica en una red de distribución. El objetivo principal es mitigar estos efectos no deseados mediante el uso de filtros activos. Para lograrlo, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el nivel armónico producido por la implementación de electrolineras y otros efectos en la red eléctrica. Además, se realizará una simulación del contenido armónico software DigSilent en el PowerFactory, considerando un sistema IEEE de 30 barras con la presencia de electrolineras. Con base en los resultados obtenidos, se diseñará un filtro activo utilizando Matlab Simulink, que permitirá armónicas perturbaciones mitigar las generadas. Para validar la eficacia de este se compararán los resultados filtro. obtenidos con el software DigSilent PowerFactory. Se espera que este estudio contribuya al desarrollo de soluciones efectivas para el control de la calidad de la energía eléctrica en sistemas con electrolineras, en cumplimiento con las normativas establecidas, en este caso, la IEEE 519-2014.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera; Sección I: introducción y antecedentes afines a la operación de las electrolineras, Sección II: marco teórico afín al concepto energética, perturbaciones calidad de armónicas, filtros activos de potencia y sus métodos de control. Para ello, se llevará a cabo un estudio bibliográfico sobre el nivel armónico producido por la implementación de electrolineras, así como otros efectos en una red de distribución eléctrica. Sección formulación del problema. III: y modelamiento matemático, junto con el Sección de resultados, análisis IV: conclusiones de la investigación y trabajos futuros y finalmente las referencias y anexos.

2 Marco teórico

En la actual de transición hacia la movilidad eléctrica sostenible, las estaciones de carga de vehículos eléctricos (VE) o electrolineras juegan un papel crucial en la infraestructura eléctrica. Estas estaciones requieren un suministro eléctrico estable y de alta calidad para garantizar una carga eficiente y segura de los vehículos. En el contexto de las electrolineras, los filtros activos de potencia (FAP) pueden desempeñar un papel crucial al reducir la distorsión armónica y mantener un voltaje estable, lo que garantiza un suministro eléctrico confiable y de alta calidad para la carga de vehículos eléctricos.

Por lo tanto, es fundamental desarrollar un marco teórico sólido que aborde los principios las estaciones de carga de VE, así como la aplicación de filtros activos. Este marco teórico se centrará en una herramienta de control para los FAP, que es el Método de Referencia Síncrono, que permite diseñar sistemas de carga de VE más eficientes y confiables, contribuyendo así a la integración exitosa de la movilidad eléctrica en las redes eléctricas actuales.

2.1 Fundamentos de Calidad de Energía Eléctrica

La calidad de la energía es la medida de la eficiencia con la que una red eléctrica es capaz de proporcionar electricidad que sea segura, constante y de confianza para su funcionamiento adecuado. La electricidad proporcionada debe estar dentro de los parámetros adecuados de voltaje, frecuencia y forma de onda requeridos por los dispositivos conectados, ya que una baja calidad de suministro puede resultar en daños a los equipos y en la interrupción del suministro de energía [18].

No hay definición universal para calidad de la energía eléctrica, pero estándares internacionales emplean las siguientes definiciones:

- IEC 61000-4-30 define la calidad de la energía como las características eléctricas en un punto específico de una red eléctrica, evaluadas en función de parámetros técnicos [19].
- IEEE 519-2014 define la calidad de la energía eléctrica como una variedad de fenómenos electromagnéticos que determinan al

voltaje y corriente en un instante y en un punto de la red eléctrica [20].

La calidad de energía se centra principalmente en cómo la forma de onda se ve afectada durante las diferentes etapas del funcionamiento del sistema eléctrico, como la generación, el transporte y la distribución de la electricidad, siendo este fenómeno causado también por la interferencia provocada por dispositivos eléctricos utilizados en el lado de consumo. Esta dificultad final surge debido a que la forma que los consumidores utilizan la en electricidad puede alterar las características la caso técnicas de energía. Un representativo sería cuando los usuarios conectan ciertos dispositivos como electrodomésticos y aparatos electrónicos al suministro eléctrico, lo que resulta en la generación de corrientes que causan pérdidas de voltaje en la red. La cantidad de voltaje que se proporciona a un cliente está determinada por las variaciones de voltaje que se van sumando en la red que lo abastece, lo que significa que la red se verá impactada por su propia demanda y la de otros clientes [21].

Los daños en el sistema eléctrico también pueden ser causados por diversas razones externas como condiciones del clima, desgate temporal, influencia de animales o el hombre, entre otros que pueden alterar el suministro eléctrico. Por tal motivo la calidad de la energía eléctrica depende de los productores, distribuidores y usuarios, requiriendo la cooperación de todos para garantizar un control de los niveles óptimos y cuidado del sistema.

Estos son efectos que no se pueden evitar, pero los operadores del sistema trabajan arduamente porque estas perturbaciones puedan minimizarse. Por lo tanto, los desafíos que los agentes de las empresas de energía eléctrica actualmente enfrentan se pueden definir en dos [22]:

- Incrementar la capacidad de energía eléctrica para responder a la creciente demanda debido a la existente proximidad de los sistemas a su capacidad máxima.
- Garantizar la calidad de la energía eléctrica para el buen funcionamiento de equipos conectados a la red y contribuir al desarrollo tecnológico.

La calidad de la energía eléctrica se puede ver afectada por perturbaciones que se enmarcan en siete categorías según la representación de la onda como: aumento y disminución de voltaje, transitorios, interrupciones de corta duración, fluctuaciones de voltaje y de frecuencia, y una de las más comunes las perturbaciones armónicas [23].

Las perturbaciones armónicas son una causa importante de problemas en la calidad de la energía eléctrica. Su presencia puede causar una serie de problemas, como el calentamiento excesivo de los equipos, la reducción de la eficiencia de la energía, la degradación de la calidad de la energía eléctrica y hasta afecta a los sistemas de comunicación. Por lo tanto, comprender cómo las perturbaciones armónicas afectan a la calidad de la energía es fundamental para garantizar un suministro eléctrico seguro y eficiente [24].

2.2 Fenómeno armónico en el sistema eléctrico

En paralelo a la evolución del hombre la expansión de la población y el aumento de la demanda eléctrica también se incrementan las perturbaciones armónicas debido al uso de aparatos eléctricos de uso doméstico y equipos industriales así también como la inserción de vehículos eléctricos que hacen uso de baterías para su funcionamiento y estaciones de carga que se interconectan a las redes eléctricas instaladas [25].

Los dispositivos eléctricos o también llamadas cargas eléctricas se pueden clasificar en dos grandes grupos del tipo lineal y del tipo no lineal. Hoy en día las cargas del tipo no lineal son de uso cotidiano a nivel doméstico e industrial, como variadores de velocidad, fuentes de alimentación conmutadas v cargas dispositivos electrónicas. estos están distintos conformados por elementos capaces de interactuar entre ellos y pueden distorsionar las ondas de voltaje y corriente [26]. Los dispositivos de características no lineales que son conectados a la red y provocan distorsiones armónicas provienen de cargas, del propio sistema de potencia y las plantas de generación.

Entre las principales fuentes de distorsión o perturbaciones armónicas tenemos [27]:

- Equipos electrónicos de potencia por ejemplo rectificadores de onda y los convertidores de potencia se caracterizan por inyectar magnitudes altas de distorsión sobre todo del tercer armónico.
- Convertidores de potencia que están caracterizados por generar armónicos del quinto orden y usan ancho de pulso, onda cuadrada o inversores de fuentes de corriente para rectificar la onda de corriente.
- Los dispositivos de arco eléctrico son representados por fuentes de voltaje armónico y son limitados solo por la impedancia propia de los equipos.
- Aparatos 0 equipos eléctricos • saturados donde los armónicos se presentan debido a las características no lineales de la magnetización por ejemplo generadores, motores, maquinas con bobinados, presentan armónicos del tercer orden.

Cabe resaltar que en el mercado actual la incorporación de vehículos eléctricos (VE) mantiene un crecimiento constante debido a su casi inexistente emisión de gases, su aporte al cuidado del medio ambiente y la no contaminación del aire, dichos VE hacen recargables para su uso de baterías funcionamiento las cuales son cargas no lineales que inyectan armónicos en la red ya cuentan con elementos que semiconductores y afectan directamente a la calidad de energía eléctrica en la red por el aporte de distorsiones armónicas que ocasionan en los puntos de carga o electrolineras.

2.2.1 Definición y efectos de las perturbaciones armónicas

perturbaciones Las armónicas son fluctuaciones no deseadas en la forma de onda de la corriente o el voltaje eléctrico, que se caracterizan por tener una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Como se mencionó estas perturbaciones son causadas principalmente por equipos electrónicos no lineales.

Las series de Fourier muestran que una señal sinusoidal está compuesta por la suma de distintas sinusoides las cuales tienen su propia amplitud y fase. Al presentarse perturbaciones armónicas que deforman la señal pura senoidal de voltaje o corriente generan las centrales eléctricas estas aue pasan a forman parte de una frecuencia fundamental 50Hz o 60Hz [28] siendo estos también llamados submúltiplos inter armónicos y múltiplos pares e impares los cuales son de mayor interés para su estudio por la afectación que pueden producir en los sistemas eléctricos. Entonces se puede decir tres características principales de los armónicos son [16]:

- a) Tienen fase y magnitud propia
- b) Son múltiplos o submúltiplos de la frecuencia fundamental
- c) Deforman la señal pura de voltaje o corriente que generan las centrales eléctricas.

Cuando existe una deformación en la onda sinusoidal de energía eléctrica a esta se la conoce como distorsión armónica, para cuantificar la magnitud de esta deformación entre la onda fundamental usamos porcentajes y se define por sus siglas en ingles THD o distorsión armónica total para lo cual se muestran las siguientes ecuaciones para la distorsión armónica total de corriente y voltaje [27].

$$THD\%(I) = 100.\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1}$$
(1)

$$THD\%(V) = 100.\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1}$$
(2)

Los efectos de las perturbaciones armónicas en la red eléctrica pueden ser diversos y perjudiciales. Uno de los efectos más significativos es el aumento de la temperatura en los equipos eléctricos, como transformadores, conductores y motores, corrientes armónicas debido а las adicionales que generan pérdidas de energía por efecto Joule. Esto puede reducir la vida útil de los equipos y aumentar los costos de mantenimiento. Además, las perturbaciones armónicas pueden causar inestabilidad en la red eléctrica, especialmente cuando se producen resonancias entre las frecuencias armónicas y las características de la red, lo que puede dar lugar a sobretensiones, sobrecorrientes e incluso a la interrupción del suministro eléctrico [29].

Para mitigar los efectos adversos de las perturbaciones armónicas la red en implementar eléctrica. es importante medidas de control y filtrado. Esto puede incluir el uso de filtros activos y pasivos para reducir las corrientes armónicas, así como el diseño adecuado de sistemas eléctricos para minimizar la generación de armónicos. Además, las normativas y estándares, como la norma IEEE 519, establecen límites para las perturbaciones armónicas en sistemas eléctricos, lo que ayuda a proteger la calidad de la energía eléctrica ya garantizar un suministro eléctrico seguro y confiable [30].

2.2.2 Normativas y estándares relevantes para perturbaciones armónicas

Las normativas y estándares relacionados con las perturbaciones armónicas en sistemas eléctricos son fundamentales para garantizar una calidad de energía eléctrica adecuada y para proteger la integridad de los equipos conectados a la red. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos Electrónicos (IEEE) son dos y organizaciones internacionales que han desarrollado normativas v estándares relevantes en este campo.

- La norma IEC 61000-2-2 establece los límites de emisión de armónicos para equipos eléctricos conectados a redes de baja tensión. Esta norma los niveles define máximos permisibles armónicos de para garantizar los equipos que conectados a la red no generen perturbaciones armónicas que puedan afectar a otros equipos o a la calidad de la energía eléctrica en la red [19].
- Por otro lado, el estándar IEEE 519 proporciona directrices para 1a evaluación y control de las perturbaciones armónicas en sistemas eléctricos de potencia. Este estándar establece límites para las corrientes armónicas generadas por equipos y sistemas conectados a la red eléctrica, con el objetivo de limitar los efectos adversos de las perturbaciones armónicas en la red y en los equipos conectados a ella [20].

2.3 Estaciones de carga o electrolineras para vehículos eléctricos

Actualmente hay tres tipos de vehículos eléctricos disponibles en el mercado automotriz como se presenta en la Figura 1. Se destaca la creciente adopción de vehículos eléctricos enchufables ya que ha generado la necesidad de desarrollar infraestructuras de carga adecuadas, como las estaciones de carga o electrolineras, que permitan la recarga eficiente y rápida de estos vehículos. Estas estaciones de carga se integran en la red eléctrica de distribución, lo que plantea desafíos en términos de diseño, operación y gestión de la red. La incorporación de estaciones de carga de vehículos eléctricos en la red eléctrica requiere consideraciones especiales para garantizar un suministro eléctrico estable y de calidad, así como para minimizar los impactos negativos en la red y en los usuarios [31], [32].



Figura 1. Tipos de vehículos eléctricos [33].

La integración de estaciones de carga de vehículos eléctricos en la red eléctrica de distribución también plantea oportunidades, como la posibilidad de gestionar la carga de manera inteligente para evitar congestiones en la red y optimizar el uso de la energía. Además, las estaciones de carga pueden servir como puntos de conexión para la integración de energías renovables, como la solar o la eólica, lo que contribuiría a una red eléctrica más sostenible y resiliente. Sin embargo, para aprovechar al máximo estas oportunidades, es necesario abordar los desafíos técnicos, regulatorios y operativos asociados con la integración de estaciones de carga de vehículos eléctricos en la red eléctrica [34].

2.3.1 Modos de recarga para un vehículo eléctrico enchufable

Existen tres métodos principales para recarga de VE como son el intercambio del bloque de baterías, por carga inductiva y el de mayor interés en este estudio por ser el más habitual con el uso de conductores eléctricos que transfieren corriente desde la red eléctrica a la batería de forma directa o indirecta como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Modos de recarga de un VE enchufable [35].

La carga de vehículos eléctricos funciona diferentes velocidades а dependiendo de la potencia del cargador y la capacidad de la batería del vehículo. Se distinguen tres niveles principales de carga: lenta, carga y carga ultrarrápida, teniendo en cuenta que la carga lenta es mediante corriente alterna y la carga rápida en corriente continua. La Tabla 1 presenta todas las velocidades de carga existentes para las electrolineras y sus características [36].

• Carga lenta: es la forma más básica de carga y se realiza a través de una toma de corriente doméstica estándar. Este tipo de carga es ideal para cargar el vehículo en casa, ya que proporciona una potencia de carga baja y constante. La carga lenta es adecuada para vehículos con baterías de capacidad moderada y tiempos de carga prolongados.

- Carga rápida: La carga rápida se • realiza a través de estaciones de carga de corriente alterna de alta potencia o de corriente continua. Este tipo de carga proporciona una potencia de carga más alta que la y es ideal para recargar un vehículo en un tiempo corto. Suelen estar disponibles en lugares públicos y es vehículos adecuada para que requieren una recarga rápida y ocasional, como los utilizados para viajes largos.
- Carga ultrarrápida: es la forma • más avanzada de carga y utiliza estaciones de carga de alta potencia de corriente continua. Este tipo de carga proporciona una potencia de carga muy alta y puede recargar la mayor parte de la capacidad de la batería en cuestión de minutos. La carga ultrarrápida es ideal para vehículos que necesitan una recarga rápida y frecuente, como los utilizados para servicios de transporte o flotas comerciales.

Velocidad de carga	Conexión y potencia	Tiempo de recarga
Lenta	Monofásico hasta 3.6 kW	5-7 h
Semi-Rápida	Monofásico o trifásico hasta 25 kW	150 km 1 o 2 h
Rápida	Trifásico o en continua hasta 50 kW	120 km 20 min
Super-Rápida	Trifásico o en continua hasta 150 kW	250 km 20 min
Ultra-Rápida	Corriente continua>50kW	

Tabla 1. Tipología de carga de VE por cable [37].

En el mercado actual existen estaciones de recarga lenta, semi- rápida, rápida, super- rápida y ultra- rápida. Para el caso se muestra una estación de recarga muy usada en la actualidad de la marca ABB como es la Electrolinera Dual Terra 53 en la implementación de electrolineras por sus prestaciones eficiencia, tiempo de recarga y capacidad de recarga para VE por hora como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Estaciones de ca	rga de VE cono	ocidas [38], [39].
---------------------------	----------------	--------------------

Equipo	Electrolinera dual Terra 53 ABB	Electrolinera dual Terra 53 ABB
Función	Recarga semi rápida	Recarga rápida
Conexión	Corriente AC	Corriente DC
kW	22	50
Capacida d teórica U./Hora	0.5	2
Eficiencia %	94 %	94 %
Capacidad Real U./Hora	0.47	1.88

2.3.2 Dimensionamiento técnico de una electrolinera

La conexión de las electrolineras a la red de distribución eléctrica puede tener diversos efectos. Uno de los principales efectos es el aumento de la demanda de energía eléctrica en los puntos de conexión de las electrolineras. Este aumento de la demanda puede provocar congestión en la red y sobrecargas en los transformadores y conductores, especialmente en áreas donde se concentran varias electrolineras o donde la infraestructura eléctrica es limitada.

Además, la conexión de las electrolineras puede ocasionar fluctuaciones en el voltaje y la frecuencia de la red eléctrica. Esto puede deberse a la variabilidad en la demanda de energía de las electrolineras. especialmente durante períodos de alta demanda. Para mitigar estos efectos, es importante realizar un estudio de impacto en la red antes de la instalación de las electrolineras, así como implementar de control y gestión de la carga

para garantizar un funcionamiento estable y eficiente de la red eléctrica.

El operador del sistema de distribución se basa en diversos fundamentos para planificar la integración de las estaciones de carga en la red, los aspectos técnicos de análisis son [40]:

- a) Demanda de energía esperada: depende del número de vehículos que se espera cargar diariamente y el tiempo de carga promedio por vehículo. Esto permite determinar la potencia total requerida de la electrolinera.
- b) Potencia de carga requerida: varía según el tipo de conexión (lenta, rápida o ultra rápida) y la capacidad de carga de los vehículos. Se debe garantizar que la potencia de carga de cada punto sea suficiente para satisfacer las necesidades de carga de los vehículos.

 $P_{Electrolinera} = n * P_{Consumida} * \eta \qquad (3)$

Donde:	
P _{Electrolinera}	Potencia total de la
	electrolinera
n	Cantidad de puntos de
	carga para VE.
P _{Consumida}	Potencia consumida por
	punto de carga
η	Eficiencia

c) Infraestructura eléctrica disponible: se debe evaluar la infraestructura eléctrica disponible, como la capacidad de los transformadores y los conductores, para asegurar que puedan soportar la carga adicional de la electrolinera sin riesgo de sobrecargas o fallas en el suministro eléctrico.

2.3.3 Generación de Armónicos en la red por las Estaciones de Carga de VE

La generación de armónicos por las estaciones de carga de vehículos eléctricos es un tema de interés creciente debido al aumento en la adopción de vehículos eléctricos en todo el mundo. Estos armónicos son generados por equipos electrónicos no lineales, como los convertidores de potencia utilizados en las estaciones de carga de vehículos eléctricos.

Los convertidores de potencia utilizados en las electrolineras para cargar VE pueden generar armónicos debido a diversos mecanismos. Uno de los mecanismos principales es la presencia de componentes no lineales en los convertidores, como los rectificadores utilizados para convertir la corriente alterna en continua para cargar las baterías de los VE (Figura 3). Otro mecanismo es la conmutación de los dispositivos semiconductores, como los transistores de potencia utilizados en los convertidores, pueden generar armónicos de alta frecuencia debido a la rápida variación de la corriente y el voltaje. Además, los convertidores de potencia pueden generar armónicos debido а fenómenos de resonancia en los circuitos eléctricos [41].



Los estudios sobre la generación de armónicos por las estaciones de carga de vehículos eléctricos han demostrado que estos equipos pueden generar armónicos significativos, especialmente en las frecuencias de 3º, 5º, 7º, etc.

Estos armónicos pueden afectar la calidad de la energía eléctrica suministrada a la red, provocando distorsiones en la forma de onda de la corriente y el voltaje. Esto puede tener efectos negativos en la operación de la red eléctrica y en los equipos conectados a ella, como transformadores, conductores y equipos electrónicos sensibles [42].

Para mitigar los efectos de la generación de armónicos por las estaciones de carga de vehículos eléctricos, se han propuesto diversas soluciones, como el uso de filtros pasivos y activos para reducir los armónicos, así como el diseño adecuado de los sistemas eléctricos para minimizar la generación de armónicos [43].

2.4 Teoría de filtros para armónicos

Los filtros para armónicos son dispositivos diseñados para reducir o eliminar los componentes armónicos no deseados de una señal eléctrica. Estos filtros se clasifican principalmente en dos categorías según su construcción: filtros pasivos y filtros activos. O por su conexión a la red sea esta en serie para mitigar armónicos de voltaje o en paralelo para reducir los armónicos de corriente.

Los filtros pueden diseñarse para actuar en frecuencias armónicas específicas o para abarcar un rango más amplio de armónicos, dependiendo de los requisitos de la aplicación. La eficacia de un filtro para armónicos se evalúa en función de su capacidad para reducir la distorsión armónica total THD de la señal eléctrica, lo que se traduce en una mejora en la calidad de la energía eléctrica suministrada a los equipos y sistemas conectados a la red [39].

2.4.1 Filtros pasivos de potencia

Los filtros pasivos de potencia son dispositivos fundamentales en la corrección del factor de potencia y la mitigación de

armónicos en sistemas eléctricos. Estos filtros se componen de inductores. condensadores y resistencias dispuestas de específica para manera atenuar selectivamente los componentes armónicos no deseados de una señal eléctrica. Estos trabajan como una salida baia de impedancia para armónicos de corriente o voltaje y son sintonizados a una o varias frecuencias específicas, pero puede tener varias desventajas ya que con el transcurrir del tiempo y por su funcionamiento tienden sintonía deteriorando а perder los capacitores provocando una variación de temperatura y el aumento de la frecuencia para el cual fue sintonizado [44].

2.4.2 Filtros activos de potencia FAP

Los filtros activos de potencia son dispositivos electrónicos avanzados utilizados para mejorar la calidad de la energía eléctrica en sistemas de potencia. Estos filtros trabajan de manera dinámica, monitoreando constantemente la señal eléctrica de entrada y generando una señal de salida que cancela los componentes no deseados, como armónicos o desequilibrios de carga. Utilizan tecnologías de conmutación rápida, como los dispositivos semiconductores controlados, para generar corrientes o voltajes de igual magnitud, pero en fase opuesta a las perturbaciones presentes en la red eléctrica. Esto permite eliminar o reducir significativamente las distorsiones y mejorar el factor de potencia, contribuyendo así a un suministro de energía más estable y eficiente [45].

Los filtros activos de potencia se pueden clasificar según su topología en configuraciones genéricas serie y paralelo, según el número de fases pueden ser monofásicos o trifásicos, dependiendo del sistema de conductores. O dependiendo del objetivo de compensación del filtro pueden ser de corriente, de voltaje o híbridos. Las estructuras más empleadas son [46]:

a) FAP paralelo: tiene la capacidad de no solo eliminar armónicos, sino también de ajustar el factor de

potencia, igualar las corrientes de entrada cuando se conectan cargas desiguales y anular la corriente neutra en redes que cuentan con esta configuración. Estos filtros tienen una composición que esta esquematizada en la Figura 4. El enlace de corriente actúa como una conexión que facilita la transferencia de energía entre la red y el convertidor de potencia, siendo la magnitud del rizado de la corriente de invección dependiente de esta variable. Por otro lado, el convertidor es un dispositivo de conmutación que regula el flujo de el potencia entre elemento almacenador de energía del filtro y la red, funcionando de manera similar a un interruptor bidireccional. El controlador es garantizar necesario para la compensación del flujo de potencia [47].



Figura 4. Diagrama de bloque de FAP paralelo.

b) FAP serie: su configuración es sencilla como se observa en la Figura 5. Se usan para filtrar armónicos de corriente, compensar distorsiones de voltaje y otras perturbaciones comunes. Este filtro elimina la incidencia armónica de voltaje causada por la carga, protegiendo de las distorsiones que afectan el rendimiento del generador y la entrega de potencia a la carga. Estos dispositivos introducen una impedancia propia debido al transformador de acoplamiento, lo que aumenta las pérdidas activas en el sistema sometido al FAP serie por lo que es esencial agregar un sistema de control para habilitar la conmutación inteligente del filtro [48].



Figura 5. Diagrama de bloque de FAP serie.

2.5 Estrategias de control de los filtros activos de potencia

Los métodos de control de los filtros activos de potencia se enfocan en desarrollar tácticas de cálculo que permitan obtener procedimientos de compensación, ya sea utilizando estrategias basadas en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo. Los métodos de control tienen como objetivo la obtención de señales adecuadas para la activación de los semiconductores de potencia presentes en los convertidores estáticos, con la finalidad de generar las voltajes o corrientes necesarias para la compensación [49].

Es importante diferenciar entre dos categorías principales de métodos utilizados para controlar los FAP: aquellos que han sido desarrollados en el ámbito de las frecuencias y los que han sido desarrollados en el ámbito de los tiempos.

2.5.1 *Métodos de control de los FAP en el dominio de la frecuencia*

Se basan en la evaluación de las señales que han sido alteradas a través del uso del método de Fourier. A través de la utilización de estos enfoques, se logra separar y distinguir la parte esencial de las diversas partes armónicas, lo cual resulta en la creación de la señal de control necesaria para llevar a cabo la compensación requerida. Es importante que la tasa de muestreo sea mayor que dos veces la frecuencia más alta presente en la señal que se está analizando y, además, es necesario que las frecuencias de las señales presentes sean múltiplos de la frecuencia fundamental. Estos métodos presentan una desventaja en términos de necesitar una considerable potencia de cálculo y de tener una velocidad de respuesta lenta, ya que la señal de control se genera una vez que se ha completado el análisis de la señal periódica [50], [51].

2.5.2 *Métodos de control de los FAP en el dominio del tiempo*

Estas estrategias se fundamentan en adquirir al instante las señales exactas de control necesarias para realizar la compensación requerida. Estos métodos tienen una gran ventaja, ya que responden rápidamente a los cambios en el sistema de potencia, lo que permite asegurar que el control del FAP se lleve a cabo de manera instantánea. Durante todos estos últimos años se han desarrollado métodos en el dominio del tiempo, entre ellos está: la teoría de la potencia reactiva instantánea, la teoría general de la potencia instantánea, y el sistema de referencia síncrono; de los cuales se describirá con detenimiento al Método de Referencia Síncrono destacando sus cualidades para el control de FAP [52].

2.5.3 Métodos de Referencia Síncrono

El método de referencia síncrono es una técnica utilizada en el control de filtros activos de potencia para compensar armónicos y mejorar el factor de potencia en sistemas eléctricos. Este método se basa en la transformación de las variables eléctricas (corriente y voltaje) desde el sistema trifásico de coordenadas abc al sistema de coordenadas rotativas $\alpha\beta$. En este último sistema, el componente α representa la magnitud de la señal en fase con la frecuencia fundamental de la red eléctrica, mientras que el componente β representa la

magnitud de la señal en cuadratura con la frecuencia fundamental [53], [54].

El objetivo del método de referencia síncrono es generar una corriente de referencia en el marco de coordenadas $\alpha\beta$ que siga la forma de onda de la corriente de carga, pero en fase con el voltaje de la red. Esta corriente de referencia se compara con la corriente medida en el mismo marco para obtener el error de seguimiento, que se utiliza para generar las señales de control para el filtro activo. El controlador del filtro activo ajusta la corriente de salida del filtro de manera que cancele los armónicos y mejore el factor de potencia en la red eléctrica [55].

El método de referencia síncrono se basa en las siguientes ecuaciones fundamentales:

$$i_{ref\alpha} = i_{\alpha} \tag{4}$$

$$i_{\beta ref} = i_b \tag{5}$$

Donde $i_{ref\alpha}$ y $i_{\beta ref}$ son los componentes de la corriente de referencia en el marco de coordenadas $\alpha\beta$, i_{α} y i_{b} son los componentes medidas de la corriente en el mismo marco. Estas ecuaciones representan el seguimiento de la corriente en el marco de referencia síncrono, lo que permite generar una corriente de compensación adecuada para el control del filtro activo de potencia [56], [57].

3 Descripción y Modelamiento del Problema

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el nivel de distorsión armónica en una red de distribución debido a la operación de estaciones de carga de vehículos eléctricos; y a la vez, el análisis de la reducción de la distorsión de la red mediante la implementación de un filtro activo de potencia. Para lo cual, se han realizado varias simulaciones empleando el software Digsilent PowerFactory y Matlab Simulink. El modelo planteado considera la inclusión de una carga no lineal (electrolinera) en el sistema IEEE de 30 barras; con lo cual, el modelo quedaría conformado por: Sistema IEEE de 30 barras, electrolinera y Filtro Activo de Potencia, tal como se ilustra en la Figura 6.



Una vez definido el modelo utilizado para cumplir con el propósito del presente trabajo, se procedió a determinar y dimensionar los elementos del sistema, como se describe a continuación.

3.1 Sistema IEEE de 30 barras



En primer lugar, se implementó la simulación del sistema IEEE de 30 barras, con lo cual se obtuvieron los resultados en condiciones iniciales; es decir, sin la electrolinera, ni la implementación del Filtro Activo de Potencia. En ese sentido, en la Tabla 3 se muestran los valores de voltaje en p.u. en cada una de las 30 barras, resultantes del flujo de potencia.

Tabla 3. Voltajes en p.u. del Sistema IEEE de 30 barras en condiciones iniciales

Barra	Voltaje [p.u.]
1	1.06
2	1.04
3	1.02
4	1.01
5	1.01
6	1.01
7	1.00
8	1.01
9	1.05
10	1.04
11	1.08
12	1.05
13	1.07
14	1.04
15	1.03
16	1.04
17	1.04
18	1.02
19	1.02
20	1.03
21	1.03
22	1.03
23	1.02
24	1.02
25	1.01
26	1.00
27	1.02
28	1.00
29	1.00
30	1.00

Luego se considera la inclusión de la carga no lineal (electrolinera) en el nodo 30; en el cual, se analizará el contenido armónico de las ondas de voltaje y corriente.

3.2 Electrolinera

La inclusión de electrolineras en las redes eléctricas de distribución ocasiona distorsiones armónicas en las formas de onda de corriente y de voltaje debido a las características no lineales de los cargadores y convertidores empleados.

Por lo general, las baterías de los vehículos eléctricos o las estaciones de carga, emplean para la carga convertidores DC/DC de tipo buck, boost y buck-boost, los cuales debido a sus características de conmutación, inyectan a la red eléctrica corrientes con componentes armónicas.

El estándar SAE J1772_201001 definido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices, para los cargadores de vehículos eléctricos, establece 3 niveles de carga, los dos primeros en corriente alterna, y el tercero en corriente continua.

El Nivel 1- AC es utilizado en instalaciones domésticas para carga lenta; el Nivel 2 – AC se emplea en aplicaciones de carga semi-rápida; mientras que el Nivel 3 – DC, es utilizado principalmente en electrolineras, ya que proporciona una carga rápida.

Conforme lo mencionado, para determinar el orden de las componentes armónicas de corriente que se inyectarían en la red eléctrica, debido a la operación de las electrolineras, se tomaron como referencia, resultados de pruebas realizadas a vehículos eléctricos de marcas como: ABB. Chevrolet, Ford, Nissan, Mitsubishi, Tesla, entre otras.

En [58]se analiza el impacto de la carga de vehículos eléctricos en los sistemas de distribución: en el cual, entre otros análisis se estudia el contenido armónico provocado por los diferentes niveles de carga de vehículos eléctricos. En el citado trabajo de investigación se concluye que, el contenido armónico varía en función del estado de carga de los vehículos eléctricos y varía en función del tiempo transcurrido durante la carga; también se visualizó que, a mayor vehículos eléctricos en una misma estación de carga, será mayor el contenido armónico inyectado a la red de distribución; y finalmente, para el caso del Nivel 3 de carga, el cual es inherente al actual trabajo,

las componentes armónicas que contribuyen en mayor medida son las de tercer y quinto orden.

Por otro lado, en [59] se presenta el diseño, simulación e implementación de un cargador de baterías para aplicación en vehículos eléctricos. Como resultado de la implementación realizada, se observó un contenido armónico con componentes en el tercer y quinto orden principalmente.

De acuerdo a las referencias antes expuestas; para el efecto de modelar la electrolinera en Matlab Simulink, se consideró una fuente de corriente trifásica modulada con una función sinusoidal a la frecuencia de la red eléctrica, con componentes en el orden del tercer y quinto armónico.

Se considera además de lo mencionado, que la electrolinera contará con una potencia de 1 MW, lo que significa alrededor de 10 cargadores de carga rápida. Con base de lo expuesto, en la Tabla 4 se exponen los parámetros considerados para el diseño de la electrolinera.

Γabla 4. Parámetros de diseño de la	a electrolinera
Potencia Componente	1
Fundamental	MW
Frecuencia	50
Componente Fundamental	Hz
Potencia Componente	0.1
Tercer Armónica	IVI W
Frecuencia Componente Tercer Armónica	150 Hz
Potencia Componente	0.1 MW
Quinta Armónica Frecuencia	250
Componente Quinta Armónica	Hz

Finalmente, en la Figura 8 se muestra el modelo de la electrolinera en Matlab Simulink.



Figura 8. Diagrama de bloques de la electrolinera en Matlab Simulink

3.3 Diseño del Filtro Activo de Potencia

Una vez modelada la red eléctrica y la carga no lineal que es en este caso la electrolinera, se procedió a modelar el Filtro Activo de Potencia en virtud de lo expuesto a continuación.

En el diseño del Filtro Activo de Potencia se consideran dos aspectos fundamentales, los cuales son la determinación y dimensionamiento de los componentes y la implementación de la estrategia de control.

Para la determinación y dimensionamiento de los componentes del Filtro Activo de Potencia, se parte analizando su estructura, y está conformado por un convertidor de fuente de voltaje, un banco de capacitores y una impedancia de conexión a la red eléctrica, tal como se ilustra en la Figura 9.



En función de la estructura del Filtro Activo de Potencia, se empieza determinando el voltaje DC del banco de capacitores que deberá garantizar el cubrimiento de los picos de voltaje ocasionados por la conmutación del convertidor de fuente de voltaje. Dicho voltaje DC fue determinado a partir de la siguiente expresión.

$$V_{DC} = \frac{2}{m} V_{red} \tag{6}$$

Donde:

 V_{DC} = Voltaje DC del banco de capacitores del convertidor.

 V_{red} = Voltaje de la red en el nodo de conexión de la carga y el Filtro Activo de Potencia.

m = índice de modulación.

En virtud de los siguientes valores:

 $V_{red} = 1.00$ [p.u.] tomado del resultado del Flujo de Potencia en condiciones iniciales en la barra 30.

m = 0.85 para evitar que el inversor trabajará en la zona de operación no lineal.

Se obtiene un $V_{DC} = 2.50$ [p.u.].

Para que el Filtro Activo de Potencia sea capaz de inyectar la corriente armónica de compensación a la red eléctrica, se hace necesario la implementación de una impedancia de enlace, la cual permite el intercambio de energía eléctrica. Dicha impedancia de enlace fue determinada con la siguiente ecuación.

$$L_{FAP} = \frac{V_{red} + 0.5 \, V_{DC}}{4 \, f_s} \tag{7}$$

Donde:

 f_s = frecuencia de conmutación del convertidor.

Y con los siguientes valores:

$$V_{red} = 1.00$$
 [p.u.].
 $V_{DC} = 2.50$ [p.u.].

Se obtiene un valor de inductacia de conexión de la red de $L_{FAP} = 1.403-05$ [p.u.].

Como último elemento en el diseño del Filtro Activo de Potencia, se determina el valor del capacitor o banco de capacitores necesario para almacenar y proveer la energía requerida en las conmutaciones del convertidor de fuente de voltaje asociadas con la compensación de las perturbaciones armónicas. Para ello se emplea la siguiente expresión:

$$C_{FAP} = \frac{P_{salida}}{V_{red} \cdot \sqrt{6} \cdot f_{s} \cdot \Delta v}$$
(8)

Donde:

[p.u.].

 C_{FAP} = Capacitor del filtro Activo de Potencia.

 P_{salida} = Potencia de salida del convertidor de fuente de voltaje, debe garantizar cubrir la potencia máxima de la electrolinera. Δv = Rizado máximo permitido.

Entonces, a partir de la ecuación (8), se obtiene un valor del capacitor de 100 e-6

Es importante mencionar que para la determinación de la impedancia de enlace se consideró un rizado máximo permitido del 10% del valor de la corriente nominal, mientras que para el diseño del capacitor se consideró un rizado máximo del 1% del voltaje DC.

En la Tabla 5 se presenta el resumen de los parámetros calculados del Filtro Activo de Potencia.

Tabla 5. Parámetros del diseño del Filtro Activo de
Potencia

1 otonoia	
Voltaje V _{DC}	2.5 [p.u.]
Impedancia de enlace	1.403 e-05
L _{FAP}	[p.u.]
Capacitor	100 e-6
C _{FAP}	[p.u.]

3.4 Diseño del controlador del Filtro Activo de Potencia

Una vez que se han determinado y dimensionado los parámetros del Filtro Activo de Potencia, se procede a definir su estrategia de control.

Para la estrategia se consideró emplear la teoría de la Potencia Reactiva Instantánea, lo que hace necesario calcular los valores instantáneos de las corrientes que circulan por la red eléctrica, estas son: corriente de la red eléctrica, corriente de la carga no lineal (electrolinera) y corriente del Filtro Activo de Potencia.

La estrategia de control se basa en que la corriente instantánea del Filtro Activo de Potencia sea igual al valor de la corriente armónica consumida por la electrolinera, para que de esta manera sea el Filtro Activo quien proporcione esta corriente armónica, y se mitiguen las perturbaciones armónicas ocasionadas en la red eléctrica. Para ello será necesario implementar un controlador que permita que la corriente del Filtro Activo de Potencia siga a una señal de referencia determinada a partir de la corriente armónica consumida por la electrolinera.

Para el propósito mencionado, y por simplicidad de cálculo se considera conveniente, transformar las variables del sistema trifásico a otras variables en un sistema giratorio ortogonal, por lo que se emplean las transformadas de Clarke y Park.

La transformada de Clarke convierte las variables en el dominio del tiempo de un sistema trifásico (a, b, c) a variables de un estacionario ortogonal (α, β) ; sistema mientas que, la transformada de Park convierte las variables del sistema estacionario ortogonal (α, β) a nuevas variables en un sistema giratorio ortogonal (d, q). En ese contexto, las ecuaciones implementadas de las transformadas de Clarke y Park se describen a continuación.

Para la transformada de Clarke:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\alpha,\beta,0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$
(9)

$$[T_{\alpha,\beta,0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$
(10)

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ b \\ c \end{bmatrix}$$
(11)

(12)

Finalmente, se empleó la siguiente formulación:

$$\begin{bmatrix} d\\ q\\ l_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a\\ b\\ c \end{bmatrix}$$
(13)

En la Figura 10 se muestra la transformación de la corriente medida del Filtro Activo de Potencia y de la corriente armónica referencial de la electrolinera llevadas a un sistema giratorio ortogonal a través de las transformadas de Clarke y Park.

El diagrama de bloque implementado considera como parámetros de entrada a las señales descritas en un sistema trifásico y el ángulo de la red eléctrica, el cual fue determinado mediante un lazo de seguimiento de fase PLL. Como salida se dispone de las señales en el sistema estacionario giratorio ortogonal.



Activo de Potencia y de la corriente armónica de referencia de la electrolinera a un sistema giratorio ortogonal

Con la señal a controlar en un nuevo sistema de referencia, se procede a implementar dos lazos de control, uno de corriente y uno de voltaje, a través de controladores PID.

El objetivo de implementar un controlador PID es el de lograr obtener las señales de conmutación necesarias, para que el Filtro Activo de Potencia inyecte el contenido armónico de la electrolinera, para que de esta manera, la red eléctrica solamente inyecte la parte lineal de la carga, y no se generen armónicos en la misma.

Para la sintonización de los respectivos controladores PID, se empleó la herramienta disponible en Matlab Simulink, mediante la cual se obtuvo la información necesaria para ajustar los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa hasta que estas cumplan las características requeridas.

Los valores determinados para los lazos de control de corriente y voltaje, se ilustran en la Tabla 6 y la Tabla 7 respectivamente.

Tabla 6. Parámetros diseñados del controlador PID del lazo de control de corriente

Constante Proporcional (Kp)	-40.8602
Constante Integral (KI)	-0.08
Constante Derivativa (KD)	-5.25

Tabla 7. Parámetros diseñados del controlador PID del lazo de control de voltaje

Constante Proporcional (Kp)	28.4979
Constante Integral (KI)	10.4358
Constante Derivativa (KD)	0

El lazo de control de voltaje tiene como objetivo principal el de mantener el voltaje en el capacitor igual al voltaje de referencia requerido, con lo cual se garantice proveer la energía necesaria para la compensación armónica. El lazo de control de voltaje implementado se ilustra en la Figura 11. Es importante mencionar que para este controlador se utilizó un elemento de saturación, para evitar la degradación de la respuesta debida a la acumulación de la integral del error.



Figura 11. Lazo de control de voltaje implementado

de control de corriente E1 lazo implementado se muestra en la Figura 12, el cual está compuesto por una comparación entre las componentes d,q de la corriente del de filtro activo potencia con las componentes d,q de la corriente de referencia (componente armónica de la electrolinera). Se observa además necesario el desacoplamiento de las componentes d y q mediante la implementación de una ganancia correspondiente a la reactancia de conexión a la red eléctrica.



Figura 12. Lazo de control de corriente implementado

Con las señales de control obtenidas a partir de los lazos de control, se emplea una técnica de modulación PWM para controlar los disparos del inversor del Filtro Activo de Potencia. En esta modulación, se emplean las señales de referencia en componentes dq0 obtenidas en el lazo de control de corriente, se las transforma a componentes abc, las cuales se comparan con una señal portadora triangular. Luego se obtienen los pulsos de modulación para el convertidor de fuente de voltaje del Filtro Activo de Potencia.

Finalmente, en la Figura 13 se ilustra el modelo implementado en Matlab Simulink, con los bloques de los elementos y controles descritos anteriormente. Esto es: Sistema IEEE de 30 barras, carga no lineal (electrolinera), Filtro Activo de Potencia y Bloque de Control del Filtro Activo de Potencia.



Figura 13. Modelo de prueba implementado en Matlab Simulink

3.5 Análisis de Resultados

Para cumplir con el objetivo de evaluar el nivel de distorsión armónica provocada por la implementación de la electrolinera en el sistema de distribución, así como la efectividad en la mitigación de armónicos del Filtro Activo de Potencia diseñado en el apartado anterior, a continuación se muestran las formas de onda y el contenido armónico en los elementos de la red, considerando como se lo mencionó, que la carga no lineal (electrolinera) sería conectada en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras.

Para evaluar el desempeño del Filtro Activo de Potencia diseñado, se simularon 2 escenarios.

En la Tabla 8. Variables empleadas en el diseño del controlador se presenta la descripción de las variables mostradas en el diagrama de bloques, las cuales fueron utilizadas para la implementación del controlador.

Tabla 8. Variables	empleadas	en el	diseño	del	controlador
--------------------	-----------	-------	--------	-----	-------------

Theta	Ángulo de fase de la red eléctrica
IF_abc	Corriente del FAP en componentes a,b,c
I_L_ref	Corriente armónica de la carga utilizada como referencia en componentes a,b,c
IF_d	Corriente del FAP en componente d
IF_q	Corriente del FAP en componente q
I_L_ref_d	Corriente armónica de la carga utilizada como referencia en componente d
I_L_ref_q	Corriente armónica de la carga utilizada como referencia en componente q
XL	Reactancia de enlace a la red eléctrica
Vdc	Voltaje en el capacitor del FAP
Vdc_ref	Voltaje de referencia al que se debe mantener el voltaje del FAP

3.5.1 Escenario 1

El escenario 1 considera que la electrolinera se encuentra operando al 100% de su capacidad, e ingresa al sistema a partir de los 0.2 segundos.

Para evaluar el impacto armónico provocado al conectar la carga no lineal (electrolinera) al Sistema IEEE de 30 barras, así como la mitigación de los armónicos debido a la implementación del Filtro Activo de Potencia, en primer lugar se simuló solamente con la electrolinera conectada a la red, es decir sin la implementación del Filtro, el resultado de la corriente en el nodo 30 del sistema IEEE de 30 barras se ilustra en la Figura 14.



Figura 14. Corriente en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras – Estado sin compensar – Escenario 1

Luego se realizó la simulación con la implementación del Filtro Activo de Potencia. En la Figura 15 se ilustra el desempeño del controlador PID al momento de seguir la corriente de referencia. Como se puede apreciar, el controlador PID implementado muestra una respuesta rápida y precisa.



Figura 15. Corriente de Filtro vs Corriente de Referencia en componentes d,q – Escenario 1

En la Figura 16 se ilustran los resultados con la implementación del Filtro Activo de Potencia. Como se puede observar, a los 0.2 segundos en los que ingresa la electrolinera, el Filtro actúa inyectando la corriente de compensación armónica, mitigando de esta manera los armónicos en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras, observados en la Figura 14.



Figura 16. Corriente en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras, Corriente del Filtro Activo de Potencia, Corriente de la electrolinera – Estado compensado – Escenario 1

Finalmente, en la Tabla 9 se muestra la comparación del nivel de contenido armónico de la corriente del nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras con la electrolinera para el estado sin compensar y el estado compensado mediante el Filtro Activo de Potencia, para el escenario 1.

Tabla 9. Comparación del nivel de contenido armónico de la corriente del nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras con la electrolinera sin compensar y compensado mediante el FAP – Escenario 1

	THD de corriente en el nodo 30 condiciones iniciales	THD de corriente en el nodo 30 con la inclusión de la electrolinera	THD de corriente en el nodo 30 con la inclusión de la electrolinera y el Filtro Activo de Potencia
Fase a	0%	8.95%	2.28%
Fase b	0%	9.29%	2.38%
Fase c	0%	8.90%	2.03%

3.5.2 Escenario 2

En el escenario 2 se tomaron en cuenta las mismas consideraciones que en el escenario 1, con la diferencia de que la electrolinera opera al 50% de su capacidad nominal.

La corriente en el nodo 30 del sistema IEEE de 30 barras en el estado sin compensar, se muestra en la Figura 17. Se observa que a partir de los 0.2 segundos en los que entra en operación la electrolinera, se introducen componentes armónicas en la red eléctrica.



Figura 17. Corriente en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras – Estado sin compensar – Escenario 2

Por otro lado, el desempeño del controlador PID, se ilustra en la Figura 18. Al igual que en el escenario 1, se observa una respuesta rápida y precisa al seguir las referencias.



Figura 18. Corriente de Filtro vs Corriente de Referencia en componentes d,q – Escenario 2

En la Figura 19 se muestra el resultado de la implementación del Filtro Activo de Potencia para este escenario. Como se puede observar, se produce una mitigación del contenido armónico en la red eléctrica, debido a la inyección de corriente armónica de compensación por parte del Filtro.



Figura 19. Corriente en el nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras, Corriente del Filtro Activo de Potencia, Corriente de la electrolinera – Estado compensado – Escenario 2

De igual manera, en la Tabla 10 se muestra la comparación del nivel de contenido armónico de la corriente del nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras con la electrolinera para el estado sin compensar y el estado compensado mediante el Filtro Activo de Potencia, para el escenario 2.

Tabla 10. Comparación del nivel de contenido armónico de la corriente del nodo 30 del Sistema IEEE de 30 barras con la electrolinera sin compensar y compensado mediante el FAP – Escenario 2

	THD de corriente en el nodo 30 condiciones iniciales	THD de corriente en el nodo 30 con la inclusión de la electrolinera	THD de corriente en el nodo 30 con la inclusión de la electrolinera y el Filtro Activo de Potencia
Fase a	0%	6.34%	1.49%
Fase b	0%	7.13%	2.05%
Fase c	0%	5.01%	1.03%

4 Conclusiones

De los resultados obtenidos, se concluye que la implementación de una electrolinera en los sistemas de distribución, para este caso el sistema IEEE de 30 barras, provoca una importante afectación debida a la inyección de componentes armónicos, pasando de un contenido armónico en la onda de corriente THDi del 0% a un valor alrededor del 9% para las fases a, b y c, siendo el mayor valor de contenido armónico en el escenario de plena carga de la electrolinera.

Por otra parte, el diseño e implementación del Filtro Activo de Potencia fue logrado con éxito, ya que se observa una reducción del contenido armónico total de la onda de corriente THDi del 8.95% al 2.28% para la fase a; del 9.29% al 2.38% para la fase b y del 8.90% al 2.03% para la fase c en el escenario 1; y una reducción del 6.34% al 1.49% para la fase a; del 7.13% al 2.05% para la fase b y del 5.01% al 1.03% para la fase c en el 2. El contenido armónico escenario obtenido con la implementación del Filtro Activo de Potencia es menor en todas las fases a los establecidos en la normativa IEEE 519-2014, cumpliendo con el objetivo de este trabajo.

Se concluye a su vez que con la estrategia de control implementada se tiene excelentes resultados, ya que las variables de control presentan una respuesta dinámica rápida y sin mayores oscilaciones.

4.1 Trabajos futuros

En función de lo mencionado anteriormente, se sugiere llevar a cabo futuras investigaciones enfocadas en examinar los temas que se detallan a continuación:

- Impacto de los vehículos eléctricos en los índices de calidad de la energía en redes de distribución.
- Simulación y análisis de armónicos en redes de distribución con integración de estaciones de carga de vehículos eléctricos y de generación distribuida.
- Evaluación de la normativa IEEE 519-2014 en el contexto de redes de distribución con alta penetración de vehículos eléctricos y de energías renovables para autoabastecimiento.

5 Referencias

[1] M. Chang and S. Bae, "Impact of Electric Vehicle Charging Demand on a Jeju Island Radial Distribution Network," pp. 1–5, 2019.

- [2] L. Zhang *et al.*, "Hybrid electrochemical energy storage systems: An overview for smart grid and electrified vehicle applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, p. 110581, 2021.
- [3] Y. Son and J. Ha, "The Electric Variable Transmission without Slip Ring for the Hybrid Electric Vehicle Driving Structure," 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), pp. 857–862, 2015.
- [4] M. Bajaj and A. K. Singh, "Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 97, no. December 2020, p. 107646, 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107646.
- [5] R. N. Beres, X. Wang, F. Blaabjerg, M. Liserre, and C. L. Bak, "Optimal design of high-order passive-damped filters for grid-connected applications," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 3, pp. 2083–2098, 2015.
- [6] S. Luo, W. Wu, E. Koutroulis, H. S.-H. Chung, and F. Blaabjerg, "A new Kalman-filter-based harmonic current suppression method for the virtual oscillator controlled grid-tied inverter," *IEEE J Emerg Sel Top Circuits Syst*, vol. 12, no. 1, pp. 251–259, 2022.
- [7] K. Gharani Khajeh, D. Solatialkaran, F. Zare, and N. Mithulananthan, "An enhanced full-feedforward strategy to mitigate output current harmonics in grid-tied inverters," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 15, no. 5, pp. 827–835, 2021.
- [8] M. Pham and H. Lee, "Coordinated virtual resistance and capacitance control scheme for accurate reactive power sharing and selective harmonic compensation in islanded microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 22, pp. 5104– 5113, 2020.
- [9] B. Liu, Z. Liu, J. Liu, R. An, H. Zheng, and Y. Shi, "An adaptive virtual

impedance control scheme based on small-AC-signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 12, pp. 12333–12355, 2019.

- [10] T. Wang, H. Nian, Z. Q. Zhu, L. Ding, and B. Zhou, "Flexible compensation strategy for voltage source converter under unbalanced and harmonic condition based on a hybrid virtual impedance method," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 33, no. 9, pp. 7656–7673, 2017.
- [11] P. Sreekumar and V. Khadkikar, "A new virtual harmonic impedance scheme for harmonic power sharing in an islanded microgrid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 936– 945, 2015.
- [12] Y. Wang, X. Wang, S. Li, X. Ma, Y. Chen, and S. Liu, "Optimization model for harmonic mitigation based on PV-ESS collaboration in small distribution systems," *Appl Energy*, vol. 356, p. 122410, 2024.
- [13] S. Devassy and B. Singh, "Implementation of solar photovoltaic system with universal active filtering capability," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 55, no. 4, pp. 3926–3934, 2019.
- [14] X. Liang and C. Andalib-Bin-Karim, "Harmonics and mitigation techniques through advanced control in gridconnected renewable energy sources: A review," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 4, pp. 3100–3111, 2018.
- [15] E. Uz-Logoglu, O. Salor, and M. Ermis, "Online characterization of interharmonics and harmonics of AC electric arc furnaces by multiple synchronous reference frame analysis," in 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE, 2015, pp. 1–11.
- [16] B. Basta and W. G. Morsi, "Low and high order harmonic distortion in the presence of fast charging stations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 126, p. 106557, 2021.
- [17] C. Masetti, "Revision of European Standard EN 50160 on power quality:

Reasons and solutions," *ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2010.

- [18] C. Sankaran, *Power quality*. CRC press, 2017.
- [19] D. Sánchez Guerrero, "Métodos de medida para fenómenos de calidad de la energía según el estándar IEC 61000-4-30.," 2021.
- [20] L. Marrero, L. García-Santander, L. Hernandez-Callejo, P. Bañuelos-Sánchez, and V. J. González, "Harmonic distortion characterization in groups of distribution networks applying the IEEE Standard 519-2014," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 4, pp. 526–533, 2021.
- [21] F. G. Montoya, A. García-Cruz, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Power quality techniques research worldwide: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 846–856, Feb. 2016.
- [22] M. Kaspirek, L. Mikulas, D. Mezera, K. Prochazka, P. Santarius, and P. Krejci, "Analysis of voltage quality parameters in MV distribution grid," *CIRED - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 517–521, Oct. 2017.
- [23] R. Langella, A. Testa, and E. Alii, "IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems," in *IEEE recommended practice*, IEEE, 2014.
- [24] P. B. Borase, "Energy Management System For Microgrid With Power Quality Improvement," 2017.
- [25] W. Zhou, Y. Wu, X. Huang, R. Lu, and H. T. Zhang, "A group sparse Bayesian learning algorithm for harmonic state estimation in power systems," *Appl Energy*, vol. 306, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118063.
- [26] T. Antić, L. Thurner, T. Capuder, and I. Pavić, "Modeling and open source implementation of balanced and unbalanced harmonic analysis in radial distribution networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 107935, 2022.
- [27] X. Xiao, Z. Li, Y. Wang, and Y. Zhou, "A practical approach to estimate harmonic distortions in residential

distribution system," *IEEE Transactions* on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1418–1427, 2020.

- [28] M. Amini, A. Jalilian, and M. R. P. Behbahani, "A new method for evaluation of harmonic distortion in reconfiguration of distribution network," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 6, p. e12370, 2020.
- [29] R. Ortega, E. Figueres, G. Garcerá, C. L. Trujillo, and D. Velasco, "Control techniques for reduction of the total harmonic distortion in voltage applied to a single-phase inverter with nonlinear loads: Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1754–1761, Apr. 2012.
- [30] D. Li, T. Wang, W. Pan, X. Ding, and J. Gong, "A comprehensive review of improving power quality using active power filters," *Electric Power Systems Research*, vol. 199, p. 107389, 2021.
- [31] A. M. Lulhe and T. Date, "A Technology Review Paper for Drives used in Electrical Vehicle (EV) & Hybrid Electrical Vehicles (HEV)," pp. 632–636, 2015.
- [32] Y. Ma, T. Houghton, A. Cruden, and D. Infield, "Modeling the Benefits of Vehicle-to-Grid Technology to a Power System," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 1012–1020, 2012.
- [33] E. Price, "Smart Charging of Electric Vehicles According Electricity Price," 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE), no. February 2019, pp. 432–437, 2020.
- [34] Y. Chen, A. Oudalov, and J. S. Wang, "Integration of Electric Vehicle Charging System into Distribution Network," 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, pp. 593–598, 2020.
- [35] C. Jin, J. Tang, and P. Ghosh, "Optimizing Electric Vehicle Charging: A Customer's Perspective," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 62, no. 7, pp. 2919–2927, 2013.
- [36] T. Pollok, T. Dederichs, T. Smolka, T. Theisen, B. Schowe-Von Der Brelie,

and A. Schnettler, "Technical assessment of dispersed electric vehicles in medium voltage distribution networks," *IET Conference Publications*, no. 550 CP, pp. 8–11, 2009, doi: 10.1049/cp.2009.1051.

- [37] C. Liu, K. Chau, D. Wu, and S. Gao, "Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2409–2427, 2013.
- [38] A. Deilami, P. Masoum, P. Moses, M. Masoun, and A. Abu-Siada, "Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, no. February, pp. 877–888, 2011.
- [39] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, and G. A. J. Amaratunga, "Minimizing harmonic distortion in power system with optimal design of hybrid active power filter using differential evolution," *Appl Soft Comput*, vol. 61, pp. 486–496, Dec. 2017.
- [40] E. Marcelo. Garcia Torres, B. D. Benalcazar Lopez, and I. M. Idi Amin, "Analysis of the Voltage Profile by the Insertion of Electric Vehicles in the Distribution Network Considering Demand," 2017 Response to International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS), pp. 7–13, 2017, doi: 10.1109/INCISCOS.2017.26.
- [41] H. S. Salama, S. M. Said, I. Vokony, and B. Hartmann, "Impact of Different Plugin Electric Vehicle Categories on Distribution Systems," 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), pp. 109–113, 2019.
- [42] H. Wu, S. Li, and Y. Ren, "Reliability Modeling of Electric Vehicles and Its Impact on Distribution Network," 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 229–234, 2018.
- [43] A. Dubey and S. Santoso, "Electric Vehicle Charging on Residential

Distribution Systems : Impacts and Mitigations," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1871–1893, 2015.

- [44] H. M. J. De Silva and M. Shafieipour, "An improved passivity enforcement algorithm for transmission line models using passive filters," *Electric Power Systems Research*, vol. 196, no. February, p. 107255, 2021.
- [45] H. Akagi, H. Fujita, K. Wada, A. P. Distribution, and L. Simulator, "A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of a Radial Power Distribution Line," pp. 1393–1399, 1998.
- [46] B. Kedra, "Comparison of an active and hybrid power filter devices," in Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, IEEE Computer Society, 2014, pp. 556–560.
- [47] A. Bouhouta, S. Moulahoum, N. Kabache, and A. Benyamina, "Design and Real Time Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique," in 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering, ICAEE 2019, 2019.
- [48] S. Buso, L. Malesani, and P. Mattavelli, "Comparison of current control techniques for active filter applications," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 722–729, 1998.
- [49] M. Marcu, F. G. Popescu, T. Niculescu, L. Pana, and A. D. Handra, "Simulation of power active filter using instantaneous reactive power theory," in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, IEEE Computer Society, 2014, pp. 581–585.
- [50] 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 & Energy Systems*, vol. 57, pp. 39–48, 2014.
- [51] P. Chevrel, M. Machmoum, and R. Le Doeuff, "Comparison of Control Methods for the Single-Phase Active Power Filter," *IFAC Proceedings*

Volumes, vol. 30, no. 6, pp. 1141–1147, 1997.

- [52] D. Li, T. Wang, W. Pan, X. Ding, and J. Gong, "A comprehensive review of improving power quality using active power filters," *Electric Power Systems Research*, vol. 199, p. 107389, 2021.
- [53] S. D. Swain and P. K. Ray, "Harmonic current and voltage compensation using HSAPF based on hybrid control approach for synchronous reference frame method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 83–90, 2016.
- [54] M. C. Benhabib and S. Saadate, "New control approach for four-wire active power filter based on the use of synchronous reference frame," *Electric Power Systems Research*, vol. 73, no. 3, pp. 353–362, 2005.
- [55] 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, 2023.
- [56] E. Sundaram and M. Venugopal, "On design and implementation of three phase three level shunt active power filter for harmonic reduction using synchronous reference frame theory," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 40–47, 2016.
- [57] N. Madhuri and M. Surya Kalavathi, "Fault-tolerant shunt active power filter with synchronous reference frame control and self-tuning filter," *Measurement: Sensors*, p. 101156, 2024.
- [58] R. B. Bass and N. Zimmerman, "Impacts of electric vehicle charging on electric power distribution systems," 2013.
- [59] C. C. Paipa, J. C. Ramirez, C. L. Trujillo, J. A. Alarcón, and A. A. Jaramillo, "Diseño de cargador de baterías con baja distorsión armónica de corriente para aplicación en vehículos eléctricos," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 28, no. 4, pp. 706–717, 2020.

5.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 11: Matriz de estado del arte.

D	DISENO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACION DE PERTURBACIONES ARMONICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO																							
		DATOS			TE	CMÁTI	CA		F	ORMUI PRC	LACION D BLEMA	EL	J	RESTRICC PROE	TIONES D BLEMA	EL	ALG	ORITMO DE	RESOL	UCIÓN		SOLUCI PROPUE	ÓN STA	
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas de distribución	Armónicos	Estaciones de carga	Filtros activos	Calidad de energía	Determinación de la red eléctrica	Ubicación de estaciones de carga	Valorización de los armónicos	Diseño de Filtros Activos	Cantidad de estaciones de carga	Tipo de red eléctrica modelada	Segmentación por tipo de armónico	Restricciones de normativa IEEE 519- 2014	Determinación de la red eléctrica y sus	Cuantificación del tipo de armónicos	Aplicación de la norma IEEE 519-2014	Diseño de filtros activos	Aplicación del filtro activos	Valoración de armónicos	Evaluación de calidad	Beneficio para la operación de la red
1	2019	Impact of Electric Vehicle Charging Demand on a Jeju Island Radial Distribution Network	14				×			₩			₩							*		æ		
2	2021	Hybrid electrochemical energy storage systems: An overview for smart grid and electrified vehicle applications	143	×																	æ		æ	
3	2015	The Electric Variable Transmission without Slip Ring for the Hybrid Electric Vehicle Driving Structure	10		₩	×			₩										₩			₩		₩
4	2022	Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems	29	₩			æ																	
	2015	Optimal design of high-order passive-damped filters for	200								×													×
5	2015	grid-connected applications	290																					
5	2013	grid-connected applications A new Kalman-filter-based harmonic current suppression method for the virtual oscillator controlled grid-tied inverter	8		*													¥			*			
5 6 7	2015 2022 2021	grid-connected applications A new Kalman-filter-based harmonic current suppression method for the virtual oscillator controlled grid-tied inverter An enhanced full-feedforward strategy to mitigate output current harmonics in grid-tied inverters	8 6		*					₩								*			×			
5 6 7 8	2013 2022 2021 2020	rid-connected applications A new Kalman-filter-based harmonic current suppression method for the virtual oscillator controlled grid-tied inverter An enhanced full-feedforward strategy to mitigate output current harmonics in grid-tied inverters Coordinated virtual resistance and capacitance control scheme for accurate reactive power sharing and selective harmonic compensation in islanded microgrid	290 8 6 7							¥					□ ₩			*			*			

-----_____

D	DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO																							
		DATOS			TI	EMÁTI	CA		F	ORMUI PRO	LACION D BLEMA	EL	I	RESTRICC PROF	CIONES D BLEMA	EL	ALG	ORITMO DE	RESOL	UCIÓN		SOLUCI PROPUE	IÓN STA	
ITEM	ODJUNY OUDULY OUDULY <td< th=""><th>CITAS</th><th>Sistemas de distribución</th><th>Armónicos</th><th>Estaciones de carga</th><th>Filtros activos</th><th>Calidad de energía</th><th>Determinación de la red electrica</th><th>Ubicación de estaciones de carga</th><th>Valorización de los armónicos</th><th>Diseño de Filtros Activos</th><th>Cantidad de estaciones de carga</th><th>Tipo de red eléctrica modelada</th><th>Segmentación por tipo de armónico</th><th>Restricciones de normativa IEEE 519- 2014</th><th>Determinación de la red eléctrica y sus</th><th>Cuantificación del tipo de armonicos</th><th>Aplicación de la norma IEEE 519-2014</th><th>Diseño de filtros activos</th><th>Aplicación del filtro activos</th><th>Valoración de armónicos</th><th>Evaluación de calidad</th><th>Beneficio para la operación de la red</th></td<>		CITAS	Sistemas de distribución	Armónicos	Estaciones de carga	Filtros activos	Calidad de energía	Determinación de la red electrica	Ubicación de estaciones de carga	Valorización de los armónicos	Diseño de Filtros Activos	Cantidad de estaciones de carga	Tipo de red eléctrica modelada	Segmentación por tipo de armónico	Restricciones de normativa IEEE 519- 2014	Determinación de la red eléctrica y sus	Cuantificación del tipo de armonicos	Aplicación de la norma IEEE 519-2014	Diseño de filtros activos	Aplicación del filtro activos	Valoración de armónicos	Evaluación de calidad	Beneficio para la operación de la red
10	2017	Flexible compensation strategy for voltage source converter under unbalanced and harmonic condition based on a hybrid virtual impedance method	59											¥						₩				
11	2016	A new virtual harmonic impedance scheme for harmonic power sharing in an islanded microgrid	3		æ	*										×								
12	2024	Optimization model for harmonic mitigation based on PV-ESS collaboration in small distribution systems	3		¥		æ																×	
13	2019	Implementation of solar photovoltaic system with universal active filtering capability	52	æ					æ			囹												
14	2018	Harmonics and mitigation techniques through advanced control in grid-connected renewable energy sources: A review	219		æ		æ									₩			æ		¥			æ
15	2015	Online characterization of interharmonics and harmonics of AC electric arc furnaces by multiple synchronous reference frame analysis	69	æ					¥			æ												
16	2021	Low and high order harmonic distortion in the presence of fast charging stations	27		¥						¥													
17	2010	Revision of European Standard EN 50160 on power quality: Reasons and solutions	102												×									
18	2017	Power quality. CRC press	878						₩							æ		¥						
19	2021	Métodos de medida para fenómenos de calidad de la energía según el estándar IEC 61000-4-30	0		æ			₩		Ŧ										₩	¥			
20	2021	Harmonic distortion characterization in groups of distribution networks applying the IEEE Standard 519- 2014	15				₩									*			æ					₩
21	2016	Power quality techniques research worldwide: A review	80					æ														æ		

D	DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO																							
		DATOS			TE	MÁTI	CA		F	ORMUI PRO	LACION D DBLEMA	EL]	RESTRICC PROE	CIONES D BLEMA	EL	ALG	ORITMO DE	RESOL	UCIÓN		SOLUCI PROPUE	ÓN STA	
ITEM	AÑO	7 Analysis of voltage quality parameters in MV distribution grid		Sistemas de distribución	Armónicos	Estaciones de carga	Filtros activos	Calidad de energía	Determinación de la red eléctrica	Ubicación de estaciones de carga	Valorización de los armónicos	Diseño de Filtros Activos	Cantidad de estaciones de carga	Tipo de red eléctrica modelada	Segmentación por tipo de armónico	Restricciones de normativa IEEE 519- 2014	Determinación de la red eléctrica y sus	Cuantificación del tipo de armónicos	Aplicación de la norma IEEE 519-2014	Diseño de filtros activos	Aplicación del filtro activos	Valoración de armónicos	Evaluación de calidad	Beneficio para la operación de la red
22	2017	Analysis of voltage quality parameters in MV distribution grid	4					æ				¥	æ							¥				
23	1989	"IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems	531		₩				æ									困						
24	2017	Energy Management System For Microgrid With Power Quality Improvement	32	æ	₩			æ									₩				×	Æ		
25	2022	A group sparse Bayesian learning algorithm for harmonic state estimation in power systems	11								¥								æ	æ				æ
26	2022	Modeling and open source implementation of balanced and unbalanced harmonic analysis in radial distribution networks	15								æ							R						
27	2020	A practical approach to estimate harmonic distortions in residential distribution system	24		¥													¥						
28	2020	A new method for evaluation of harmonic distortion in reconfiguration of distribution networ	24						Æ										*					₩
29	2021	Control techniques for reduction of the total harmonic distortion in voltage applied to a single-phase inverter with nonlinear loads: Review	48																		×	¥		
30	2021	A comprehensive review of improving power quality using active power filters	143				₩																	
31	2015	A Technology Review Paper for Drives used in Electrical Vehicle (EV) & Hybrid Electrical Vehicles (HEV)	151			¥					₩				×					æ				
32	2021	Modeling the Benefits of Vehicle-to-Grid Technology to a Power System	334			*											*						₩	
33	2019	Smart Charging of Electric Vehicles According Electricity Price	101			×			æ															

DIS	DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO																							
		DATOS			TF	EMÁTI	CA		F	ORMUI PRO	LACION D BLEMA	EL	1	RESTRICC PROF	CIONES D BLEMA	EL	ALGO	DRITMO DE F	RESOLU	CIÓN		SOLUCI PROPUE	ÓN STA	
ITEM	ODDIAN ODDIAN 2022 Integration of Electric Vehicle Charging System into Distribution Network 2012 Optimizing Electric Vehicle Charging : A Customer 's Perspective		CITAS	Sistemas de distribución	Armónicos	Estaciones de carga	Filtros activos	Calidad de energía	Determinación de la red eléctrica	Ubicación de estaciones de carga	Valorización de los armónicos	Diseño de Filtros Activos	Cantidad de estaciones de carga	Tipo de red eléctrica modelada	Segmentación por tipo de armónico	Restricciones de normativa IEEE 519- 2014	Determinación de la red eléctrica y sus parámetros	Cuantificación del tipo de armónicos	Aplicación de la norma IEEE 519-2014	Diseño de filtros activos	Aplicación del filtro activos	Valoración de armónicos	Evaluación de calidad	Beneficio para la operación de la red
34	2022	Integration of Electric Vehicle Charging System into Distribution Network	46			æ		*															æ	
35	2012	Optimizing Electric Vehicle Charging: A Customer 's Perspective	297			₩		₩				¥												
36	2023	Technical assessment of dispersed electric vehicles in medium voltage distribution networks	297	×						₩					₩	×			₩			æ		
37	2016	Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies,	7			æ	æ			₩							₩							₩
38	2017	Minimizing harmonic distortion in power system with optimal design of hybrid active power filter using differential evolution	519				₩															Ð		
39	2017	Analysis of the Voltage Profile by the Insertion of Electric Vehicles in the Distribution Network Considering Response to Demand	31			₩																		
40	2019	Impact of Different Plug-in Electric Vehicle Categories on Distribution Systems	20					æ						æ									₩	
41	2018	Reliability Modeling of Electric Vehicles and Its Impact on Distribution Network	7						æ					æ				æ	¥		¥	æ		
42	2015	Electric Vehicle Charging on Residential Distribution Systems : Impacts and Mitigations	464	×				æ															×	
43	2021	An improved passivity enforcement algorithm for transmission line models using passive filters	6		æ										₩						æ			
44	2019	Design and Real Time Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique	9							₩	₩							¥						
45	2014	Simulation of power active filter using instantaneous reactive power theory	46				æ	₩			₩	æ			æ								₩	₩
46	2021	A comprehensive review of improving power quality using active power filters	143		æ		₩											¥			æ			

E	DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS INYECTADAS POR ELECTROLINERAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN USANDO EL MÉTODO DE REFERENCIA SÍNCRONO																							
		DATOS			TE	MÁTI	CA		F	ORMU PRC	LACION D DBLEMA	EL	1	RESTRICC PROI	CIONES D BLEMA	EL	ALG	ORITMO DE I	RESOLU	CIÓN		SOLUCI PROPUE	ÓN STA	
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas de distribución	Armónicos	Estaciones de carga	Filtros activos	Calidad de energía	Determinación de la red eléctrica	Ubicación de estaciones de carga	Valorización de los armónicos	Diseño de Filtros Activos	Cantidad de estaciones de carga	Tipo de red eléctrica modelada	Segmentación por tipo de armónico	Restricciones de normativa IEEE 519- 2014	Determinación de la red eléctrica y sus parámetros	Cuantificación del tipo de armónicos	Aplicación de la norma IEEE 519-2014	Diseño de filtros activos	Aplicación del filtro activos	Valoración de armónicos	Evaluación de calidad	Beneficio para la operación de la red
47	2016	Harmonic current and voltage compensation using HSAPF based on hybrid control approach for synchronous reference frame method	19			¥									*			æ			æ			₩
48	2015	New control approach for four-wire active power filter based on the use of synchronous reference frame	27					¥																
49	2023	Power quality and stability improvement of microgrid through shunt active filter control application: An overview	22				₩				桵													
50	2016	On design and implementation of three phase three level shunt active power filter for harmonic reduction using synchronous reference frame theory	68	×						æ											¥	¥		₩
51	2024	Fault-tolerant shunt active power filter with synchronous reference frame control and self-tuning filter	0	₩				₩															₩	
52	2016	Impacts of electric vehicle charging on electric power distribution systems	60																			₩		₩
53 2020 Diseño de cargador de baterías con baja distorsión en vehículos 2														æ										
		CANTIDAD:		12	14	11	11	11	8	7	9	5	2	3	7	7	3	9	7	7	12	10	9	13



5.2 Resumen de Indicadores

Figura 20. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.





Figura 22. Indicador de solución - Estado del arte.

6 Anexos

Datos de Líneas											
N°	Bus	Bus	R	X							
Línea	inicial	final	[ohm]	[ohm]							
1	1	2	0.0922	0.0477							
2	2	3	0.4930	0.2511							
3	3	4	0.3660	0.1864							
4	4	5	0.3811	0.1941							
5	5	6	0.8190	0.7070							
6	6	7	0.1872	0.6188							
7	7	8	1.7114	1.2351							
8	8	9	1.0300	0.7400							
9	9	10	1.0400	0.7400							
10	10	11	0.1966	0.0650							
11	11	12	0.3744	0.1238							
12	12	13	1.4680	1.1550							
13	13	14	0.5416	0.7129							
14	14	15	0.5910	0.5260							
15	15	16	0.7463	0.5450							
16	16	17	1.2890	1.7210							
17	17	18	0.7320	0.5740							
18	2	19	0.1640	0.1565							
19	19	20	1.5042	1.3554							
20	20	21	0.4095	0.4784							
21	21	22	0.7089	0.9373							
22	3	23	0.4512	0.3083							
23	23	24	0.8980	0.7091							
24	24	25	0.8960	0.7011							
25	6	26	0.2030	0.1034							
26	26	27	0.2842	0.1447							
27	27	28	1.0590	0.9337							
28	28	29	0.8042	0.7006							
29	29	30	0.5075	0.2585							
30	30	31	0.9744	0.9630							
31	31	32	0.3105	0.3619							
32	32	33	0.3410	0.5302							
33	8	21	2.0000	2.0000							
34	9	15	2.0000	2.0000							
35	12	22	2.0000	2.0000							
36	18	33	0.5000	0.5000							
37	25	2.9	0.5000	0.5000							

Tabla 12. Datos de líneas del sistema IEEE de 33
barras.

Datos de Cargas						
N° Barra	P [kW]	Q [kvar]				
1	0	0				
2	100	60				
3	90	40				
4	120	80				
5	60	30				
6	60	20				
7	20	100				
8	20	100				
9	60	20				
10	60	20				
11	45	30				
12	60	35				
13	60	35				
14	120	80				
15	60	10				
16	60	20				
17	60	20				
18	90	40				
19	90	40				
20	90	40				
21	90	40				
22	90	40				
23	90	50				
24	420	200				
25	420	200				
26	60	25				
27	60	25				
28	60	20				
29	120	70				
30	200	600				
31	150	70				
32	210	100				
33	60	40				

Tabla	13.	Datos	de	cargas	del	sistema	IEEE	de	33
				barra	ıs.				