

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA DE ELECTRICIDAD

REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN INVERSOR DE FUENTE Z MEJORADO BASADO EN TRANSFORMADOR CON ALTO IMPULSO Y CONTROL ENTRELAZADO

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

AUTOR: FABRICIO ANDRÉS CALAPIÑA TITUAÑA

TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONJE

Quito -Ecuador 2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fabricio Andrés Calapiña Tituaña con documento de identificación N° 0550168355 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, 11 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Fabricio Andrés Calapiña Tituaña 0550168355 CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE

TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Fabricio Andrés Calapiña Tituaña, con documento de identificación Nº 0550168355,

expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica

Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo

Académico: "Reducción de la distorsión armónica mediante la operación de un inversor de

fuente Z mejorado basado en transformador con alto impulso y control entrelazado", 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, 11 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Fabricio Andrés Calapiña Tituaña

0550168355

III

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación N° 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN INVERSOR DE FUENTE Z MEJORADO BASADO EN TRANSFORMADOR CON ALTO IMPULSO Y CONTROL ENTRELAZADO, realizado por Fabricio Andrés Calapiña Tituaña con documento de identificación N° 0550168355, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Articulo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc.

1714298005

ÍNDICE GENERAL

L	Inti	rodu	cción	2
2	Ma	ırco t	eórico	3
	2.1	Sist	emas Eléctricos de Distribución	3
	2.1	.1	Red de distribución tipo radial	3
	2.1	.2	Red de distribución tipo anillo	4
	2.1	.3	Red de distribución tipo mallado	4
	2.2	Dis	torsión Armónica en Distribución	4
	2.2	.1	Fuentes de armónicos	4
	2.2	.2	Efectos que causan los armónicos.	5
	2.3	Per	fil de Voltaje en Distribución	5
	2.3	.1	El perfil de voltaje y sus límites en una red eléctrica.	5
	2.3	.2	Causas del desbalance del perfil de voltaje	5
	2.4	Ger	neración distribuida fotovoltaica	6
	2.4	.1	Cálculo de potencia del panel del sistema fotovoltaico	6
	2.5	Cor	ntrol entrelazado en distribución	6
	2.5	.1	Táctica de control entrelazado para inversores.	7
	2.6	Inv	ersor fuente tipo Z	7
	2.6	.1	Topología del inversor de fuente Z tradicional.	7
	2.6	.2	Principio de operación	7
	2.6	.3	Inversor de fuente tipo Z mejorado	8
	2.6	.4	Características del inversor tipo fuente Z mejorado	8
3	Me	etodo	logía	8
	3.1	For	mulación del problema	8
	3.2	Ger	neración Fotovoltaica	10
	3.3	Imp	plementación de dos transformadores al inversor fuente tipo Z clásico	11
	3.3	.1	Principio de operación del inversor de fuente tipo Z mejorado	11
	3.3	.2	Conexión en paralelo de inversores o control entrelazado	11
	3.4	Cas	o de estudio	12
1	An	álisis	s de resultados	13
	4.1	Ana	álisis del sistema IEEE base	13
	4.2	Sist	ema IEEE base con inclusión de cargas no lineales	14
	4.3	Sist	ema IEEE base más inversor fuente tipo Z	15
	4.4	Sist	ema IEEE con inclusión de cargas no lineales más inversor fuente tipo Z	18
Ξ	Co	nelu	ziones	20

	5.1	Trabajos futuros	20
6	Ref	erencias	20
		Matriz de Estado del Arte	
	6.2	Resumen de Indicadores	27
		exos	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación, transmisión y distribución de un SEP	3
Figura 2. Red de distribución tipo radial	
Figura 3. Sistema de distribución tipo anillo	
Figura 4. Red de distribución tipo mallado.	
Figura 5. Diagrama unifilar de cargas lineales y no lineales existentes en una industria	
Figura 6 Estructura de un sistema de generación fotovoltaica	
Figura 7. Topología de control entrelazado para inversores	
Figura 8. Inversor fuente tipo Z.	
Figura 9 Diagrama unifilar de un sistema de 34 barras establecido por la IEEE	9
Figura 10 Control entrelazado de Inversores	. 12
Figura 11 Sistema IEEE de 34 barras con cargas lineales extra y Generación fotovoltaica	
Figura 12 Perfil de voltaje del sistema IEEE 34.	
Figura 13 Valores máximos, mínimos del sistema	. 13
Figura 14 THD del sistema IEEE 34	
Figura 15 Valores máximos, mínimos y Medios de los armónicos del IEEE 34	. 14
Figura 16 Perfil de voltaje IEEE base VS IEEE más cargas	. 14
Figura 17 Perfil de voltaje base VS Perfil de voltaje con cargas	
Figura 18 Incremento del THD a causa del aumento de cargas conectadas en la barra 27	. 15
Figura 19 Resultado del THD al incrementar cargas	
Figura 20 Análisis gráfico de los THD entre IEEE Base y IEEE más SZI	. 16
Figura 21 Valores Máximos, mínimos y medios de los datos obtenidos en el IEEE 34	. 16
Figura 22 análisis de resultados de armónicos totales en el sistema que contiene SZI	
Figura 23 Comparación del perfil de voltaje entre el IEEE base vs IEEE más SZI	
Figura 24 Análisis del perfil de voltaje al implementar un SZI al sistema de 34 barras	
Figura 25 Resultados del perfil de voltaje entre el sistema IEEE base vs IEEE más SZI	
Figura 26 análisis de resultados de IEEE más cargas vs IEEE más SZI y cargas	
Figura 27 Resultados de los sistemas IEEE más cargas vs IEEE más cargas y SZI	
Figura 28 Gráfica de los datos de THD obtenidos para el sistema IEEE más cargas	
Figura 29 Gráfica de los datos de THD obtenidos para el sistema IEEE más cargas y SZI	
Figura 30 Análisis entre IEEE más cargas vs IEEE más cargas y el inversor SZI	
Figura 31 Análisis de resultados entre IEEE más cargas vs IEEE más cargas y SZI	
Figura 32 Comparación entre los sistemas IEEE más cargas e IEEE más cargas y SZI	
Figura 33. Análisis gráfico de resultados de la sección temática - Estado del arte	
Figura 34. Análisis gráfico de resultados de la sección problema - Estado del arte	
Figura 35 Análisis gráfico de resultados de la sección solución - Estado del arte	. 27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos establecidos para la variación del perfil de voltaje en Ecuador	5
Tabla 2 Datos del sistema de prueba IEEE de 34 barras	9
Tabla 3 Datos de voltaje RMS dados por el sistema IEEE de 34 barras	10
Tabla 4 Datos de corrientes para cada línea existente en el sistema IEEE de 34 barras	10
Tabla 5 Casos para seleccionar un sistema fotovoltaico SunPower(SPR-305E-WTH-D)	11
Tabla 6 Datos de voltaje y corriente para el cálculo de potencia en el sistema fotovoltaico	11
Tabla 7 Datos de armónicos o THD de cada barra	14
Tabla 8 Valores del perfil de voltaje de IEEE base VS IEEE más cargas	15
Tabla 9 Diferencia THD al aumentar cargas al sistema	15
Tabla 10 Resultantes de armónicos THD en cada una de las barras al conectar el SZI	16
Tabla 11 Datos máximos, mínimos y medias del sistema IEEE 34	17
Tabla 12 Valores THD entre IEEE más cargas e IEEE más cargas y SZI	18
Tabla 13 Resultantes entre los sistemas IEEE más cargas y IEEE más cargas y SZI	20
Tabla 14: Matriz de estado del arte.	24
Tabla 15 Datos de voltaje RMS dados en cada barra del sistema IEEE 34	28
Tabla 16 Datos de armónicos o THD de cada barra	28

REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN INVERSOR DE FUENTE Z MEJORADO BASADO EN TRANSFORMADOR CON ALTO IMPULSO Y CONTROL ENTRELAZADO

Resumen

El presente documento va encaminado en la reducción de la distorsión armónica existente en una red, la cual es causada por las cargas no lineales conectadas al sistema de distribución, generando molestias e inestabilidad en todo el régimen que se encuentra acoplado, por lo cual se propone una topología de inversores de fuente Z (ZSI) mejorado, mediante la implementación de un circuito de generación distribuida SD fotovoltaico en un modelo de prueba de la IEEE de 34 barras, en el cual se estudia el comportamiento del mismo ante la conexión del inversor de fuente Z mejorado, estableciendo casos de estudio al momento de incrementar cargas en la barra con mayor afectación en este caso la barra número 27, para lo cual se estable a cuatro formas de estudio, siendo la primera cuando el sistema se encuentre en vacío, prosiguiendo con la conexión de cargas al sistema, en tercer lugar la implementación y conexión de la SD con el inversor SZI en la barra mencionada anteriormente, y por último la comprobación del sistema al momento de conectar el SZI y las cargas en la barra 27 de la red, todo esto con el fin de estudiar el comportamiento de todo el régimen ante la conexión del inversor de fuente Z con la modulación de ancho de entrelazado y el uso de inversores conectados en serie.

Palabras Clave: Distorsión Armónica, Generación Distribuida, Control Entrelazado, Modulación de ancho de impulso, Sistema de distribución.

Abstract

This document is aimed at reducing the harmonic distortion existing in a network, which is caused by non-linear loads connected distribution system, generating the inconvenience and instability in the entire regime that is coupled, for which it is proposed an improved Z-source inverter (ZSI) topology, through the implementation of a photovoltaic SD distributed generation circuit in a 34-bus IEEE test model, in which its behavior is studied when the inverter is connected. improved Z source, establishing study cases when increasing loads on the bar with the greatest impact, in this case bar number 27, for which four forms of study are established, the first being when the system is empty, continuing with the connection of loads to the system, thirdly the implementation and connection of the SD with the SZI inverter in the bus mentioned above, and finally the verification of the system when connecting the SZI and the loads in bus 27 of the network, all this in order to study the behavior of the entire regime when connecting the Z source inverter with interleaved pulse with modulation and the use of inverters connected in series.

Keywords: Harmonic Distortion, Distributed Generation, Interleaved Control, Pulse Width Modulation, Distribution System.

1 Introducción

Para los sistemas eléctricos de potencia, la sección de redes de distribución son una parte fundamental ya que tienen como principal función a hacer llegar la energía eléctrica hacia los usuarios en excelentes condiciones. Existen tres tipos de redes el tipo radial, mallado y mallado los cuales se encuentran compuestos por las redes de distribución, cámaras de transformación además de las redes secundarias y finalmente los usuarios con sus respectivas acometidas [1],[2].

Las distorsiones armónicas se basan en las corrientes o voltajes cuyas frecuencias son números enteros de la frecuencia principal de la fuente causadas por las cargas no lineales como transformadores, resonancias [3], en general máquinas de corriente alternan (CA) existentes en los sectores industriales, comerciales y residenciales que se encuentran conectados al sistema [4].

Los sistemas de distribución contienen voltajes que varían a causa de conexiones y desconexiones de manera incorrecta afectando así el perfil de voltaje de toda la red los cuales afectan directamente a los usuarios o consumidores que encuentran conectados a ese sistema de distribución [5],[6]. Para lo cual es muy importante en la actualidad el análisis de los perfiles de voltaje en todo sistema eléctrico con el propósito de mejorar el servicio eléctrico hacia los consumidores finales y por ende avanzar en la calidad de energía eléctrica en todos los sectores [5],[7].

Los ingenieros eléctricos a lo largo de la historia de la electricidad han puesto énfasis en la reducción de la distorsión armónica y mejora del perfil de voltaje, un avance es el control entrelazado de inversores conectados en serie con los cuales se logra crear un circuito de conmutación por el cual pasa la corriente del sistema SD fotovoltaico, disminuyendo el valor de la corriente [8].

Para poder solucionar y dar una mejora ante todas estas anomalías se plantea la utilización de un inversor no convencional llamado inversor de fuente (SZI), en este caso con una ligera mejora. Este elemento eléctrico se encarga de convertir energía eléctrica de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA), además el hecho de considerarse mejorado es que puede realizar el trabajo de inversión y elevación de voltaje de una sola vez mediante el suso de un transformador elevador conectado al sistema [9]. El funcionamiento de este inversor de tipo (SZI) mejorado se da gracias a algunos elementos principales para la inversión del voltaje, en su interior contiene dispositivos electrónicos control como tales como tiristores. elementos capacitores, transformadores y diodos [10]. Todo el proceso antes mencionado se realiza con el fin de obtener seis estados en funcionamiento en los inversores o BJTs conectados. Además. para este inversor se reemplazan las bobinas del sistema por transformadores conectados en paralelo con una red de impedancias que ayudan a una mejor continuidad del circuito inversor planteado [11].

Con el fin de realizar pruebas se opta por utilizar un sistema de generación distribuida fotovoltaico, el cual mediante la recepción de los rayos solares por medio de unos paneles genera energía eléctrica corriente continua (CC)[12][13]. Para su funcionamiento el sistema de paneles solares tiene como datos elementales la cantidad de irradiación que emana el sol además de la temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas y también de la potencia que desea generar, siendo este uno de los sistemas de generación eléctrica renovable más viables para sistemas de distribución O micro redes residenciales[14][9].

Para la presente investigación además de la generación fotovoltaica se opta por utilizar el sistema de 34 barras establecido por la IEEE, para el análisis de todos los casos presupuestos es decir en el momento en que se encuentra funcionando en vacío, al conectar cargas, al conectar el SZI y las combinaciones propuestas para esta investigación, haciendo énfasis en la barra con mayor afectación de armónicos que para este caso es la barra número 27 [15], [16].

En la presente investigación se propone cuatro casos de estudio los cuales ponen a prueba el funcionamiento y confiablidad del sistema de inversión propuesto (SZI). Para el primer caso el sistema IEEE de 34 barras es analizado sin ninguna conexión adicional es decir en vacío, para la segunda situación se añade dos cargas no lineales a la barra 27 con el fin de generar mayor armónicos, en tercer lugar va la conexión del sistema fotovoltaico el cual contiene el inversor de fuente tipo Z mejorado, para finalizar se se conectar tanto las cargas no lineales como el inversor de fuente tipo Z mejorado [17],[18], todo esto con el fin de establecer el método adecuado para la utilización del inversor SZI en el sistema[11].

El documento propuesto tiene una estructura de presentación el cual este compuesto de los siguientes ítems; Sección I: Introducción que conlleva temas específicos de la investigación haciendo énfasis en la utilización del inversor de fuente tipo Z mejorado, sección II: Marco Teórico acorde al tema de investigación. Sección III: Formulación del problema, caso de estudio. Sección IV Análisis de resultados, Sección V conclusiones acorde a lo establecido por cada caso además de contar gráficos con los datos propuestos...

2 Marco teórico

La reducción de armónicos conlleva una gran variedad de parámetros, elementos, cálculos y sistemas que ayudan a mejorar el perfil de voltaje en un sistema de distribución. Para ello a continuación se describe toda la teoría a implementar en este artículo.

2.1 Sistemas Eléctricos de Distribución

Los sistemas de distribución son una parte fundamental de las redes y sistemas eléctricas del SIN, teniendo como principal función a hacer llegar la energía eléctrica hacia los usuarios en excelentes condiciones [19]. Estos sistemas encuentran compuestos por las redes de distribución, cámaras de transformación además de las redes secundarias finalmente los usuarios con sus respectivas acometidas [1].

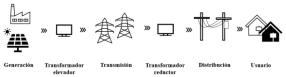


Figura 1. Generación, transmisión y distribución de un SEP

Para un SEP los sistemas de distribución de energía son esenciales ya que este debe abastecer la demanda energética del usuario o consumidor final desde una subestación. Estos sistemas cuentan con diferentes regímenes estándar, tales como sistema radial, sistema anillo abierto, sistema anillo cerrado sistema de doble anillo y sistema multirracial las cuales ayudan a un mejor traslado de las magnitudes de voltajes necesarias para las cargas que se encuentran a grandes distancias [1].

2.1.1 Red de distribución tipo radial

La energía se transfiere entre la fuente y la carga en un solo camino. Siendo el más económico, pero cualquier fallo en alguno de los elementos perturba la energización en la carga.

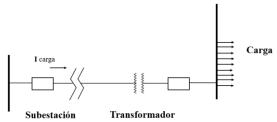


Figura 2. Red de distribución tipo radial.

2.1.2 Red de distribución tipo anillo

Es un sistema que permite transferir energía entre la fuente de energía eléctrica y la carga, esta disposición mejora enormemente la confiabilidad ya que corta de dos maneras el sistema.

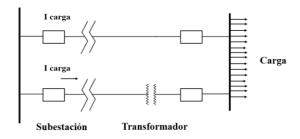


Figura 3. Sistema de distribución tipo anillo.

2.1.3 Red de distribución tipo mallado

Es un sistema que permite la transferencia de energía que proporciona diferentes fuentes para diferentes cargas a lo largo de múltiples caminos, en una disposición mucho más cercana, fiable, pero más caro.

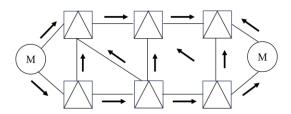


Figura 4. Red de distribución tipo mallado.

2.2 Distorsión Armónica en Distribución.

Las ondas armónicas son corrientes o voltajes cuyas frecuencias son números enteros de la frecuencia principal de la fuente. Si la periodicidad fundamental de una señal es 50 Hz, el siguiente armónico es 100 Hz, el pro siguiente es 150 Hz, etc [20]. Los armónicos se dan a causa de las cargas no lineales como se muestra en la figura 4. Estos consumen una corriente diferente durante pulsos repentinos [4]. Estas pulsaciones crean señales de corriente deformadas. dando paso retroalimentación armónica en otras partes de la red de distribución de energía [21].

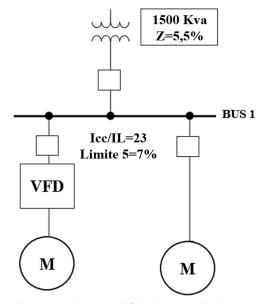


Figura 5. Diagrama unifilar de cargas lineales y no lineales existentes en una industria.

2.2.1 Fuentes de armónicos

Las cargas no lineales generan los armónicos existentes en una red, estos se pueden dividir en internas y externas en un sistema eléctrico de distribución [22]. A continuación, algunas fuentes internas:

- Distorsión de la onda del voltaje en las máquinas eléctricas.
- Cambio de la reluctancia en el entrehierro a causa de los polos en estado inclinado de las maquinas síncronas.
- Flujo magnético deformado en motores a causa de las cargas.
- Flujos de corrientes en inversores y rectificadores no senoidales.

Además de las fuentes externas también existen fuentes externas. A continuación, algunas:

- Carga de motores mediante la utilización de semiconductores y ordenadores.
- Elementos de manipulación de velocidad.
- Transporte de corriente continua en sistemas de alta tensión, a consecuencia de la inversión de corriente directa a corriente alterna [22].

 La conexión de convertidores en los sistemas de generación fotovoltaica y generación eólica.

2.2.2 Efectos que causan los armónicos.

En las redes de distribución los efectos que causan los armónicos son de alto impacto es decir generan daños en todo el sistema eléctrico. A continuación, una descripción de cada uno de estos efectos causados en la red:

- **Resonancias:** Son condiciones en las que se emparejan las reactancias tanto capacitivas como inductivas en una explícita frecuencia, siendo omisible la resistencia del sistema eléctrico existente [22].
- Transformadores: Para los transformadores los efectos se notan en el aumento de las perdidas en los devanados del cobre, además del aumento de las perdidas en el núcleo, sobresfuerzo en los aislamientos.
- Máquinas de corriente alterna: en las máquinas de CA los efectos de los armónicos se dan como la elevación de la temperatura a causa de las perdidas existentes en el cobre y también en el acero, además de la modificación el movimiento en el torque afectando la eficiencia.

2.3 Perfil de Voltaje en Distribución

En los sistemas de distribución existe voltajes que varían en su perfil de estabilidad, debido a las conexiones y desconexiones bruscas de las cargas conectadas en el sistema eléctrico [5]. Estas variaciones del perfil de voltaje afectan directamente a los consumidores y por ende a la empresa eléctrica encargada de la distribución y control de esta, generando daños a los dispositivos eléctricos y electrónicos existentes en las líneas de distribución [6],[23].

El análisis y estudio de las variaciones de voltaje se dan con el objetivo de mantener o mejorar los perfiles de voltajes deseados en una red de distribución, tratando de llegar siempre a los valores ideales y sin sobrepasar los límites de sobretensión y baja tensión en todo el sistema y entregar una calidad de energía más confiable económico y eficiente [5].

2.3.1 El perfil de voltaje y sus límites en una red eléctrica.

Bajo ciertas condiciones de operación los voltajes pueden subir o bajar de los límites establecidos tanto en las líneas de transmisión como de distribución, en este artículo se hace énfasis en el análisis de los límites del perfil de tensión en los sistemas de distribución tratando de mantenerlos viables [20], es decir con niveles de tensión dentro de los rangos establecidos muy acordes al voltaje nominal por lo general el ±5%, en el momento en que las condiciones de la red y la carga varían [24].

En nuestro país la normativa vigente que establece el límite de los perfiles de voltaje está dado por la regulación número 005/18 del ente público regulador ARCNEL, los cambios del perfil de voltaje dependen del nivel de tensión que se encuentran en los sistemas del SEP, en la Tabla 2 se muestra los rangos admisibles para cada variación de voltaje dentro del Sistema Eléctrico de Potencia [25].

Tabla 1. Rangos establecidos para la variación del perfil de voltaje en Ecuador.

Nivel de voltaje	Rango establecido
Alto	±5%
Medio	±6%
Baja	±8%

2.3.2 Causas del desbalance del perfil de voltaje

Las principales redes afectadas son las de distribución, debido a los siguientes factores que afecta la correcta operación de un sistema que perteneciente a un SEP [7][23]:

- Incremento de carga intervenida por potencia
- Aumento excesivo de carga en las líneas, redes y sistemas de distribución,

Este artículo va encaminado en de realizar investigación acerca de la estabilidad de voltaje, además de la frecuencia a la que funcionan los sistemas de distribución, con el fin de mejorar el perfil de voltaje [24].

2.4 Generación distribuida fotovoltaica

En sistemas de transmisión distribución existen diferentes tipos de generación eléctrica renovable a los cuales se los denomina generación distribuida SD[26], [27]. Los sistemas fotovoltaicos constan de diferentes elementos eléctricos y electrónicos como los inversores, los paneles fotovoltaicos y los sistemas de transformación y limpieza de la energía eléctrica generada como se muestra en la Figura estos ayudan al 6, buen funcionamiento y operación de toda la red[28].

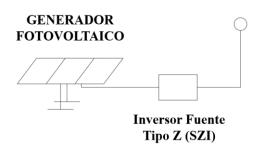


Figura 6 Estructura de un sistema de generación fotovoltaica

En la actualidad la gran mayoría de generación distribuida es de forma residencial el industrial ya que construcción tiene mayor factibilidad que los ostros sistemas de generación distribuida además de tener mayor compatibilidad diseños con los

arquitectónicos y de construcción, además de mantener una gran cantidad de energía almacenada por un banco de baterías para sustituir la escasez de energía eléctrica en tiempos de cortes por cualquier motivo[14].

2.4.1 Cálculo de potencia del panel del sistema fotovoltaico

Como el sistema está dado en corriente continua (CC) el cálculo de la potencia se da mediante la siguiente formula [14].

$$P = VxI \tag{1}$$

Para llegar al dato del corriente requerido para el sistema es necesario realizar un cálculo eléctrico:

$$Ip = Ipnx Npn$$
 (2)

Ipn: Corriente en cada uno de los paneles fotovoltaicos.

Npn: Numero de paneles.

De igual manera para obtener el dato de voltaje se debe aplicar la siguiente formula:

$$Vp = Vm \times Nm$$
 (3)

Vm: Voltaje en cada módulo.

Nm: Numero de módulos conectados en serie.

2.5 Control entrelazado en distribución.

El control entrelazado de dos o varios elementos en un sistema de control se da mediante la unión de algunos dispositivos eléctricos y electrónicos mayores a la unidad de un mismo sistema, con el fin de crear un circuito de conmutación, en este caso para dos transformadores electrónicos conectados en paralelo al igual que los inversores existentes en el sistema, este proceso de conmutación se da gracias al cambio de fase en 180° entre los interruptores de estos dispositivos [8],[29]. Esté comportamiento puede ser visualizado y analizado en las formas de onda de los

voltajes dados por los elementos conmutados[28].

2.5.1 Táctica de control entrelazado para inversores.

La ventaja con mayor importancia de la conexión en paralelo de dos inversores o múltiples inversores es mediante la conmutación entre elementos en un mismo diagrama de control como se lo puede ver en la Figura 6, así se lo podría llamar entrelazado en donde se puede obtener el cambio de fase de 180° en los dispositivos de control de dos inversores [10].

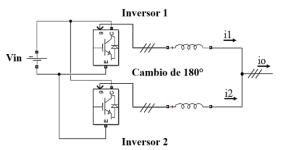


Figura 7. Topología de control entrelazado para inversores

2.6 Inversor fuente tipo Z

Se lo conoce como inversor de fuente tipo Z ya que se lo utiliza para convertir energía eléctrica de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA), como principal ventaja de este tipo de inversor es que ejecuta elevación e inversión del voltaje de una sola vez, es decir de forma fusionada en un mismo sistema, dando como resultado que el voltaje de salida es mayor que el voltaje de entrada [10].

2.6.1 Topología del inversor de fuente Z tradicional.

Un inversor clásico de tipo fuente Z, consta de una red que contiene impedancias únicas que ensambla el sistema principal del inversor a la fuente de voltaje de corriente continua (CC). Este sistema ocupa tiempos de disparo directo, así como también tiempos de disparo no directo de la vía por donde se comunica el inversor [11]. El sistema de impedancias está conformado por dos elementos inductivos L1 y L2,

además dos elementos capacitivos C1 y C2 como se muestra en la Figura 7.

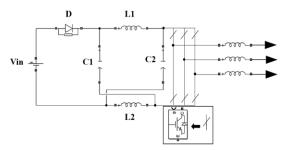


Figura 8. Inversor fuente tipo Z.

2.6.2 Principio de operación

Para que el inversor de fuente Z opere necesita de algunos principios funcionamiento, las cuales están dadas por el proceso de inversión de la corriente, este proceso contiene seis interruptores, esta fase esta parecida a la fase de un inversor tradicional, el cual consta de ocho vías de conducción siendo estos imitados por una secuencia existente en el sistema que realiza la función de conmutación de dichos interruptores [10]. Todo el proceso antes mencionado se con el fin de obtener seis estados en funcionamiento y los dos restantes abolidos [30].

Este tipo de inversor da paso un proceso de conmutación extra, además de realizar poner en cortocircuito este tipo de convertidor, todo eso con el fin de elevar la ganancia de la barra de corriente continua. Para llegar a obtener un cortocircuito se puede realizar de tres formas diferentes, los cuales se mencionan a continuación:

- En cada una de las ramas existentes, se puede cerrar los interruptores tanto superiores como inferiores.
- Realizando el cortocircuito entre dos ramas.
- Por último, poniendo en conexión los siete interruptores para llegar a obtener un traslape de los tres ramales [10].

Un método de comprobación es el reemplazo de los inversores por interruptores o, así como también por una fuente de corriente, mediante este proceso

se logra visualizar y comprender los procesos de conducción y de cortocircuito en el inversor de fe fuente tipo Z.

2.6.3 Inversor de fuente tipo Z mejorado Para obtener una mejora en el perfil de voltaje y una mejora en la distorsión armónica en los sistemas de distribución se ha planteado la utilización del inversor de fuente Z mejorado, este inversor contiene una red de impedancias, además de adicionar dos transformadores al sistema conectados en paralelo en remplazo de dos dispositivos inductivos del inversor fuente tipo Z tradicional [11].

Este tipo de inversor mejorado consta de algunos nuevos elementos que ayudan a obtener una respuesta de salida energética en excelentes condiciones hacia una red de distribución y por ende a una red de transmisión [30]. El nuevo sistema se crea reemplazando los elementos inductivos L1 Y L2 por dos transformadores, un inductor L3 adicional, dos elementos capacitivos adicionales C3 Y C4, y finalmente un diodo D2.

2.6.4 Características del inversor tipo fuente Z mejorado.

A continuación, algunas de las características principales del inversor Z mejorado:

- Se opta por conservar la forma tradicional de conexión en forma de X.
- Con la utilización de dos transformadores conectados en paralelo se logra obtener un factor de refuerzo excelente con tan solo cambiar la relación de transformación.
- La fuente entrega corriente continua y es utilizada de esa forma por el sistema.
- Genera eliminación de corriente resonante [17].

3 Metodología

En las redes de distribución actuales existe una gran cantidad de anomalías que perturban la circulación correcta de la energía eléctrica, una de esas anomalías es la distorsión armónica que es provocada por las cargas capacitivas e inductivas conectadas a la red, dando como resultado final la variación en el perfil de voltaje de todo el sistema, con el pasar del tiempo los investigadores e ingenieros encargados de disminuir o eliminar estas perturbaciones plantean diversas alternativas de mejora.

Con la presente investigación se plantea disminuir la distorsión armónica mediante la utilización de un inversor de fuente tipo Z (SZI) mejorado con la finalidad de corregir el perfil de voltaje en un sistema de distribución.

Para esto se plantea un método de optimización y mejora con el fin de obtener resultados favorables, haciendo énfasis en tres factores principales: conexión de una generación distribuida (GD) de tipo fotovoltaica a la red de distribución, implementación del inversor de fuente tipo Z (SZI) en la GD de diferentes barras, comparación y análisis de resultados entre un inversor de deferente tipo con los datos obtenidos por el inversor planteado por la investigación.

3.1 Formulación del problema

Con la finalidad de estudiar y dar solución a unos de los inconvenientes más comunes en los sistemas de distribución, se ha tomado en cuanta analizar lo planteado en esta investigación en un circuito de distribución establecido por la IEEE el cual consta de 34 barras como se puede observar en la Figura 8.

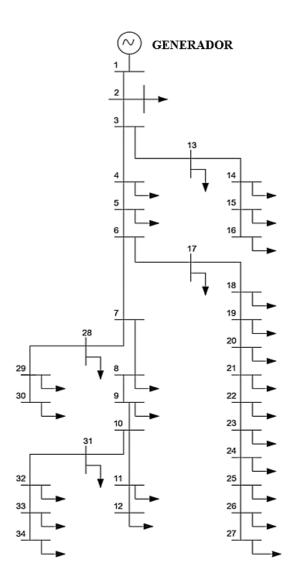


Figura 9 Diagrama unifilar de un sistema de 34 barras establecido por la IEEE.

Para poder analizar y estudiar el comportamiento del sistema se lo realizará en el software Matlab-Simulink, con el objetivo de poder variar y navegar por cada una de las barras y comprobar así los datos de salida dados por cada fase de la red. El sistema IEEE de 34 barras, así como cualquier circuito de distribución consta de algunos elementos indispensables, en la Tabla 2 se puede visualizar los datos de este sistema de prueba establecido por la IEEE.

Tabla 2 Datos del sistema de prueba IEEE de 34 barras

Elementos del sistema	Número de elementos existentes	
Generador	1	
Líneas trifásicas	33	
Cargas	29	

Este sistema consta de valores de voltajes ya establecidos, los cuales están dados tanto en valores reales como en por unidad (p.u) como se puede observar en la Tabla 3, en este caso el voltaje de línea trifásica entrega los datos en kilovoltios (kV), además consta de información en valores en por unidad (p.u) los cuales se asemejan a la unidad en cada una de las barras existentes en este diagrama unifilar, de igual manera brinda información del ángulo de desfase en unidades de p.u.

Tabla 3 Datos de voltaje RMS dados por el sistema IEEE de 34 barras.

Nombre	Nodo	Barra	Voltaje [kV]	Voltaje [p.u]
VRMS_1	1	1	14,3760	1,0000
VRMS_2	2	2	14,3613	0,9990
VRMS_3	3	3	14,3499	0,9982
VRMS_4	4	13	14,3315	0,9969
VRMS_5	5	14	14,3153	0,9958
VRMS_6	6	15	14,2999	0,9947
VRMS_7	7	16	14,2823	0,9935
VRMS_8	8	4	14,2784	0,9932
VRMS_9	9	5	14,2737	0,9929
VRMS_10	10	6	14,2715	0,9927
VRMS_11	11	17	14,2706	0,9927
VRMS_12	12	18	14,2704	0,9926
VRMS_13	13	19	14,3492	0,9981
VRMS_14	14	20	14,3478	0,9980
VRMS_15	15	21	14,3476	0,9980
VRMS_16	16	22	14,3476	0,9980
VRMS_17	17	23	14,2916	0,9941
VRMS_18	18	24	14,2847	0,9936
VRMS_19	19	25	14,2770	0,9931
VRMS_20	20	26	14,2709	0,9927
VRMS_21	21	27	14,2656	0,9923
VRMS_22	22	7	14,2596	0,9919
VRMS_23	23	28	14,2546	0,9916
VRMS_24	24	29	14,2499	0,9912
VRMS_25	25	30	14,2477	0,9911
VRMS_26	26	8	14,2468	0,9910
VRMS_27	27	9	14,2465	0,9910
VRMS_28	28	10	14,2765	0,9931
VRMS_29	29	31	14,2727	0,9928
VRMS_30	30	32	14,2707	0,9927
VRMS_31	31	33	14,2708	0,9927
VRMS_32	32	34	14,2702	0,9926
VRMS_33	33	11	14,2699	0,9926
VRMS_34	34	12	14,2698	0,9926

Cada una de las líneas tiene su respectiva impedancia, el cual simula las perdidas existentes al momento de distribuir la energía eléctrica, siendo este una parte esencial del sistema ya que los valores obtenidos serán más exactos y parecidos a un sistema eléctrico de distribución físico. Por cada una de las fases circula una corriente nominal en cual se puede obtener como dato del sistema de distribución establecido por la IEEE de 34 barras. Estos valores de corriente los podemos observar en la Tabla 4, los cuales vienen dados en kiloamperios (kA), además la Tabla 4 brinda información acerca del inicio y fin de cada barra es decir los nodos a los cuales se conecta.

Tabla 4 Datos de corrientes para cada línea existente en el sistema IEEE de 34 barras.

Línea	Entre barras	Corriente [kA]
1	[1-2]	0,1700
27	[27-28]	0,0000
1	[1-2]	0,1700
-	-	0,04621
	1	1 [1-2] 27 [27-28]

3.2 Generación Fotovoltaica

Con el objetivo de establecer un balance energético en una red de distribución de tipo fotovoltaico, el cual ayuda a compensar el desabastecimiento de energía eléctrica en las redes. Todo esto se da gracias a la gran cantidad de irradiación existente en nuestro país, siendo una excelente opción de generación de energía eléctrica, además de minimizar costos de pago a la empresa distribuidora. En la presente investigación, hace énfasis en este tipo de generación eléctrica ya que se implementa un tipo de inversor muy eficiente al momento de convertir la energía eléctrica de corriente continua C.C a corriente alterna C.A. Un sistema de generación fotovoltaico consta de varios elementos básicos en su estructura para su funcionamiento.

Una estructura de paneles fotovoltaicos, el cual consta de 66 células solares conectadas entre sí en paralelo, los cuales conforman cauda uno de los 5 módulos acoplados en seria, el tipo de panel solar escogido para esta investigación es el SunPower(SPR-305E-WHT-D), dado por los elementos existentes en el software Matlab-Simulink, este dispositivo consta de datos ya establecido como la potencia, irradiación y temperatura especificados en la Tabla 5, en este caso se opta por el caso 1.

Tabla 5 Casos para seleccionar un sistema fotovoltaico SunPower(SPR-305E-WTH-D)

	Potenci a [Kw]	Radiación solar [W/ m^2]	Temperatur a [°C]
Caso 1	100,7	1000	25
Caso 2	24,4	250	25
Caso 3	92,9	1000	50

Como el sistema está dado en corriente continua (CC) el cálculo de la potencia se da mediante la ecuación 1.

$$P = VxI \tag{4}$$

Para esto el SunPower (SPR-305E-WHT-D) brinda los siguientes datos de voltaje y corriente establecidos por el Software los cuales se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6 Datos de voltaje y corriente para el cálculo de potencia en el sistema fotovoltaico

	Voltaje	Corriente	Potencia
	[V]	[A]	[KW]
Caso 1	273,5	368,28	100,7245

Para llegar al dato del corriente requerido para el sistema es necesario realizar un cálculo eléctrico así también del voltaje con el fin de llagar a la potencia requerida.

Esta potencia es la que circula por todo el sistema con un voltaje que entrega a la red de 14.5 kV en CA, todo esto se da gracias a la implementación del inversor de fuente tipo Z mejorado, el cual ayuda a perfeccionar el perfil de voltaje y minimizar la distorsión armónica en la energía

eléctrica generada para cada una de las fases del sistema.

3.3 Implementación de dos transformadores al inversor fuente tipo Z clásico

Al momento de diseñar un inversor de fuente tipo Z (SZI) mejorado, se tomó como base un SZI clásico, el cual consta de algunos elemento capacitivos e inductivos en todo su esquema, además de un conjunto de inversores conectados en paralelo, con el cual generan señales de salida senoidales hacia la red. Para mejorar este sistema clásico se optó por modificar ciertos elementos del circuito lo cual se realizó en Matlab-Simulink. software estos elementos inductivos existentes en el diagrama original son cambiados por dos transformadores los cuales se encuentran conectados en paralelo, todo esto con el fin de lograr mejorar la circulación de la energía eléctrica hacia la red con menor distorsión armónica y así ende mejorar el perfil de voltaje de todo el tramo que se encuentra conectado a la generación distribuida (GD).

3.3.1 Principio de operación del inversor de fuente tipo Z mejorado.

Al instante de reemplazar u aumentar transformadores al sistema de un SZI clásico, en inevitable encontrarse con cambios en la salida de voltaje. Para lograr un correcto funcionamiento de este nuevo sistema los transformadores deben estar configurados correctamente es decir con los datos necesarios de impedancias, voltajes de entrada Vin, además de la frecuencia y la relación de transformación a la cual va a operar el mismo, con esto se trata de estabilizar el sistema para así poder llegar a un balance en el perfil de voltaje.

3.3.2 Conexión en paralelo de inversores o control entrelazado

Una parte importante del inversor de fuente Z (SZI), es la conexión de los inversores en paralelo como se puede observar en la Figura 9, la cual se lo conoce como control entrelazado, este mini sistema realiza la inversión de las señales de salida senoidales en 180°, con el fin de generar mayor ganancia en la salida de los voltajes para cada una de las fases de la red.

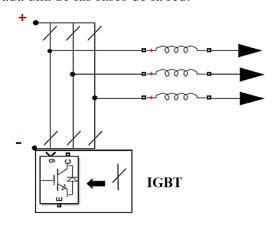


Figura 10 Control entrelazado de Inversores

3.4 Caso de estudio

Una de las anomalías comunes en las redes de distribución eléctrica es la existencia de armónicos en este caso de voltajes. Para esto se ha planteado cuatro diferentes tipos de casos de estudio en los cuales se analizará el comportamiento de un sistema de 34 barras de la IEEE antes y después de adjuntar un sistema de generación fotovoltaica, el cual lleva incrustado en su circuito un inversor de fuente tipo Z (SZI) mejorado con el fin de minimizar los armónicos de voltaje en este sistema.

Caso 1: Análisis del sistema IEEE base

En el caso número 1, el circuito se encuentra de forma normal es decir en su forma original sus 34 barras contienen unas cargas reactivas las cuales están conectadas en cada una de las barras de este sistema. Para este caso no se ha tomado en cuenta la inserción del sistema fotovoltaico adicional al circuito además tampoco se ha incrementado ninguna carga extra en cualquier barra existente de este sistema con

el fin de analizar de forma inicial el comportamiento de la red.

Caso 2: Sistema IEEE base más generación fotovoltaica incrustado el inversor fuente tipo Z

Para este caso se toma en cuenta la conexión del sistema fotovoltaico, el cual trae consigo un inversor fuente tipo Z (SZI). Este proceso conlleva a la disminución de armónicos mediante la utilización de transformadores conectados en paralelo así también de contar con diferentes elementos electrónicos como los tiristores (BJT) y elementos capacitivos adicionales conectados en el sistema.

Caso 3: Sistema IEEE base con inclusión de cargas no lineales

En este caso al igual que el caso 1, se utiliza un sistema dado por la IEEE de 34 barras, con un ligero cambio en una de las barras. La barra nuero 27 contiene mayor THD eso significa que existen mayor número de armónicos en esta barra, para el análisis de este caso se optó por aumentar dos cargas no lineales adicionales a la carga normal ya conectada en la barra 2, todo esto con el fin de incrementar el valor del armónico de este circuito en un 10% y así poder establecer diferencias en la red en el momento en que se conectan cargas adicionales al sistema normal.

Caso 4: Sistema IEEE base con inclusión de cargas no lineales más generación fotovoltaica incrustado el inversor fuente tipo Z

Al igual que el caso 2, este sistema consta de una técnica de generación fotovoltaico que va conectado a la red dada por la IEEE. Este consta de un inversor de fuente tipo Z (SZI). en la parte de generación fotovoltaica, además cuenta de 2 cargas no lineales conectados en paralelo a la carga ya existente en la barra 2 como se puede observar en la Figura 10, todo esto con el fin de analizar el comportamiento del sistema de 34 barras ante la conexión del inversor fuente tipo Z (SZI) a la red y establecer

diferencias entre una carga normal y una carga incrementada en un 10 %.

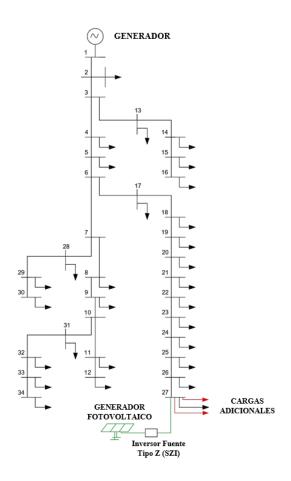


Figura 11 Sistema IEEE de 34 barras con cargas lineales extra y Generación fotovoltaica

4 Análisis de resultados

En esta sección se presenta los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio planteados en el punto anterior.

4.1 Análisis del sistema IEEE base

Para iniciar con los análisis de resultados en los sistemas propuestos fue necesario conocer el comportamiento del sistema base IEEE de 34 barras en cual se conoció el estatus del perfil de voltaje de toda la red como se puede observar en la Figura 11, especificando los rangos altos en cual es 1 y bajos de los voltajes RMS como 0.9991133 [pu], estos valores vienen dados del análisis en cada una de las barras con sus respectivas cargas establecidas por el mismo sistema.

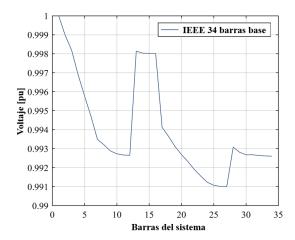


Figura 12 Perfil de voltaje del sistema IEEE 34.

Además de en el análisis realizado mediante graficas se puede establecer los valores máximos, mínimos y medias de los voltajes para todo el sistema como pude observar en la Figura

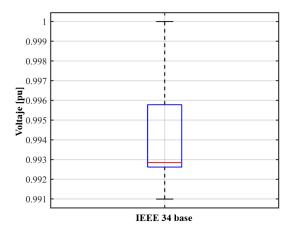


Figura 13 Valores máximos, mínimos del sistema IEEE 34

Con el fin de tener una mayor compresión y entender de mejor manera los gráficos de los THD resultantes se optó por multiplicar a los datos obtenidos por un valor estándar de 0,005402 como se puede observar en la Tabla, debido a que los datos resultantes contienen valores y cambios minúsculos.

Tabla 7 Datos de armónicos o THD de cada barra.

Valor	Barra	Valor Armónico IEEE real	Valor Armónico IEEE estandarizado
Max	27	0,00541958	0,999840493
Min	1	0,00541475	0,998950935
Critico	27	0,00541958	0,999840493
Media	-	0,00541717	0,99984049

Así como el perfil de voltaje también el THD o la medición de los armónicos totales en el sistema es representado mediante la Figura 12, en el cual se puede observar que el nivel más elevado de armónicos se encuentra en el rango entre la barra 25 y 30, estableciendo así en valor pico de THD existente de 5419,5767 en la barra 27 como se puede observar en la Figura 12.

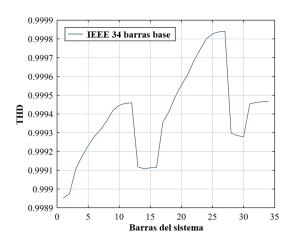


Figura 14 THD del sistema IEEE 34

Así también se puede observar en la Figura 1 los valores máximos, mínimos, y medias de cada una de las tablas de datos obtenidas de forma gráfica en este caso para los niveles de TDH existentes en el sistema.

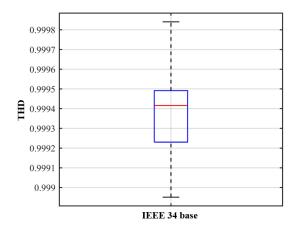


Figura 15 Valores máximos, mínimos y Medios de los armónicos del IEEE 34

4.2 Sistema IEEE base con inclusión de cargas no lineales

En el momento en que se incrementan dos cargas en paralelo a la carga ya existente en la barra número 27, la cual contiene mayor cantidad de armónicos, el perfil de voltaje disminuye considerablemente como se puede observar en la figura 15.

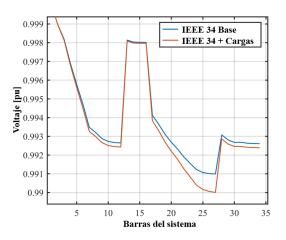


Figura 16 Perfil de voltaje IEEE base VS IEEE más cargas

Como se podrá notar en la Tabla 6 la mayor diferencia del perfil de voltaje cae en la barra número 27 ya que es la más perjudicada por aumento de cargas reactivas, con una diferencia del resultado base de $92,27 \times 10^{-3}$ [pu].

Tabla 8 Valores del perfil de voltaje de IEEE base VS IEEE más cargas

Barra	IEEE base V [pu]	IEEE + cargas V [pu]
27	0,990993	0,990007233

Este cambio se lo puede ver representado en la Figura 16 en un diagrama de bloques en donde existe un ligero cambio entre los todos los datos obtenidos por el análisis de todos los sistemas al incrementar dos cargas reactivas adicionales a la ya existente.

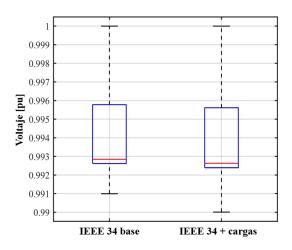


Figura 17 Perfil de voltaje base VS Perfil de voltaje con cargas

Como se puede observar en la Figura 17, el nivel de armónicos se eleva debido al incremento de cargas al sistema IEEE 34, estas cargas se encuentran conectadas en la barra número 27, por ende, en existe mayor nivel de THD en la misma llegando a un valor de 0,99984049 con una diferencia de 0,8646 ante el THD del sistema IEEE 34 base.

Tabla 9 Diferencia THD al aumentar cargas al sistema

		Valor
Barra	Valor Armónico	Armónico
	IEEE	IEEE + Cargas
27	0,99984049	0,99984049

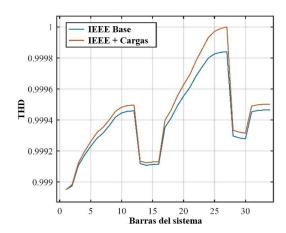


Figura 18 Incremento del THD a causa del aumento de cargas conectadas en la barra 27.

Además, estos resultados se optaron por representarlos de manera de bloques con la ayuda del software Matlab, en el cual se puede notar un aumento considerable de los niveles de THD existentes al momento de variar las cargas en el sistema en este caso en la barra 27, en la Figura 18 se puede visualizar tanto los valores máximos, mínimos, y medios de los dos sistemas.

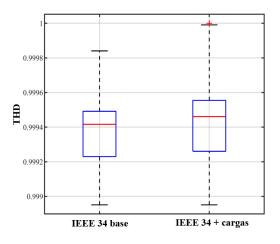


Figura 19 Resultado del THD al incrementar cargas

4.3 Sistema IEEE base más inversor fuente tipo Z

Al implementar el inversor fuente tipo Z (SZI) con generación fotovoltaica, el sistema IEEE de 34 barras se ve beneficiado al reducir el índice de armónicos en un 1,8%

a comparación del sistema base, estos resultados se pueden observar en la Tabla 8.

Tabla 10 Resultantes de armónicos THD en cada una de las barras al conectar el SZI

Valor	Barra	Valor Armónico IEE base	Valor Armónico IEE + SZI
Max	27	0,999840493	0,999045179
Min	1	0,998950935	0,998989883
Critico	28	0,999297208	0,998996933
Media	-	0,99939672	0,99900368

Además de obtener datos numéricos, en la Figura19 se puede observar de forma clara un cambio considerable en el trazo de los vectores que representan la tabla de datos antes mencionada. Así también se puede visualizar que la barra que tiene mayor presencia de armónicos es la barra número 27, la cual sufre un cambio beneficioso ante la implementación del SZI al circuito, estableciendo una diferencia beneficiosa del sistema en un 0,007% ante circuito original.

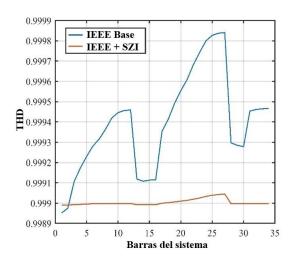


Figura 20 Análisis gráfico de los THD entre IEEE Base y IEEE más SZI

Para poder constatar los datos máximos y mínimos del sistema ante la intervención del SZI, fue factible generar un esquema de cajas en el software Matlab como se muestra en la Figura 20, establecido que el valor máximo de los armónicos es de 0,999840493 en cual pertenece a la barra

número 27, así también un valor mínimo seria de 0,99895094, dando como resultado la figura mostrada anteriormente.

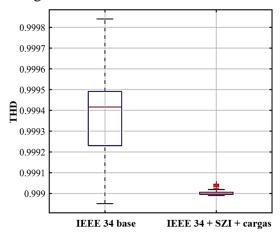


Figura 21 Valores Máximos, mínimos y medios de los datos obtenidos en el IEEE 34

A diferencia del resultado del circuito original se tiene una gráfica considerablemente diferente en escala como se observa en la Figura 20, para poder entender y visualizar de mejor forma los valores máximos y mínimos es necesario presentar la Figura 21 en la cual se observa de mejor forma todos los valores resultantes.

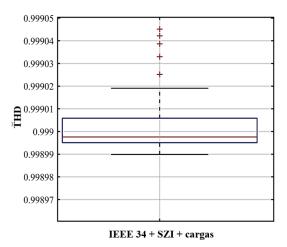


Figura 22 análisis de resultados de armónicos totales en el sistema que contiene SZI

El perfil de voltaje en el sistema original tiene sus altos y bajos dependiendo la carga que esté conectado a esa barra, en la figura 22 se puede visualizar que existe una mejora del 0,017% a diferencia del sistema

base el cual beneficia a la estabilidad del sistema conectado a esta red fotovoltaica la que incorpora un Inversor de fuente tipo Z (SZI).

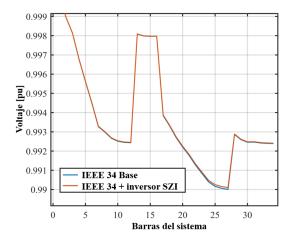


Figura 23 Comparación del perfil de voltaje entre el IEEE base vs IEEE más SZI

El caso de estudio que se tomó en cuenta para el análisis de resultados es la barra número 27 del sistema IEEE de 34 barras, el dónde es más notorio todos los cambios del perfil de voltaje como se puede ver en la Figura 23, en el cual es notorio el balance favorable del perfil de voltaje con un valor de 0,000123 [pu] para ese el sistema propuesto.

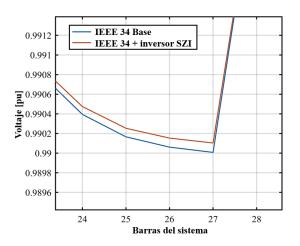


Figura 24 Análisis del perfil de voltaje al implementar un SZI al sistema de 34 barras

El perfil de voltaje varia a causa de la conexión de la generación fotovoltaica que contine el inversor de fuete tipo Z (SZI), teniendo valore máximos, mínimos y mediana distintos y mejorados como se lo muestra la Tabla 9, en el cual se puede comprobar una ganancia en el perfil de voltaje.

Tabla 11 Datos máximos, mínimos y medias del sistema IEEE 34

Perfil de Voltaje	IEEE base	IEEE + SZI			
Máximo	1	1			
Mediana	0,99388465	0,99394042			
Mínimo	0,99099305	0,99111606			

Los datos de la Tabla 9, se ven reflejados en la Figura 24 de forma gráfica las cuales establecen ligeros cambios en los resultados obtenidos para cada uno de los casos, en específico el objetivo de estudio 1 y el objetivo de estudio 3.

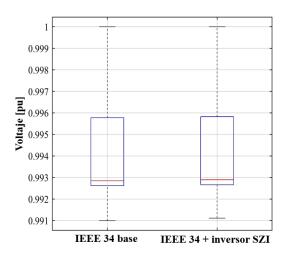


Figura 25 Resultados del perfil de voltaje entre el sistema IEEE base vs IEEE más SZI.

En el caso de análisis de la barra 27, se muestra a continuación un valor único del sistema, es decir el valor real en cada caso obteniendo como resultado un valor de diferenciación entre los dos sistemas de 0,00123 [pu].

4.4 Sistema IEEE con inclusión de cargas no lineales más inversor fuente tipo Z

Al igual que en el caso anterior la distorsión armónica disminuye, pero ahora la diferencia es del 1,83%, como se puede observar en la Figura 26, obteniendo una mayor disminución del THD en todo el sistema.

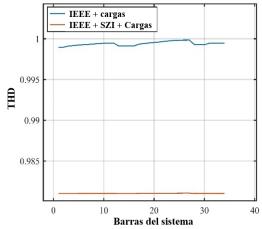


Figura 26 análisis de resultados de IEEE más cargas vs IEEE más SZI y cargas

En el diagrama de cajas se establece los valore máximos, mínimos y medianas del sistema tanto para el sistema IEEE 34 más cargas y en IEEE más cargas y SZI, estos daros se pueden constatar en la Tabla 10.

Tabla 12 Valores THD entre IEEE más cargas e IEEE más cargas y SZI

THD	IEEE + cargas	IEEE + SZI + cargas
Máximo	0,999840493	0,981045858
Media	0,999383223	0,981001029
Mínimo	0,998950935	0,980989883

Para poder entender de una mejor manera las diferencias que existen en los valores máximos y mínimos del sistema se restablece una comparación entre el sistema IEEE con cargas y el IEEE más cargas y SZI como se muestra en la Figura 27, ahí se puede observar claramente que la diferencia del THD es significativa y en beneficio de la red en un 0,01798444 menor al sistema original con cargas.

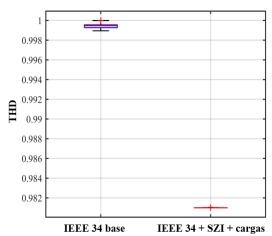


Figura 27 Resultados de los sistemas IEEE más cargas vs IEEE más cargas y SZI

Para entender la gráfica de mejor manera, se realizó un zum a cada una de las secciones, en este caso se pue observar que el valor máximo es de 0,99984, así mismo el valor mínimo de 0,99895 y una mediana de 0,9993, las cuales se encuentran representadas de la Figura 28.

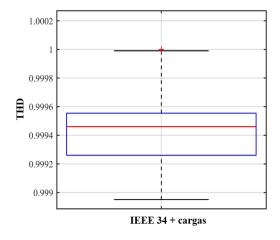


Figura 28 Gráfica de los datos de THD obtenidos para el sistema IEEE más cargas

De igual manera la Figura 29 se muestran los datos máximos y minios del sistema IEEE más cargas y SZI, estos valores que se encuentran graficados están dados por la Tabla 10.

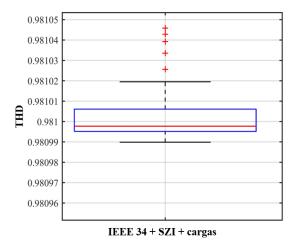


Figura 29 Gráfica de los datos de THD obtenidos para el sistema IEEE más cargas y SZI

Al igual que el caso anterior en la Figura 30 se puede observar una ganancia en el perfil de voltaje al momento de comparar resultados entre el sistema IEEE 34 con cargas conectadas y el IEEE 34 con cargas más la generación fotovoltaica que contiene el inversor de fuente tipo Z (SZI), en el cual se puede observar una mejora en baja escala entre los dos sistemas de un 0,017%.

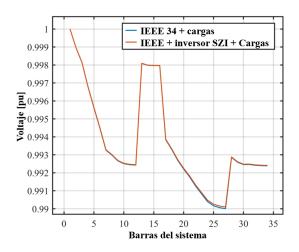


Figura 30 Análisis entre IEEE más cargas vs IEEE más cargas y el inversor SZI

En la Figura 27 se puede observar de una mejor manera la diferencia del perfil de voltaje al comparar los dos sistemas en los cuales están conectados las cargas adicionales para el análisis, en este caso se muestran los gráficos con mayor incidencia en la barra número 27, dando como

resultado una diferencia entre el IEEE más cargas y el IEEE más cargas y SZI de 0,017%.

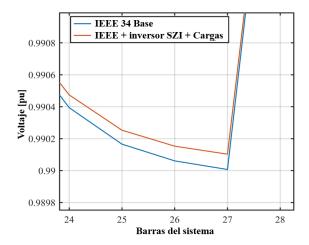


Figura 31 Análisis de resultados entre IEEE más cargas vs IEEE más cargas y SZI.

Con el fin de tener mayor comprensión de los datos obtenidos en la simulación del sistema, la Figura 32 en donde se representan mediante un diagrama de cajas tanto para los valores del IEEE más cargas como para IEEE más cargas y SZI.

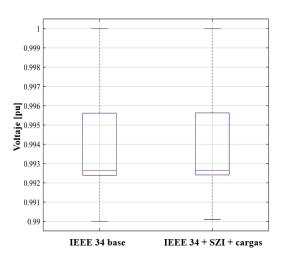


Figura 32 Comparación entre los sistemas IEEE más cargas e IEEE más cargas y SZI.

Los datos representados en la gráfica se los puede verificar en la siguiente Tabla 11, el cual muestra los valores dados por el software Matlab.

Tabla 13 Resultantes entre los sistemas IEEE más cargas y IEEE más cargas y SZI

Perfil de	IEEE + cargas	IEEE + SZI + cargas
voltaje	[pu]	[pu]
Máximo	1	1
Media	0,993572681	0,993601385
Mínimo	0,990007233	0,990103069

5 Conclusiones

Luego de analizar y evaluar cada uno de los casos anteriormente mencionados se concluye:

Mediante el diseño y simulación del sistema dado por la IEEE de 34 barras en el software Matlab-Simulink e implementar un sistema de inversores conectados entre sí se logró crear una topología de inversores de fuente Z (SZI) mejorados ya que en su interior se usó transformadores lineales en reemplazo a las bobinas.

En el momento de realizar las pruebas en vacío se estableció que la barra con mayor distorsión armónica es la barra número 27 con valor máximo de 0,999840493 en el THD analizado en este nodo, por ende, su perfil de voltaje disminuía a 0,990993 [pu] siendo este el punto más bajo del sistema, por tal razón se tomó como referencia para realizar los cuatro casos de estudio planteados obteniendo resultados favorables para la barra y por ende para todo el sistema IEEE de 34 barras.

Las partes fundamentales para que este sistema funcione v de resultados favorables son los inversores entrelazados entre sí, así transformadores también los lineales conectados en paralelo ya que se concluyó que mientras se utilizan mayor cantidad de transformadores lineales conectados el sistema mejora es decir el THD baja y el perfil de voltaje incrementa en este caso se tomó de referencia la barra número 27 para el cual el resultado numérico del THD es de 0,981045858 a comparación del resultado del sistema con cargas aumentadas va que el valor de este fue de 0.999840493. tomando una disminución favorable de 0,018794.

Con la utilización del inversor de fuente Z mejorado para cada caso de análisis, se vio una disminución considerable en los THD de un 0,017 %, tanto para el sistema con cargas a adicionales como para el sistema en vacío, logrando así reducir la distorsión armónica en la red de distribución propuesta.

Al utilizar el SZI mejorado además de minimizar la distorsión armónica en el sistema se logró la majeará del perfil de voltaje en todo el sistema en una forma considerable en cuanto la red se encuentra en vacío mientras tanto en el momento en que la red se encuentra con cargas adicionales el perfil de voltaje mejora en un 0,00123 [pu] tomando como referencia la barra 27.

5.1 Trabajos futuros

Con los logros obtenidos en la presente investigación se recomienda continuar con la investigación del inversor de fuente tipo Z (SZI) en sistemas de generación eléctrica renovables para los sistemas de distribución.

Se recomienda variar la potencia en el sistema fotovoltaico con dos inversores adicionales en el sistema y analizar los efectos producidos en la red.

Se recomienda conectar el SZI en barras diferentes del sistema IEEE 34, además de considerar cargas adicionales en barras que no estén implementadas el inversor de fuente Z.

6 Referencias

- [1] O. P. M. Abdelhay A. Sallam, Distribution sistem structure, vol. 1. 2019.
- [2] Institute of Electrical and
 Electronics Engineers. DMI College
 of Engineering Student Branch,
 Institute of Electrical and
 Electronics Engineers. Madras
 Section., and Institute of Electrical
 and Electronics Engineers,
 International Conference on

- Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) 2016: 3rd-5th, March 2016.
- [3] N. Granda, D. Colomé, and E. Agüero, "Determinación de la Respuesta Dinámica y Estacionaria de la Frecuencia frente a Desbalances de Potencia Producidos por Perturbaciones en la Red," *Revista Técnica "energía"*. *N o*, vol. 12, pp. 74–83, 2016.
- [4] F. Acevedo Donoso, "Componentes armónicas en redes de distribución eléctricas: Conceptos, normas vigentes en Chile y alternativas de solución al problema.," *Revista Marina*, pp. 1–8, 2018.
- [5] D. A. Calvachi Paz, "Mejoramiento del perfil de voltaje en sistemas de distribución mediante la implementación de un algoritmo genético enfocado en la ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida.," 2022, pp. 1–33, 2022.
- [6] M. H. Tito Salmerón,
 "Mejoramiento del perfil de voltaje
 en alimentadores críticos
 incorporando restauradores de
 voltaje dinámicos mediante el
 modelo de control de
 retroalimentación," 2023.
- [7] P. Ledesma, "Regulación de frecuencia y potencia," 2008.
- [8] B. C. Kuo, Sistema de control automático, vol. Vol. 7. 1997.
- [9] G. Di Lavello Pagnussat, "Control Automático de Generación Caso Uruguay (AGC)," 2019.
- [10] M. Angel, T. Mendoza, J. Ricardo, H. Hern'miguel, A. T. Mendoza, and J. R. Hernánd, "Modelamiento del convertidor Z como fuente inversora trifásica de voltaje," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 2, no. 2, pp. 1–9, 2018.

- [11] R. Swathyprakash y S, "Modified trans-Z-sourse inverter whit continuous input current and improved boost factor,"

 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2016.
- [12] J. P. Muñoz-Vizhñay, M. V. Rojas-Moncayo, and C. R. Barreto-Calle, "Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador," *Ingenius*, no. 19, pp. 60–68, Jan. 2018, doi: 10.17163/ings.n19.2018.06.
- [13] S. Qianhao, L. Yunhao, D. Zeyu, Z. Chenggang, W. Pengtao, and Z. Yao, "Data Mining-based Multi-objective Economic Dispatching of Distribution Network with Distributed Generation and Electric Vehicle," in *Proceedings 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Energy Transition for Carbon Neutrality, iSPEC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 268–273. doi: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735877
- [14] A. Balal and M. Giesselmann, "Demand Side Management and Economic Analysis Using Battery Storage System (BSS) and Solar Energy," in 2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications, ICPEA 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 141–146. doi: 10.1109/ICPEA52760.2021.963935
- [15] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Performance Improvement of Radial Distribution Network with Distributed Generation Integration Using Extended Particle Swarm Optimization Algorithm,"

 International Review of Electrical

- Engineering (IREE), vol. 10, no. 2, p. 293, Apr. 2015, doi: 10.15866/iree.v10i2.5410.
- [16] V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 69, no. 2015, pp. 246–256, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.080.
- [17] Z. Aleem, S. L. Winberg, H. F. Ahmed, and J. W. Park, "Parallel Operation of Transformer-Based Improved Z-Source Inverter with High Boost and Interleaved Control," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 18, no. 4, pp. 2422–2433, Apr. 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3098685.
- [18] J. T. Soto and E. R. Ramos, "Simulación del control Potencia-Frecuencia en un Sistema Eléctrico de Potencia en Matlab," 2016.
- [19] IEEE Region 10 and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Proceedings of 2020 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*.
- [20] C. S. Rajan and M. Ebenezer, "Voltage Profile Improvement of a Multi Microgrid Interconnection Scheme using Synchronverters," in SPICES 2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 217–222. doi: 10.1109/SPICES52834.2022.97741 61.
- [21] M. R. Mariem Khemir and T. F. Raisa Popova, "Real-world application of sustainable mobility in urban micro smart grids," vol. 1, pp. 1–6, 2023.

- [22] G. Reyes Calderon, "Armónicos en sistemas de distribución de energía eléctrica," Universidad Autónoma de Nuevo Leon, Nuevo Leon, 2015.
- [23] D. H. Cárdenas Villacrés, C. F. Chávez Córdova, and N. R. Layedra Quinteros, "Estabilidad de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica Monofásicas de Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap en Estado Estable," *INGENIO*, vol. 4, no. 1, pp. 17–26, Jun. 2021, doi: 10.29166/ingenio.v4i1.3067.
- [24] N. Granda and H. Arcos, "Estudio de estabilidad de voltaje para el sistema nacional interconectado ecuatoriano," pp. 1–11, 2017.
- [25] C. A. Vásquez Barba, "Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basada en el perfil de tensión de sistemas de distribución eléctrica," pp. 1–20, 2016.
- [26] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kerala Section. IA/IE/PEL Joint Chapter, IEEE Industry Applications Society, IEEE Power Electronics Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE PESGRE 2020: IEEE International Conference on "Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy": 2-4 Jan 2020, Le Méridien Cochin, Kerala, India.
- [27] IEEE Power & Energy Society.
 Malaysia Chapter, IEEE Power &
 Energy Society, and Institute of
 Electrical and Electronics
 Engineers, 2018 IEEE PES AsiaPacific Power and Energy
 Engineering Conference
 (APPEEC): 7-10 Oct. 2018.
- [28] Institute of Electrical and
 Electronics Engineers, Yıldız
 Teknik Üniversitesi, IEEE Power &
 Energy Society, IEEE Industrial
 Electronics Society, and IEEE
 Industry Applications Society,

- SEST' 20: 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies: 7-9 September, 2000.
- [29] J. Ren, L. Zhang, L. Jin, and Y. Chen, "Operation optimization and analysis of office building integrated energy system considering comprehensive demand response of heat and electricity," *Proceedings 2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy, ACFPE 2022*, pp. 237–241, 2022, doi: 10.1109/ACFPE56003.2022.995227 3.
- [30] A. M. López Tapia, "El control automático de generación AGC en el SNI como un servicio complementario.," 2003.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 14: Matriz de estado del arte.

REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN INVERSOR DE FUENTE Z MEJORADO BASADO EN TRANSFORMADOR CON ALTO IMPULSO Y CONTROL ENTRELAZADO. RESTRICCIONES SOLUCIÓN PROBLEMA PROPUESTAS PARA TEMÁTICA DATOS FUNCIONES DEL PROBLEMA RESOLVER EL PROBLEMA PROPUESTA OBJETIVO rÍTULO DEL ARTÍCULO Mejora del Perfil de Voltaje Factor de Sensibilidad Fopología de la Red Distorsión Armónica Distribución Algoritmo de Simulac "Harmony Search" Control Entrelazado Distribución Perfil de Voltaje Generación Distribu Fotovoltaica Perfil de Voltaje e Distribución Sistema Eléctricos Distribución Redes Neuronal Artificiales Control de Tirist Inversor Fuente T Mejorado ritmo de Simu Heurístico Inversor Fuente AÑO International Conference on Electrical, Electronics, and X X X П X \mathbf{x} X X П \mathbf{x} Optimization Techniques Determinación de la Respuesta Dinámica v Estacionaria de la × × × 2016 × \mathbf{X} П П П П П П П X × П П 2 Frecuencia frente a Desbalances П П П П П П de Potencia Producidos por Perturbaciones en la Red Componentes armónicas en redes de distribución eléctricas: X × × × X × X 3 Conceptos, normas vigentes en Chile y alternativas de solución al problema. Mejoramiento del perfil de voltaje en sistemas de distribución mediante la 4 2022 implementación de un algoritmo X X \mathbf{x} \mathbf{x} × \mathbf{x} X genético enfocado en la ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida Mejoramiento del perfil de voltaje en alimentadores críticos incorporando restauradores de 5 2023 × X × X X X × X × × × X X voltaje dinámicos mediante el modelo de control de retroalimentación Regulación de frecuencia y 2014 X X X X X X × X X X X X potencia

REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN INVERSOR DE FUENTE Z MEJORADO BASADO EN TRANSFORMADOR CON ALTO IMPULSO Y CONTROL ENTRELAZADO. FORMULACIÓN DEL RESTRICCIONES PROPUESTAS PARA SOLUCIÓN PROBLEMA TEMÁTICA DATOS FUNCIONES DEL PROBLEMA RESOLVER EL PROBLEMA PROPUESTA ORIETIVO **LÍTULO DEL ARTÍCULO** Factor de Sensibilidad Estabilidad de Valores Voltaje en el Sistema Máximo Aprovechamie de Energía / Recurso Inversor Fuente Tipo Distorsión Armónica Distribución Control Entrelazado Distribución Generación Distribu Fotovoltaica Sistema Eléctricos Distribución Perfil de Voltaje Redes Neuronal Artificiales Mejora del Perfil de Control de Tirist Perfil de Volts Distribució Ĭ Control Automático de X \mathbf{x} × Generación - Caso Uruguay (AGC) Modelamiento del convertidor 7 П X X X X × × П X × X П X × П П X 2018 П П П П como fuente inversora trifásica de Modified trans-Z-sourse inverter X 2016 П X × × × × × X X X X X П \mathbf{x} П × X П × whit continuous input current and improved boost factor Incentivo a la generación X 2018 89 X X X X X \mathbf{X} \mathbf{X} X 10 distribuida en el Ecuador Data Mining-based Multiobjective Economic Dispatching X X X X X \mathbf{x} of Distribution Network with Distributed Generation and Electric Vehicle Demand Side Management and Economic Analysis Using Battery П X П X П × П П П П П П П П Storage System (BSS) and Solar Performance Improvement of Radial Distribution Network with Distributed Generation X × X X П X X Integration Using Extended Particle Swarm Optimization Algorithm Optimal placement of DG in radial distribution systems based \mathbf{x} X \mathbf{x} X \mathbf{x} П \mathbf{x} П on new voltage stability index under load growth

X

※ │ □ │ □

Parallel Operation of Transformer-Based Improved Z-

Source Inverter with High Boost and Interleaved Control

2022

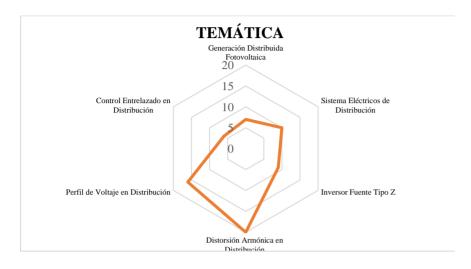
П

X

REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN INVERSOR DE FUENTE Z MEJORADO BASADO EN TRANSFORMADOR CON ALTO IMPULSO Y CONTROL ENTRELAZADO.

		DATOS			,	ГЕМÁ	TICA				PROB FUNC	CIÓN LEMA IONES TIVO			FRICCI S DEL OBLE				R			FAS PA L PROB						SOLU PROPU	ICIÓN UESTA	
ITEM	AÑO	ΤΓΊ ΓΙΙΟ ΒΕΙ ΑΚΤΊ CULO	CITAS	Generación Distribuida Fotovoltaica	Sistema Eléctricos de Distribución	Inversor Fuente Tipo Z	Distorsión Armónica en Distribución	Perfil de Voltaje en Distribución	Control Entrelazado en Distribución	Minimización de Armónicos en la Red	Estabilidad de los Valores de Corriente en el Sistema	Estabilidad de Valores de Voltaje en el Sistema	Elevación del perfil de voltaje	Perfil de Voltaje	Distorsión Armónica THD	Topología de la Red	Inversor Buck/Boost	Inversor Fuente Tipo Z (SZI)	Inversor Fuente Tipo Z Mejorado	Control de Tiristores	Algoritmo de Simulación Heurístico	Redes Neuronales Artificiales	Algoritmo de Simulación "Harmony Search"	Factor de Sensibilidad	Algoritmo de busqueda backtraking	Incorporar SSSC	Mejora del Perfil de Voltaje	Minimización de la Distorsión Armónica	Máximo Aprovechamiento de Energía / Recurso	Estabilidad y Balance de la Red
16	2017	Simulación del control Potencia- Frecuencia en un Sistema Eléctrico de Potencia en Matlab	1	¥	¥			¥				¥	¥	¥		æ				*				*		*			*	*
17	2022	Voltage Profile Improvement of a Multi Microgrid Interconnection Scheme using Synchronverters	1					¥	¥				¥	¥		¥	¥	*	æ								¥			¥
18	2023	Real-world application of sustainable mobility in urban micro smart grids	8		*		¥	¥		#						æ			¥										¥	¥
19	2021	Estabilidad de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica Monofásicas de Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap en Estado Estable	3	¥	¥			¥	¥	¥		¥	*	¥	¥		¥	¥					¥				æ		¥	
20	2018	Estudio de estabilidad de voltaje para el sistema nacional interconectado ecuatoriano	3		¥		¥	¥		¥			¥			¥				¥	¥									¥
21	2016	Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basada en el perfil de tensión de sistemas de distribución eléctrica	1	¥		æ	*	¥		#						*	¥										#		æ	¥
22	2022	Operation optimization and analysis of office building integrated energy system considering comprehensive demand response of heat and electricity	1	¥		¥	¥	¥		¥				¥	¥	¥	¥	4	¥								¥	¥	¥	¥
			CANTIDAD:	7	10	9	20	16	6	15	6	6	11	12	7	15	9	8	9	5	1	1	2	2	1	1	13	10	6	13

6.2 Resumen de Indicadores



FORMULACIÓN DEL PROBLEMA **FUNCIONES OBJETIVO** 16 14 12 10 8 6 4 2 0 Estabilidad de los Valores Estabilidad de Valores de Elevación del perfil de Minimización de de Corriente en el Sistema Voltaje en el Sistema voltaje Armónicos en la Red

Figura 33. Análisis gráfico de resultados de la sección temática - Estado del arte.

Figura 34. Análisis gráfico de resultados de la sección problema - Estado del arte.

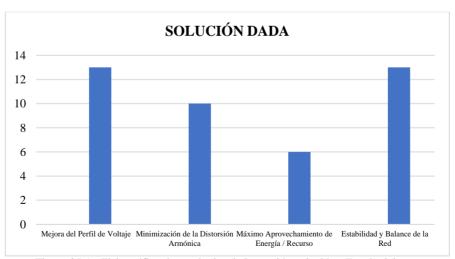


Figura 35 Análisis gráfico de resultados de la sección solución - Estado del arte.

7 Anexos

Tabla 15 Datos de voltaje RMS dados en cada barra del sistema IEEE 34.

Nombre	Nodo	Barra	Voltaje [kV]	Voltaje [p.u]
VRMS_1	1	1	14,3760	1,0000
VRMS_2	2	2	14,3613	0,9990
VRMS_3	3	3	14,3499	0,9982
VRMS_4	4	13	14,3315	0,9969
VRMS_5	5	14	14,3153	0,9958
VRMS_6	6	15	14,2999	0,9947
VRMS_7	7	16	14,2823	0,9935
VRMS_8	8	4	14,2784	0,9932
VRMS_9	9	5	14,2737	0,9929
VRMS_10	10	6	14,2715	0,9927
VRMS_11	11	17	14,2706	0,9927
VRMS_12	12	18	14,2704	0,9926
VRMS_13	13	19	14,3492	0,9981
VRMS_14	14	20	14,3478	0,9980
VRMS_15	15	21	14,3476	0,9980
VRMS_16	16	22	14,3476	0,9980
VRMS_17	17	23	14,2916	0,9941
VRMS_18	18	24	14,2847	0,9936
VRMS_19	19	25	14,2770	0,9931
VRMS_20	20	26	14,2709	0,9927
VRMS_21	21	27	14,2656	0,9923
VRMS_22	22	7	14,2596	0,9919
VRMS_23	23	28	14,2546	0,9916
VRMS_24	24	29	14,2499	0,9912
VRMS_25	25	30	14,2477	0,9911
VRMS_26	26	8	14,2468	0,9910
VRMS_27	27	9	14,2465	0,9910
VRMS_28	28	10	14,2765	0,9931
VRMS_29	29	31	14,2727	0,9928
VRMS_30	30	32	14,2707	0,9927
VRMS_31	31	33	14,2708	0,9927
VRMS_32	32	34	14,2702	0,9926
VRMS_33	33	11	14,2699	0,9926
VRMS_34	34	12	14,2698	0,9926

Barra	Valor Armónico IEEE real	Valor Armónico IEEE estandarizado
1	0,00541475	0,998950935
2	0,00541488	0,998974934
3	0,00541559	0,99910562
4	0,00541596	0,999173339
5	0,00541627	0,9992302
6	0,00541655	0,999281494
7	0,00541673	0,999315796
8	0,00541699	0,999363575
9	0,00541729	0,999419297
10	0,00541744	0,999446086
11	0,0054175	0,999456509
12	0,00541751	0,999459358
13	0,00541566	0,99911852
14	0,00541561	0,999107906
15	0,00541563	0,999113227
16	0,00541564	0,999115032
17	0,00541694	0,999353427
18	0,00541726	0,999413019
19	0,00541768	0,999491344
20	0,00541803	0,999554241
21	0,00541832	0,999608898
22	0,00541872	0,999682329
23	0,00541905	0,999742681
24	0,00541935	0,999799355
25	0,0054195	0,999826749
26	0,00541956	0,999837343
27	0,00541958	0,999840493
28	0,00541663	0,999297208
29	0,00541656	0,999284807
30	0,00541653	0,999278605
31	0,00541748	0,999453637
32	0,00541752	0,999461209
33	0,00541754	0,999464985
34	0,00541755	0,999466247