

Revisión del Impacto de la Alta Integración de Fuentes de Energía Renovable en la Calidad de la
Energía Eléctrica en Sistemas Eléctricos: Distorsión de las Señales de Tensión y Corriente

Denis Jimena Conejo Nieto y Johan David Carrillo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Johan Farith Petit Suárez

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Codirector

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Área de Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios, que fue mi fortaleza siempre, a mis padres Libia y Cesar que creyeron en mí, que me dieron la oportunidad de estudiar y ser profesional, dedico este logro a cada esfuerzo que hicieron para que no me faltará nada y que hoy son el fruto de mi triunfo, a mis hermanas Juliana y Aleja que me apoyaron y fueron mi motivación de demostrarles que los sueños se cumplen por más difíciles que sean y que ellas pueden lograr eso y más.

A mis profesores por su tiempo de dedicación en cada clase, por demostrarme a través de la exigencia que soy capaz de lograr lo que parecía imposible, con su sabiduría lograron formar una ingeniera formada en valores y conocimientos dispuesta aportar a la sociedad.

Y, por último, a mi esfuerzo y persistencia, en algunas ocasiones vinieron momentos difíciles, pero seguí y ahora me siento orgullosa de lo que logre, de quien soy, este triunfo me da demasiada felicidad y me proyecta a seguir superándome.

El tiempo de Dios es perfecto.

Denis Jimena Conejo Nieto

Dedicatoria

Dedico este trabajo con profundo agradecimiento a Dios, quien me ha brindado la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar este logro. Su guía constante y su amor inquebrantable han sido mi fuente de inspiración a lo largo de este viaje académico.

También quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi madre. Su amor incondicional, apoyo inquebrantable y sacrificios innumerables han sido el cimiento sobre el cual he construido mi vida y esta tesis, sus palabras de aliento y sus enseñanzas han sido mi brújula en momentos de duda y confusión.

A mi madre Eliana, le dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud. Sin su apoyo inquebrantable, este logro no habría sido posible. Que este trabajo sea un testimonio de mi agradecimiento eterno.

Johan David Carrillo

Tabla de contenido

Introducción 10

1. Objetivos 13

1.1 Objetivo general 13

1.2 Objetivos Específicos 13

2. Marco conceptual 14

2.1 Calidad de la energía 14

2.2 Distorsión armónica total (THD) 14

2.3 Energía eólica 16

2.4 Energía fotovoltaica (PV) 17

2.5 Electrónica de potencia para la integración de fuentes de energía renovable 19

3. Estado del arte 21

3.2 Análisis de la literatura asociada a las problemáticas presentadas por la alta
integración de energías renovables a la red eléctrica 22

3.2.1 Resonancia armónica 25

3.2.2 Operación incorrecta de los sistemas de protección eléctricos 27

3.2.3 Impacto en los transformadores 28

3.2.4 Calentamiento de conductores eléctricos 29

3.3 Retos de mejoramiento de la calidad de onda de sistemas eléctricos 30

3.3.1 Identificar y medir el porcentaje de distorsión armónica en la red 31

3.3.2 Estrategias de control para la sincronización de la energía a la red (Seguidores de vs
formadores de red) 32

3.3.3	Operación con control Jerárquico para la integración de energías renovables	34
3.3.4	Desarrollo de algoritmos de control.....	36
3.3.5	Diseño para la confiabilidad de la electrónica de potencia.....	40
4.	Caso de estudio	42
4.2	Estudio analítico de la distorsión armónica de una planta solar conectada a la red .	43
4.2.1	Modelo de la planta fotovoltaica.....	43
4.2.2	Resultados casos de estudio fotovoltaico.....	45
5.	Conclusiones	51
	Referencias bibliográficas.....	53

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Límites de distorsión de tensión IEEE 519 2022 [9]</i>	15
Tabla 2. <i>Límites de distorsión de corriente IEEE 519 2022 120 V - 69 kV [9]</i>	15
Tabla 3. <i>Límites de distorsión de corriente IEEE 519 2022 69 kV-161 kV [9]</i>	16
Tabla 4. <i>Datos del sistema fotovoltaico [52]</i>	44
Tabla 5. <i>Casos realizados [52]</i>	44
Tabla 6. <i>Resultados de Distorsión Armónica caso fotovoltaico [52]</i>	45

Lista de Figuras

Figura 1. *Alza de expansión de capacidad de renovables 2021 a 2022 AIE [15]* 17

Figura 2. *Informe de proyectos de generación de electricidad UPME [13]* 18

Figura 3. *Mercado de electrónica de potencia-Tasa de crecimiento por región (2021-2026) [18]*
..... 19

Figura 4. *Configuración de una RES típica conectada a la red con electrónica de potencia [1]* 20

Figura 5. *Criterios de filtrado de documentos para el estado del arte* 22

Figura 6. *Arquitectura de la integración de la red de energía a gran escala [1]* 31

Figura 7. *Representación simplificada de convertidores de potencia [59]. (a) Convertidor de seguimiento de red (b) Convertidor formador de red* 33

Figura 8. *Niveles del control jerárquico [81]* 35

Figura 9. *Diagrama de bloque general para el control térmico de los semiconductores de potencia [92]* 42

Figura 10. *Sistema del caso de estudio fotovoltaico [52]* 44

Figura 11. *Onda de tensión en la barra caso I [52]* 46

Figura 12. *Onda de corriente en el transformador caso I [52]* 47

Figura 13. *Onda de corriente en el transformador caso II [52]* 47

Figura 14. *Onda de corriente en el transformador caso III [52]* 48

Figura 15. *Onda de corriente en el transformador caso IV [52]* 49

Figura 16. *Barrido de frecuencia en la barra 2[52]* 50

Resumen

Título: Revisión del impacto de la alta integración de fuentes de energía renovable en la calidad de la energía en sistemas eléctricos: distorsión de las señales de tensión y corriente. *

Autor: Johan David Carrillo, Denis Jimena Conejo Nieto. **

Palabras Clave: Electrónica de potencia, energías renovables, calidad de la energía, distorsión armónica.

Descripción: En este trabajo de grado se realiza un estado del arte acerca de la alta integración de las fuentes de energía renovables que se están incorporando cada vez más en los sistemas de energía y su impacto en la calidad de la energía eléctrica. La cantidad de fuentes de energía renovable interconectadas a los sistemas de energía eléctrica se incrementará en los próximos años, y crecerá de manera sostenida con la demanda de energía eléctrica en todo el mundo. Actualmente, la energía solar y eólica se han convertido en alternativas viables, por su carácter renovable, para generar electricidad. Su integración en los sistemas eléctricos plantea diversos retos, especialmente para la calidad de la forma de onda de la tensión y de la corriente, es decir, en la presencia de distorsión de las señales y con esto su posible impacto en la red y las cargas del sistema.

* Trabajo de Grado

** Facultad Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Johan Farith Petit Suárez. Doctor en área de ingeniería eléctrica. Codirector: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en área de ingeniería electrónica.

Abstract

Title: Review of the impact of the high integration of renewable energy sources on the quality of energy in electrical systems: distortion of voltage and current signals.*

Author(s): Johan David Carrillo, Denis Jimena Conejo Nieto.**

Key Words: Power electronics, renewable energy, power quality, harmonic distortion.

Description: In this degree work, a study of the state of the art of the high integration of renewable energy sources that are being increasingly incorporated into energy systems and their impact on the quality of electrical energy will be carried out. The proportion of renewable energy sources interconnected to electric power systems will increase in the coming years and will grow steadily with the demand for electric power around the world. Currently, solar and wind energy have become viable alternatives, due to their renewable nature, to generate electricity. Its integration into electrical systems poses various challenges, especially for the quality of the voltage and current waveform, that is, in the presence of harmonics in the network and with this its possible impact on the network and system loads.

* Degree Work

**Faculty Mechanical Physics. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Johan Farith Petit Suárez. PhD in electrical engineering area. Co-director: María Alejandra Mantilla Villalobos. PhD in electronic engineering area.

Introducción

Actualmente la dependencia mundial de recursos fósiles aprovechables en cantidades que pueden ser consideradas relativamente abundantes pero finitas y no renovables, sumado a las coyunturas económicas y geopolíticas asociadas con su distribución geográfica y su dominio, han generado en muchos países la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable [1-3, 14, 27], que a su vez contribuyan a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta. Estas fuentes de energía renovables representan inmensos potenciales energéticos que pueden ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial se promueva [22-24].

La integración de las energías renovables a la red requiere la aplicación de la electrónica de potencia para su aprovechamiento, ya que los dispositivos que derivan de esta tecnología permiten convertir la energía eléctrica de corriente continua en corriente alterna, lo que la hace disponible para la red eléctrica [1, 2]. Sin embargo, la naturaleza de la electrónica de potencia acarrea un problema en la calidad de la energía eléctrica, al ser elementos no lineales ya sean de tratados como fuentes y/o cargas generan hundimientos, picos de tensión, y distorsión armónica [3, 4]; esta última se genera cuando la corriente que demandan es distorsionada lo que provoca a su vez tensiones distorsionadas debido a la impedancia equivalente de la red [1, 4].

La distorsión armónica en la red de suministro puede provocar un impacto significativo en la pérdida de la calidad de la energía eléctrica cuando la distorsión armónica total (THD), supera los límites establecidos en las normas NTC 5001-2008, IEEE 519 y en el estándar IEC-61000-3.

Los principales efectos producidos por las distorsiones de las señales de tensión y corriente se ven reflejados en problemas de calentamiento y pérdida de vida útil de transformadores, motores, conductores y demás cargas eléctricas, inexactitudes en las mediciones, efectos de resonancia y falsos disparos en los dispositivos de protección [4, 7].

Debido a esta problemática de la distorsión armónica y con el aumento de integración de fuentes de energía renovable especialmente solar y eólica [5, 15, 16, 68], se desea realizar un aporte con esta revisión del estado del arte donde se exponen los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica y las posibles soluciones para la mitigación de las perturbaciones presentadas en las ondas de tensión y corriente. Para ello, el documento se ha estructurado de la siguiente forma:

- ❖ En la sección 1 se presentan los objetivos del trabajo de grado: Revisión del impacto de la alta integración de fuentes de energía renovable en la calidad de la energía eléctrica en sistemas eléctricos: distorsión de las señales de tensión y corriente.
- ❖ En la sección 2 se documenta el marco de referencia compuesto por conceptos y normativas principales que abordan el tema de la calidad de potencia eléctrica, la distorsión armónica de las señales de tensión y corriente, tipos de energía: eólica y fotovoltaica y la electrónica de potencia requerida para la integración de fuentes renovables a la red.
- ❖ En la sección 3 se presenta el estado del arte con los diferentes artículos seleccionados, se describe el proceso de búsqueda bibliográfica y dentro del contenido de este se revisan las problemáticas causadas por la integración de las fuentes de energías renovables a la red y se identifican los retos de mejoramiento ante las problemáticas revisadas.

- ❖ En la sección 4 se muestra un caso de estudio, sobre la integración de energía fotovoltaica donde se estudia la calidad de las ondas de tensión y corriente.
- ❖ En la sección 5 se presentan las conclusiones a las que se llegaron luego de realizar este trabajo de grado.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el impacto que tiene una alta integración de fuentes de energía renovable en la calidad de las ondas de tensión y corriente en sistemas eléctricos.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión del estado del arte de las problemáticas que genera la alta integración de fuentes de energía renovable en la red eléctrica en la calidad de la energía en sistemas eléctricos.

Identificar retos asociados al mejoramiento de la calidad de la onda en los sistemas eléctricos ante la alta integración de fuentes de energía renovable.

Hacer un estudio de calidad de las ondas de tensión y corriente sobre la incidencia de las fuentes de energía renovable en los sistemas eléctricos.

2. Marco conceptual

2.1 Calidad de la energía

Según la norma NTC 5001-2008 la calidad de la potencia eléctrica se define como el conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad, es decir que comprende esencialmente el estudio de las formas de onda de tensión y corriente en donde se estudian tanto las variaciones como las distorsiones que pueden afectar la condición ideal de onda puramente sinusoidal, estas características son evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros técnicos de referencia dispuestos por las normas NTC 5001-2008, IEC 61000-2012 y la IEEE 519 2022 [8-10].

2.2 Distorsión armónica total (THD)

Es un parámetro que se utiliza para cuantificar el nivel de componentes armónicas en las formas de onda de tensión y/o corriente, así mismo, se mantienen dos conceptos que ayudan ampliar la función de este indicador. La primera definición THD_F brinda una idea cuantitativa del contenido armónico de una forma de onda comparándola con su fundamental, la segunda definición THD_R da igualmente un valor del contenido armónico de una forma de onda que se compara con el valor RMS de la forma de onda [11].

La gestión de la distorsión de señales de tensión y corriente (componentes armónicas) en un sistema de potencia es considerada una responsabilidad que integra tanto a propietarios u operadores de la red como a usuarios finales, estos requieren mantener niveles admisibles de distorsión armónica, por lo que se requiere trabajar en conjunto para no sobrepasar límites que perjudiquen la calidad del servicio de energía eléctrica [12, 21]. La norma IEEE 519, limita las

distorsiones armónicas tanto en tensión como en corriente [1], para que en caso tal de que no se cumpla se realice modificaciones que corrijan este factor.

Los límites contemplados e incluidos en la regulación colombiana son establecidos por el estándar IEEE 519 (ver tablas 1 a 3).

Tabla 1.

Límites de distorsión de tensión IEEE 519 2022 [9]

BUS VOLTAJE V AT PCC	INDIVIDUAL HARMONIC (%) $H \leq 50$	TOTAL HARMONIC DISTORTION THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

Tabla 2.

Límites de distorsión de corriente IEEE 519 2022 120 V - 69 kV [9]

MAXIMUM HARMONIC CURRENT DISTORTION IN PERCENT OF I_L						
$\frac{I_{sc}}{I_l}$	INDIVIDUAL HARMONIC order^b					TDD
	$2 \leq h < 11^a$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

^a For $h \leq 6$, even harmonics are limited to 50% of the harmonic limits shown in the table

^b Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

^c Power generation facilities are limited to these values of current distortion, regardless of actual

$\frac{I_{sc}}{I_l}$ unless covered by other standards with applicable scope.

I_{sc} = maximum short – circuit current at PCC

I_L = máximo demand load current at PCC under normal load operating condition

Tabla 3.

Límites de distorsión de corriente IEEE 519 2022 69 kV-161 kV [9]

$\frac{I_{sc}}{I_L}$	MAXIMUM HARMONIC CURRENT DISTORTION IN PERCENT OF I_L					TDD
	INDIVIDUAL HARMONIC ORDER (ODD HARMONICS) ^{a,b}					
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
$< 20^c$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

^a Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above

^b Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

^c All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of

actual $\frac{I_{sc}}{I_L}$

I_{sc} = maximum short – circuit current at PCC

I_L = maximum demand load (fundamental frequency component) at the PCC under normal load operating conditions

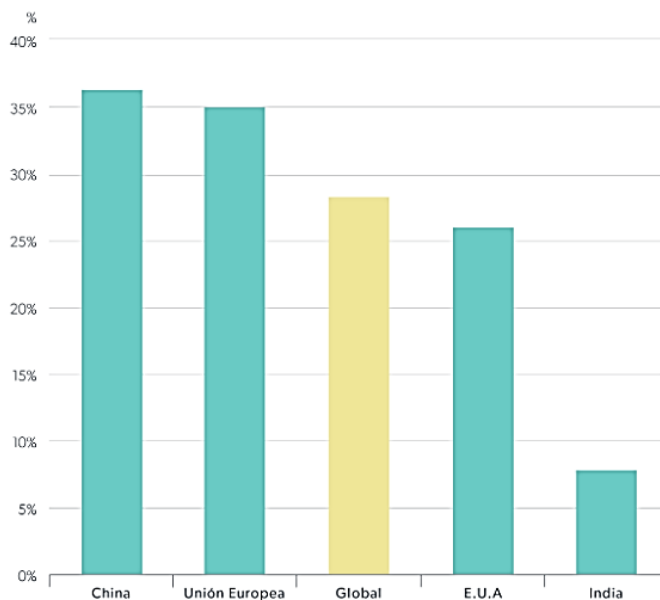
2.3 Energía eólica

Es aquella que se genera a partir del viento y se produce por la diferencia en la presión de aire en distintos lugares, así mismo se aprovecha la energía cinética del viento por medio de aerogeneradores [14,23]. La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable integradas con mayor crecimiento en el mundo, se considera una energía abundante ya que está disponible en la totalidad del planeta, lo que contribuye a reducir las importaciones energéticas [5, 22, 23, 27].

En Colombia se desarrollarán grandes proyectos eólicos en áreas de alto potencial como la Guajira que se considera un nicho de oportunidad que le aportaría beneficios al país [13]. Colombia debe realizar una transición energética ya que el país depende hoy en día en un 75% en promedio en términos de generación a partir de fuentes convencionales, se prevé que en 2030 la capacidad eólica terrestre de Colombia alcance los 32 GW actualmente se cuenta con la aprobación de proyectos de generación eólica por 6671 MW [13,17] y a nivel mundial se espera que el sector eólico mundial se multiplique por siete de aquí a 2032 [14] llegando al orden de los Teravatios (TW) y representa el 26% de la capacidad total en los próximos diez años destacándose los países europeos, E.U.A, India y China, como se muestra en la Figura 1 [15].

Figura 1.

Alza de expansión de capacidad de renovables 2021 a 2022 AIE [15]



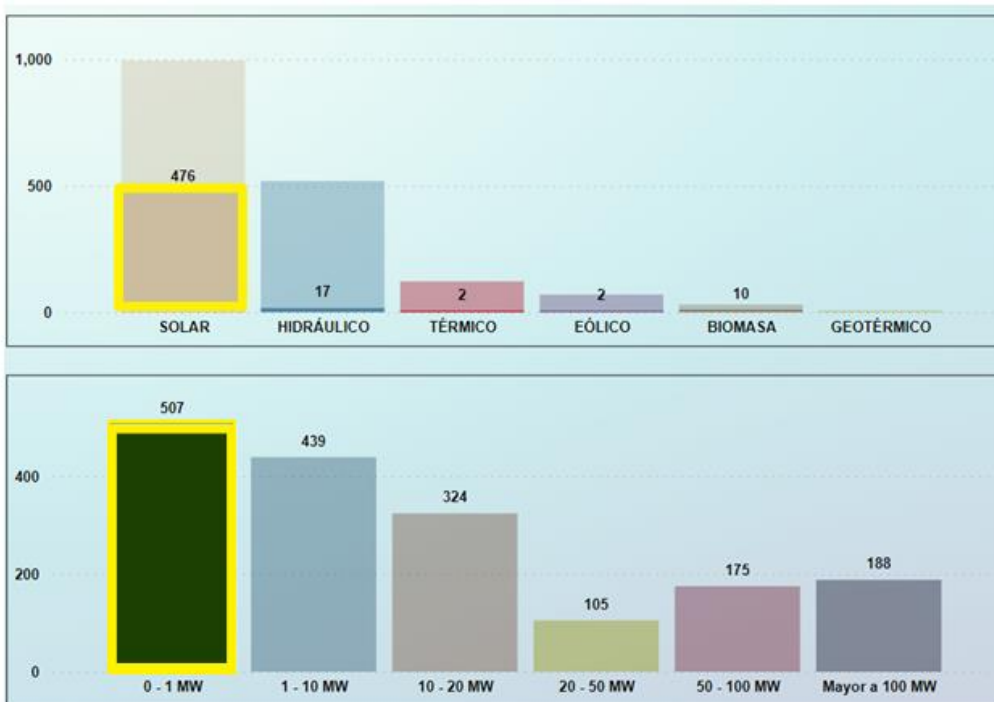
2.4 Energía fotovoltaica (PV)

Es una fuente de energía renovable que por medio de la radiación solar se produce electricidad que consiste en la conversión de energía lumínica en energía eléctrica. Este proceso

en donde el electrón se mueve es debido a al fenómeno en el que las partículas de luz llamadas fotón, impacta con los electrones de un metal arrancando sus átomos [6,16,22]. La energía solar es la que mayor penetración ha tenido en la red eléctrica ya que por su fácil adquisición se puede lograr impactos positivos, como son el permitir a los usuarios generar su propia energía, por lo tanto, pueden realizar un control de su consumo diario y no estar sujetos a la volatilidad del mercado de energía eléctrica a cuál corresponda. Colombia presenta un gran incremento de proyectos prescritos a la fecha 2023 de este tipo de fuentes distinguiéndose una mayor participación los proyectos entre 0- 1 MW (Ver figura 2), [13,17].

Figura 2.

Informe de proyectos de generación de electricidad UPME [13]



A nivel mundial se espera que la capacidad renovable fotovoltaica aumente alrededor de 2,400 GW entre 2022 y 2027 pronosticado por la AIE (Agencia Internacional de Energías), destacándose nuevamente China, Europa, Estados Unidos e India [15]. Este crecimiento en el

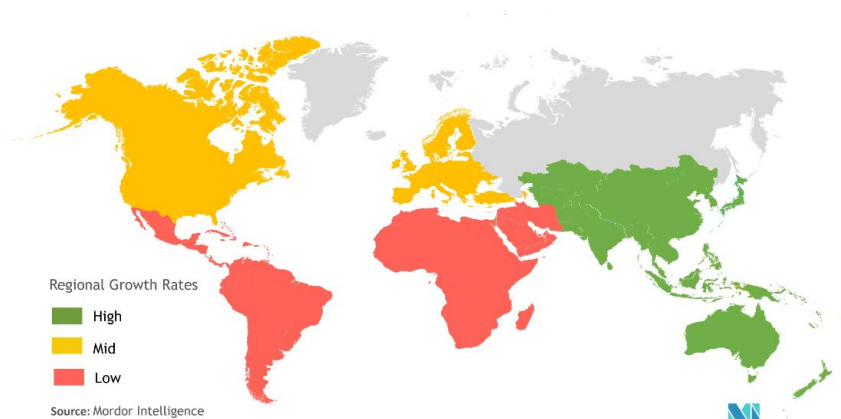
continente europeo se debe a que los altos precios de los combustibles fósiles y la electricidad resultante de la crisis energética mundial han hecho que las tecnologías renovables sean mucho más atractivas económicamente y debido a la invasión de Rusia a Ucrania ha provocado que los importadores de combustibles fósiles, especialmente en Europa, valoren cada vez más los beneficios de seguridad energética que las energías renovables y promuevan el desarrollo de estas [15].

2.5 Electrónica de potencia para la integración de fuentes de energía renovable

Los productos de electrónica de potencia se han integrado en todo tipo de aplicaciones de procesos de la conversión de energía desde la generación hasta la distribución y, en última instancia, el consumo. Su notable crecimiento tecnológico prevé que el mercado de la electrónica de potencia sea testigo de una tasa compuesta anual de 4,62 % durante el período de pronóstico (2021 - 2026) en el mundo [18].

Figura 3.

Mercado de electrónica de potencia-Tasa de crecimiento por región (2021-2026) [18]



Los convertidores de electrónica de potencia tienen como propósito transferir cantidades variables de energía renovable a la red con una amplitud de tensión constante y una frecuencia fija planteándose tareas como:

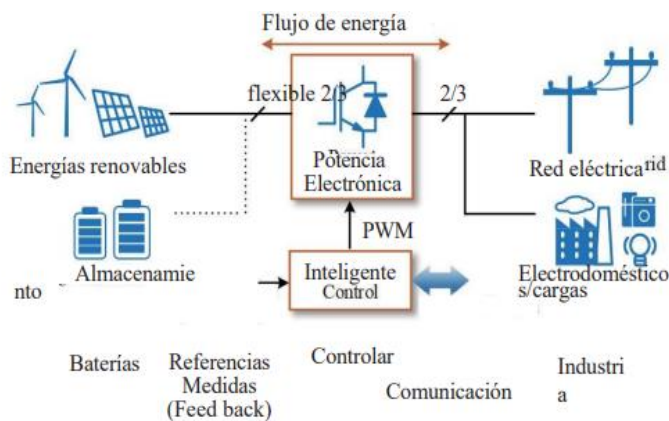
- Minimizar las pérdidas de la energía suministrada por las fuentes de energía renovable [18].
- Los dispositivos semiconductores y las topologías para implementar deben tener la mayor eficiencia, alta densidad de potencia, alta fiabilidad; todo a un valor viable económicamente [1,18].
- Brindar apoyo a la red eléctrica controlando potencia y gestionando energía [19].

Para la integración de fuentes de energía es necesario considerar los requisitos no solamente de las fuentes renovables sino también lo que debe cumplir la red eléctrica tanto en transmisión como en distribución de energía eléctrica [20].

En la Figura 4 se da a conocer la estructura básica de conexión de los principales elementos que intervienen en la distribución de energía eléctrica con fuentes de energía renovables (Renewable Energy Sources RES) [1].

Figura 4.

Configuración de una RES típica conectada a la red con electrónica de potencia [1]



Estos sistemas eléctricos requieren de una mayor atención en calidad de la electricidad ya que son sensibles a las alteraciones provocadas principalmente por la electrónica de potencia que es la fuente potencial de distorsiones de las señales de tensión y corriente [12, 19, 20].

Partiendo de estos conceptos generales e importantes para este trabajo de grado se presenta a continuación el estado del arte del impacto de la alta integración de energía renovables en la calidad de las ondas de tensión y corriente, las problemáticas presentadas y los retos a enfrentar ante estos nuevos escenarios.

3. Estado del arte

Para el desarrollo del trabajo de grado se realiza una revisión sistemática de literatura que permite la estimación y el análisis de información disponible sobre el impacto que tiene una alta integración de fuentes de energía renovable en la calidad de las ondas de tensión y corriente en sistemas eléctricos con el fin de proporcionar una síntesis de las investigaciones existentes que permita identificar las problemáticas presentadas y las posibles soluciones.

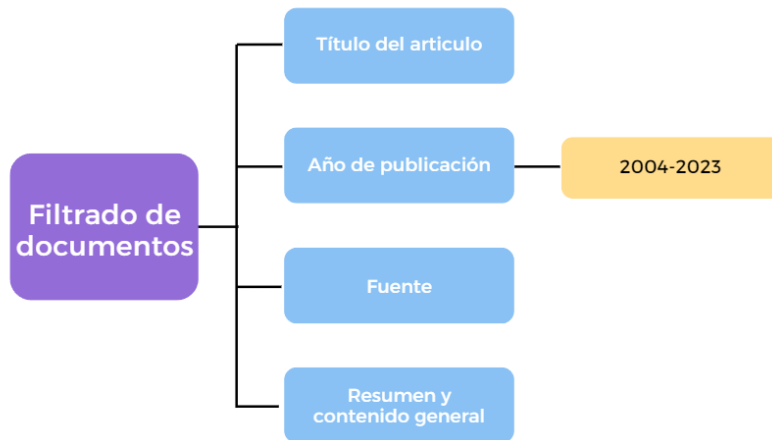
Para la selección de documentos, se realizó inicialmente una búsqueda bibliográfica en las bases de datos electrónicas disponibles en la Biblioteca virtual de la Universidad Industrial de Santander – UIS: IEEE/IEE ELECTRONIC LIBRARY, SCIENCE DIRECT, SPRINGER LINK, ICONTEC; sumado a esto, se utilizaron otras fuentes de información desde Google como ReserchGate y revistas de ingeniería, utilizando las siguientes palabras claves: *Power quality, power electronics, harmonics, voltage and current distortion, wind and photovoltaic energy, power inverter, high-level penetration, renewable energy.*

Una vez terminado el proceso de búsqueda, se prosiguió a seleccionar los documentos que incluyen información relevante siguiendo los criterios descritos en la Figura 5. Un mayor detalle

de los documentos seleccionados siguiendo los criterios descritos, se puede encontrar en el anexo 1.

Figura 5.

Criterios de filtrado de documentos para el estado del arte



Nota: (2023) Autoría propia

A continuación, se analizan algunos de los documentos una vez realizado el proceso de filtrado. Para una mejor organización de estos documentos, se divide el análisis en dos partes; la primera parte está asociada a las problemáticas presentadas por la alta integración de energías renovables y la segunda parte está asociada a los retos de mejoramiento de la calidad de onda de sistemas eléctricos.

3.2 Análisis de la literatura asociada a las problemáticas presentadas por la alta integración de energías renovables a la red eléctrica

El componente primordial para la integración de los sistemas de energía renovable fotovoltaicos y eólicos a la red es el convertidor electrónico de potencia, pero debido a su comportamiento no lineal, al interactuar con el sistema eléctrico en el punto de acoplamiento

común (Point of Common Coupling - PCC en inglés) puede introducir distorsiones indeseables de las formas de onda de las señales de tensión y de corriente; convirtiéndose en uno de los mayores desafíos de la actualidad [2, 24, 28, 47]. La distorsión también puede generarse por la no linealidad de las cargas conectadas al sistema eléctrico, y una forma de diferenciar la causa de la distorsión es analizando las frecuencias presentes en el sistema [21, 25, 26, 69]. Por ejemplo, es común que las frecuencias presentes en los inversores de potencia estén relacionadas con la frecuencia portadora del control PWM, mientras que una carga no lineal tiene más asociada frecuencias múltiples de la frecuencia de la red eléctrica.

Para evaluar las distorsiones de las formas de onda de las señales de tensión y corriente en la red eléctrica, se emplea el análisis de flujos de cargas con armónicos, el cual permite estimar la distorsión armónica total (THD en inglés). Este flujo se puede realizar tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo, sin embargo, el basado en el dominio de la frecuencia presenta ventajas a la hora de considerar tiempos de simulación y menor complejidad en los modelos utilizados. La solución del flujo de carga se basa en resolver el sistema eléctrico por medio de la técnica del análisis nodal, descrito por un sistema de ecuaciones como el dado en la ecuación 1, donde Y_n es la matriz de admitancia del sistema, V_n es la tensión de nodo e I_n es la corriente neta inyectada al nodo n [29]. Dicha formulación matemática permite entre otras cosas realizar diferentes tipos de estudio, como por ejemplo el relacionado con la respuesta en frecuencia, que permite detectar posibles resonancias mediante el cálculo de la tensión al inyectar una corriente sinusoidal por unidad a diferentes frecuencias en una barra de interés [30]. En el caso de estudios que requieran la estimación de las componentes armónicas de las tensiones, la práctica típica es considerar los dispositivos generadores de armónicos como fuentes de corriente ideales. La

corriente inyectada por una fuente de corriente ideal suele ser considerada como invariante con la impedancia vista desde el punto de conexión con sistema al que está conectada, y no se ve afectada por la conexión de otras fuentes que introduzcan distorsión armónica en la red [28, 29].

$$[Y_n][V_n] = [I_n] \quad \text{Ecuación 1}$$

Por otro lado, el análisis armónico en el dominio del tiempo se realiza mediante la integración de las ecuaciones diferenciales, estas describen la dinámica del sistema eléctrico una vez que la respuesta transitoria haya transcurrido y se encuentre el estado estacionario periódico [30]. Para la descripción general de elementos no lineales y variantes en el tiempo se realiza en términos de la ecuación 2 donde x es el vector de estado de n elementos:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad \text{Ecuación 2}$$

Luego se construye la matriz de admitancia general del sistema con la ecuación matricial mostrada en la Ecuación 3 donde A es la matriz de estado de tamaño $n \times n$, B es la matriz de control o de entrada de tamaño $n \times r$ y u es el vector de entrada de dimensión r [30] y se resuelve en cada paso de tiempo para las cantidades deseadas del sistema. La solución convencional para este sistema se basa en la integración numérica de la Regla Trapezoidal.

$$\dot{x} = [A]x + [B]u \quad \text{Ecuación 3}$$

Con estos métodos de análisis se evalúa la distorsión armónica presente en los sistemas de potencia, estos resultados permiten analizar el estado de la calidad de la energía en la red, en el caso que los valores obtenidos de la de distorsión armónica superen los porcentajes permitidos en las normas [8 – 10] existirán problemas asociados a: **resonancia armónica, operación incorrecta en los sistemas de protección eléctricos, impacto en los transformadores y**

calentamiento de conductores eléctricos [26, 49]. A continuación, se detallan los problemas mencionados:

3.2.1 *Resonancia armónica*

La resonancia armónica en la integración de sistemas de generación renovable a la red se hace presente cuando la frecuencia armónica producida por una carga no lineal (convertidor de potencia) coincide con la frecuencia natural del sistema de potencia [34, 36], la cual está asociada con los componentes del sistema, como transformadores, líneas de transmisión y capacitores.

La resonancia relaciona la impedancia de la red eléctrica en función de la frecuencia. Al tener en la red elementos que sus valores dependen de la frecuencia como lo son las inductancias y las capacitancias, cuyos comportamientos son totalmente opuestos, el comportamiento de la impedancia con respecto a la frecuencia puede presentar variaciones importantes tanto en magnitud como en ángulo de fase a diferentes frecuencias [36, 73].

Comúnmente, para representar de manera general la impedancia de las redes eléctricas desde algún punto, se hace por medio de una impedancia equivalente, la cual está constituida por los elementos resistivos, inductivos y capacitivos que conforman la red original. Dicha impedancia equivalente se compone de una parte real y una parte imaginaria como se observa en la ecuación 4.

$$Z_{eq} = R + j(X_L - X_C) \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde la parte real R corresponde a la parte resistiva, mientras que la parte imaginaria conformada por X_L y X_C corresponden a los elementos inductivos y capacitivos respectivamente.

Estas últimas definidas como reactancia inductiva en la ecuación 5 y reactancia capacitiva en la ecuación 6, sus valores dependen de la frecuencia:

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad \text{Ecuación 5}$$

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad \text{Ecuación 6}$$

Siendo L el valor de la inductancia y C el de la capacitancia. Cuando la parte imaginaria de la impedancia es cero, es decir, que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales a una determinada frecuencia se dice que la red entra en resonancia y a la frecuencia en donde se produce el fenómeno se le conoce como frecuencia de resonancia [32].

Esto ocasiona que en condiciones de resonancia la impedancia en un nodo pueda aumentar súbitamente, de esta forma es posible que se generan dos tipos de resonancia:

El primer tipo es la resonancia en paralelo donde la impedancia de un circuito se vuelve extremadamente alta, lo que conduce a una sobretensión. En un caso extremo, incluso cuando una corriente armónica es relativamente pequeña puede causar picos de tensión destructivamente altos a la frecuencia de resonancia [32]. Y el segundo tipo es la resonancia en serie donde la impedancia del circuito es mínima, por lo tanto, la corriente es máxima para un valor dado de tensión [32, 36].

Este aumento en las amplitudes de las ondas de tensión y corriente puede tener varios efectos negativos en la red eléctrica, como la sobrecarga de equipos, el deterioro del aislamiento de los cables eléctricos, la generación de ruido eléctrico [35]. Los armónicos generados por resonancias se han observado cada vez con más frecuencia en sistemas reales [33], lo que no solo provoca problemas de compatibilidad o mal funcionamiento, sino incluso la destrucción de inversores u otros equipos en casos extremos [64].

3.2.2 *Operación incorrecta de los sistemas de protección eléctricos*

Los dispositivos de protección están diseñados para detectar y actuar ante situaciones anormales, como cortocircuitos, sobrecargas, fallas, condiciones de sobre corriente, eventos transitorios de sobretensión y baja tensión que ocurren en los sistemas de potencia. Sin embargo, la presencia de distorsión armónica producida por la naturaleza no lineal de los convertidores electrónicos de potencia afecta la capacidad de funcionamiento de las protecciones eléctricas ya que la adición masiva de distorsión de tensión y corriente infiere en la inexactitud de las mediciones con las cuales operan estos dispositivos de protección colocando en riesgo la seguridad de las personas y los equipos [26, 39].

Los relés de protección toman las medidas desde los transformadores de tensión y corriente y a partir de estos se analizan los puntos críticos de falla, pero estos equipos se ven afectados por condiciones de saturación debido a la presencia de armónicos y, en muchos casos cuando están saturados no brindan un óptimo funcionamiento y causan operaciones no deseadas siendo otro de los problemas más preocupantes. La mala calidad de la energía puede afectar negativamente el rendimiento de los sistemas de protección [37]. La distorsión armónica producida por los convertidores electrónicos de potencia puede dificultar la detección de fallas eléctricas y la operación de los sistemas de protección eléctrica. La distorsión armónica puede hacer que los sistemas de protección eléctrica no detecten las fallas eléctricas o que detecten falsas fallas eléctricas, lo que puede causar la desconexión innecesaria de los equipos y un aumento en los costos de mantenimiento [38].

En relés de protección diferencial, la distorsión armónica puede hacer que la corriente de entrada y salida de la línea de transmisión no coincida, lo que puede activar la protección de corriente diferencial de manera incorrecta o no activarla en caso de una falla real, por lo que sus fabricantes han tomado acciones y dentro de la función de operación incorporan la medición de la distorsión armónica y de esta manera vigilar la presencia de altos porcentajes de armónicos, y también cualquier amplificación de nivel de armónicos (resonancia armónica) [26, 71].

3.2.3 Impacto en los transformadores

El transformador es un componente vital en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Sin embargo, este equipo puede ser susceptible a distorsiones armónicas generadas por los convertidores electrónicos y la aparición de posibles resonancias [41, 48].

Estas distorsiones armónicas, adicionales a las pérdidas magnéticas por corrientes de Foucault son las que tienen mayor impacto en los transformadores de aceite, estas pérdidas son debidas a las corrientes inducidas que se producen por el flujo magnético que une los devanados primario y secundario, ocurre sobre el material ferromagnético como consecuencia de estar sometido a un campo magnético variable. Dichas corrientes reciben, también, los nombres de corrientes parásitas o de remolino, este fenómeno causa aumento excesivo de temperatura, cuando esto sucede se producen altos niveles de gases inflamables en el aceite del transformador lo que provoca una degradación acelerada de los materiales de aislamiento de los devanados y pérdidas estructurales en las piezas metálicas como en las paredes del tanque del transformador y las abrazaderas lo que representa un peligro potencial para la seguridad del sistema, de las personas y reducción de la vida útil del equipo [41, 42]. Los transformadores al ser componentes necesarios

en los sistemas de potencia deben mantenerse en normal y óptima operación ya que una falla puede provocar interrupciones en el suministro eléctrico y costosas reparaciones [43].

El impacto de la distorsión armónica en los sistemas de potencia actualmente no ha sido considerado un problema de relevancia pero con la alta integración de energías renovables este problema ha tomado importancia especialmente en los países con mayor uso de estas energías limpias [15] y es por ello que los fabricantes de transformadores ya están implementando mejoras en el diseño de estos y ajustando los sistemas de enfriamiento para que estos aumentos de temperatura no logren afectar el funcionamiento de estos equipos [72]. El estándar IEEE C57.110-2018 [46, 48, 50], se utiliza como guía para dimensionar los transformadores bajo las consideraciones expuestas.

3.2.4 Calentamiento de conductores eléctricos

Otro de los componentes principales de un sistema de potencia son las líneas aéreas y cables subterráneos. En la actualidad se utiliza ampliamente los cables XLPE, estos conductores son adecuados para rangos de tensión que van desde la baja hasta la extra alta tensión, son fabricados en cobre o aluminio y vienen en una configuración de cableado compactado; el significado de sus siglas corresponden a lo siguiente: (XL) hace referencia a Cross-Linked y (PE) polietileno que hace parte de la familia de los plásticos, en pocas palabras es un cable de polietileno reticulado, son ideales para ser utilizados en proyectos que requieren ser instalados al aire libre, subterráneos o en lugares que tienen una gran exposición a climas más fuertes [44].

Presenta una gran variedad de ventajas como lo son: peso ligero, gran resistencia al calor, gran capacidad de carga, resistencia a la corrosión, no se derrite con facilidad, mayor resistencia a la tensión, vida útil más larga, mayor resistencia a la tracción y excelentes propiedades eléctricas.

Por su características físicas y eléctricas, una línea eléctrica tiene asociada efectos resistivos, inductivos y capacitivos, los cuales se ven afectados por la presencia de distorsión armónica [44, 45, 65, 66], generando pérdida de energía, aumento de temperatura y pérdida de vida útil del conductor eléctrico [67-70]. A su vez el aumento de temperatura acelera el envejecimiento térmico de los cables, existiendo la posibilidad de que estos fallen prematuramente, llegando al punto de derretirse y provocar incendios [40, 65-67].

La pérdida de energía en los conductores es la pérdida principal en las líneas eléctricas y representa aproximadamente del 95 al 98% de la pérdida de energía total [66]; dicha pérdida por efecto Joule en la resistencia R se incrementa al aumentar el valor eficaz de la corriente debido a los armónicos, a su vez también habrá un aumento de la caída de tensión resistiva entre los cables, generando ineficiencias en el transporte de energía. Por otro lado, la inductancia L y la capacitancia C de los cables XLPE disminuye considerablemente con el aumento de los armónicos [66]. Esta gran variación puede resultar en resonancia armónica y causaría los problemas explicados en el ítem 3.1.1.

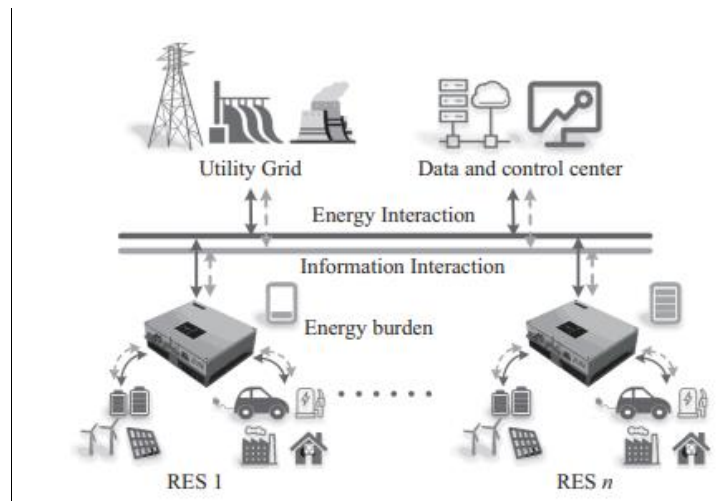
3.3 Retos de mejoramiento de la calidad de onda de sistemas eléctricos

La integración de energías renovables en la red eléctrica requiere de una gestión inteligente de la energía eléctrica generada, para poder optimizar su uso y minimizar las pérdidas de energía. La electrónica de potencia juega un papel fundamental en este proceso, ya que permite la conversión de la energía generada por las fuentes renovables en energía eléctrica utilizable por los

consumidores, a través de dispositivos electrónicos como inversores y convertidores de potencia [1, 60]. La tecnología de electrónica de potencia ha evolucionado significativamente en los últimos años, lo que ha permitido una mayor eficiencia energética y una mayor capacidad de integración de energías renovables en la red eléctrica por lo que se convierte en una pieza clave para el futuro energético de la humanidad como se muestra en la Figura 6.

Figura 6.

Arquitectura de la integración de la red de energía a gran escala [1]



A continuación, se presentan los principales retos identificados en la revisión bibliográfica de cara a la calidad de la forma de onda de las señales de tensión y de corriente ante una alta integración de generación renovables en los sistemas eléctricos.

3.3.1 Identificar y medir el porcentaje de distorsión armónica en la red.

Como primera instancia es importante saber que al integrar energías renovables a la red hay presencia de distorsión armónica de tensión y corriente originada por parte de los convertidores de potencia como se ha venido mencionando, conociendo esto, es apropiado iniciar un estudio de

análisis basados en el flujo de cargas con distorsión armónica mencionados en el ítem 3.1, con el fin de identificar y medir el porcentaje de distorsión armónica presente en la red y así poder contar con estadísticas confiables sobre la polución armónica y a su vez tomar medidas de mitigación.

Actualmente se utilizan analizadores de calidad de energía (PQ) que miden, registran y analizan todo tipo de desviaciones de tensión, corriente y frecuencia de los valores nominales. Los analizadores PQ populares vienen con pantallas integradas donde se visualiza la forma de onda de tensión y corriente en tiempo real, también muestra potencias activas y reactivas, así como factores de potencia de desplazamiento y distorsión armónica. Los analizadores de PQ generalmente comienzan a registrar interrupciones de tensión en valores del 10 %, y hundimientos y elevaciones de tensión y corrientes del 90 % y 110 % respectivamente [31].

Es importante conocer los porcentajes estipulados en las normas y estándares [8-10] para tomarlos como base y validar si los valores medidos de tensión y de corriente se encuentran dentro de rangos tolerables o no, y de esta manera evitar los problemas mencionados en la sección 3.1, el reto inicial es invertir e implementar equipos confiables para conocer el estado de la calidad de potencia de la red al realizar la integración de energías renovables.

3.3.2 Estrategias de control para la sincronización de la energía a la red (Seguidores de vs formadores de red)

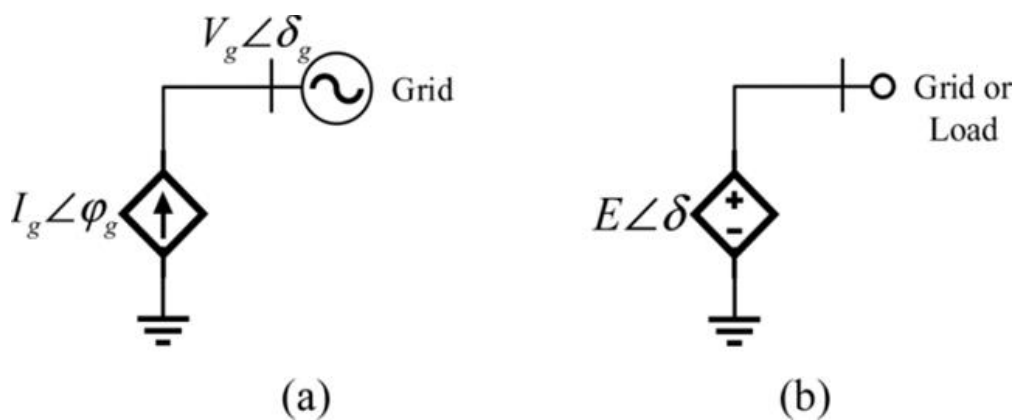
Para la sincronización de los generadores de energía renovable a la red es importante garantizar que durante este proceso la tensión, la frecuencia, el ángulo de fase y la secuencia fase sean las mismas, este es un proceso fundamental que involucra la estabilidad del sistema eléctrico.

Una correcta sincronización puede conseguirse mediante el ajuste del control de los convertidores que hacen de interfaz de las fuentes renovables, por ello existen los convertidores

de seguimiento de la red y convertidores formadores de la red (Ver figura 7), estos dos tipos típicos de control se aplican ampliamente en una red eléctrica con alta integración de fuentes de energía renovables [59, 60].

Figura 7.

Representación simplificada de convertidores de potencia [59]. (a) Convertidor de seguimiento de red (b) Convertidor formador de red.



Los convertidores de seguimiento de red funcionan como fuentes de corriente controladas que entregan energía activa y reactiva a una red previamente energizada, el control de inyección de potencia se realiza detectando o “siguiendo” la tensión de la red en el punto de acoplamiento común, con esta modalidad de funcionamiento, si se produce una falla, la tensión desciende por lo cual los inversores se desconectarán de la red y se volverán a conectar a la red sólo después que la generación se haya restablecido y estabilizado la tensión y frecuencia del sistema [60].

Por otro lado, el convertidor formador de red funciona similar al de una fuente de voltaje controlada con una baja impedancia de salida, lo que permite imponer y controlar la amplitud y la frecuencia de la tensión que se formará en el punto de acoplamiento común. Los formadores de red tienen la capacidad de operar de forma aislada, esto significa, que no necesitan estar conectados

a la red principal, con este modo de operación se logra mantener la sincronización durante las perturbaciones o cuando una nueva carga se conecta con tiempos de respuesta más rápidas. Este control también permite otras funcionalidades como lo son: la regulación de frecuencia primaria, el control de potencia reactiva, la capacidad de manejo de fallas, el apoyo durante los cortocircuitos, capacidad de inercia virtual, capacidad de funcionamiento en isla, filtrado y mitigación de armónico [59, 60].

Debido a su modo de operación y a sus ventajas los convertidores con control formadores son una estrategia prometedora para los recursos energéticos basados en fuentes de generación renovable, como la energía eólica, la energía solar fotovoltaica y los sistemas de almacenamiento con baterías, o incluso los sistemas de transmisión (High-Voltage Direct Current) HVDC, ya que logran mantener una mejor estabilidad de las redes eléctricas del futuro.

3.3.3 Operación con control Jerárquico para la integración de energías renovables

El control de los inversores puede realizarse de modo centralizado o local. En un sistema de control centralizado, se dispone de un controlador central que, en función de los datos que le llegan desde diversos puntos de la red, lleva a cabo cálculos y determina las medidas de control para todas las unidades del sistema [78-81].

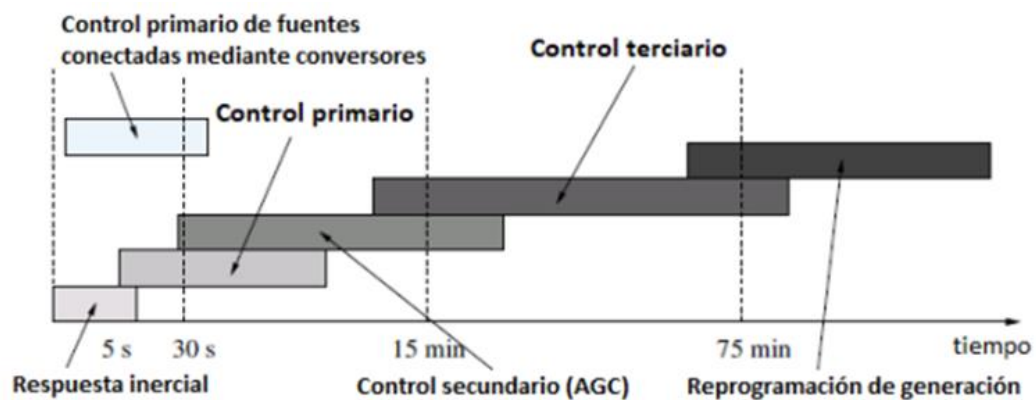
En un enfoque de control descentralizado, cada unidad se controla por un controlador local que toma acciones solo usando información de mediciones locales. Dado sus particularidades, en un sistema de control descentralizado, las unidades locales de control carecen de información detallada acerca de las diversas variables que se presentan en el sistema o de las medidas de control de los controladores asociados a otras unidades [80, 81].

Los sistemas de potencia generalmente cubren áreas geográficas extensas, una arquitectura de control completamente centralizada es ineficiente debido a los extensos requerimientos computacionales y enlaces de comunicación que requeriría el control del sistema. Asimismo, un enfoque de control descentralizado puro tampoco sería adecuado, ya que para la operación simultánea de varias unidades en el sistema se requiere de un nivel mínimo de coordinación que no se puede lograr mediante mediciones locales. En este escenario surge la arquitectura de control jerárquico, mediante la cual se puede lograr la interacción entre el enfoque de control centralizado y el descentralizado [81].

El control jerárquico se caracteriza por contar con controladores en distintos niveles, los que en su conjunto regulan la operación del sistema eléctrico de fuentes de energía controlables como un todo. Este control se divide en tres niveles como se observa en la figura 8:

Figura 8.

Niveles del control jerárquico [81]



El primer nivel tiene como objetivo principal mantener la estabilidad del sistema ante una perturbación o contingencia, se basa exclusivamente en mediciones locales y por ende no requiere

de enlaces de comunicaciones para su funcionamiento, tiene la respuesta más rápida. El segundo nivel de control tiene funciones de inspección de la calidad de suministro, compensando distorsión armónica, restableciendo el voltaje y frecuencia a sus valores nominales, sincronización a la red principal y operación confiable. Y el tercer nivel es responsable de regular los flujos de potencia entre la fuente de energía renovable y la red principal y comunicar requerimientos de apoyo en el control de frecuencia o voltaje a la red [78, 81].

Son múltiples los beneficios que se logran obtener con este método de control por lo que se convierte en un reto de mejoramiento atractivo, eficiente e innovador tanto para los generadores de energía renovable como para los operadores de la red eléctrica.

3.3.4 Desarrollo de algoritmos de control

Generalmente los inversores utilizados en instalaciones con sistemas de generación renovable tienen una serie de funcionalidades básicas, entre ellas sincronizar la salida de corriente alterna con la frecuencia y el voltaje de la red eléctrica garantizando una interconexión segura [55, 61]. Además, estos inversores son capaces de generar tanto potencia activa como reactiva, lo que contribuye a un suministro de energía estable y eficiente. En el caso específico de los inversores utilizados en generadores fotovoltaicos, cuentan con una característica adicional llamada Seguidor de Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). Esta funcionalidad tiene como objetivo optimizar el rendimiento del generador ajustando continuamente el balance entre voltaje y corriente para que los paneles solares operen en su punto de máxima potencia, esto garantiza un aprovechamiento óptimo de la energía solar disponible y maximiza la producción de energía [93].

Pero se requiere, que a medida que avanzan estas tecnologías, los inversores actuales implementen nuevas funcionalidades y algoritmos que garanticen una operación estable, confiable,

con tiempos de respuestas más rápida y que logren la mitigación de cualquier evento anormal que se pueda integrar a la red. Algunos ejemplos de estas demandas incluyen el control jerárquico, formadores de red, mitigación de armónicos, la capacidad de operar ante hundimientos y elevaciones de tensión, transitorios entre otros.

Continuando con la funcionalidad del seguidor de Punto de Máxima Potencia (MPPT), en la referencia [76] se propone una funcionalidad mejorada mediante el algoritmo Perturbación y Observación (P&O). En este algoritmo, el ciclo de trabajo de un convertidor de potencia se altera periódicamente (aumenta o disminuye), después de cada perturbación del ciclo de trabajo, el valor real de la potencia se compara con la potencia en el instante anterior $P(k-1)$. Si la perturbación resulta en un aumento de potencia, la siguiente perturbación se realiza en la misma dirección, y si conduce a una disminución de potencia, la perturbación se realiza en la dirección opuesta, este algoritmo es ideal para rastrear el punto de máxima potencia global de paneles fotovoltaicos sujetos a condiciones de sombreado parcial.

Otro caso de mejora se estudia en la referencia [83], donde se encuentra la propuesta de un algoritmo basado en la función Wavelet que permite la identificación de perturbaciones en la calidad de la energía, esta función permite descomponer una señal en diferentes niveles de energía, de esta manera se busca caracterizar e identificar el tipo de perturbación, se considera las perturbaciones de baja frecuencia, como el parpadeo y la distorsión armónica, y las perturbaciones de alta frecuencia, relacionadas con los transitorios y las caídas de tensión. Este modelo de algoritmo permitiría anticipar el análisis del estado de las señales de tensión y corriente al integrar energías renovables a la red eléctrica garantizando así que la calidad de la energía no se vea afectada.

En la referencia [84] se propone un algoritmo para el control adaptativo en el convertidor de potencia, allí se implementa un lazo de control en el que la amplitud de la tensión sigue una referencia que se corrige mediante un término proporcional a la potencia reactiva inyectada/absorbida, esta estrategia de control suele denominarse método de pendiente, una vez que se han recopilado al menos dos puntos de medición, el algoritmo encuentra los parámetros que mejor se ajustan resolviendo una función de error de minimización, con esta estrategia se logra regular la tensión en un sistema en el Punto de Acoplamiento Común (PCC). Esta propuesta proporciona un rendimiento transitorio mejorado frente a las variaciones de operación de la red, garantizando un tiempo de estabilización constante.

En la referencia [86] se propone un algoritmo predictivo, esta estrategia calcula la corriente de referencia de un filtro activo de potencia utilizado para mitigar los armónicos inyectados por cargas no lineales. La corriente se predice con un filtro de Kalman con un período de muestreo adelantado para reducir y compensar los efectos del tiempo de retardo causados por los tiempos de adquisición, el procesamiento de datos y el rendimiento del filtro, el sistema de control calcula la corriente de referencia, que el filtro debe rastrear y predice la corriente que se inyectará.

Algo parecido se propone en [82] con un algoritmo multifuncional que se centra en la calidad de las corrientes inyectadas y la inclusión de funciones de compensación de carga, corrección del factor de potencia, mitigación de armónicos de corriente y equilibrio de carga. El algoritmo propuesto se basa en la teoría de Fryze y un filtro adaptativo de Butterworth-Kalman, que estima el componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de la red y determina la referencia actual, este algoritmo logra asegurar por parte del convertidor un óptimo intercambio de energía a la red con o sin presencia de perturbaciones.

Otro algoritmo de mejora se presenta en [79] basado en una estructura de control jerárquico libre de caídas de tensión lo que asegura una estabilidad de la frecuencia, dicho algoritmo permite que el controlador garantice un despacho óptimo, control de voltaje y sincronización. El despacho es óptimo gracias al control la distribución de la energía activa y reactiva, para que sincronice correctamente a la red el controlador también detecta las tensiones a ambos lados tanto del generador renovable como de la red para garantizar que, justo antes de la conexión, para que coincidan la amplitud y la fase de estas tensiones, en caso de que no coincidan, el algoritmo lo ajusta para sincronizar ambos lados del sistema. De esta manera se puede mantener la estabilidad con condiciones seguras o adversas, en caso de ser así se ajusta para sincronizar ambos lados del sistema.

En la referencia [87] se presenta un algoritmo de control flexible que permite identificar las capacidades de soporte y las características operativas del sistema según la variación de los parámetros de control, este algoritmo permite el ajuste de las potencias de referencia, por otro lado, los parámetros de control permiten el cumplimiento de las restricciones y requisitos de operación, limitación de la corriente máxima del inversor AC, minimización de las oscilaciones de voltaje, inyección de corriente reactiva y reducción de la distorsión armónica en las corrientes inyectadas. Además, la variación de los parámetros de control suele dar como resultado diferentes capacidades de soporte, por lo que fijar sus valores es vital para alcanzar el funcionamiento deseado.

En la referencia [85] se presenta el synchronverter que propone un algoritmo con control proporcional resonante, este introduce una ganancia infinita en la frecuencia de resonancia, para eliminar el error de estado estable de las corrientes armónicas en la frecuencia que se encuentren. Esta técnica está basada en el modelo dinámico de una máquina síncrona, permite el control tanto

de potencia activa como reactiva suministrada por los convertidores de potencia mediante el Droop Control, realiza la estabilización de la tensión y la frecuencia de las fuentes de energía renovable, buscando alta calidad de potencia con el menor porcentaje de distorsión armónica total (THD), este control puede hacer parte de un control tanto centralizado como descentralizado.

Las investigaciones de nuevos algoritmos de control que mejoran las funcionalidades de los convertidores de potencia es amplio, pero a nivel comercial son pocos los equipos con algoritmos mejorados como los que se mencionan, por lo que empezar a investigarlos e implementarlos se convierte en un nuevo reto, a medida que siga aumentando la integración de fuentes renovables a la red los problemas de calidad de energía tomarán gran importancia por lo que es necesario el avance y la mejora de los algoritmos de control de los convertidores de potencia.

3.3.5 Diseño para la confiabilidad de la electrónica de potencia

La predicción de la confiabilidad es una herramienta importante para cuantificar la vida útil de un sistema o equipo, la tasa de fallas y la solidez del diseño se pueden basar en diversas fuentes de datos y modelos de predicción como el voltaje, la corriente, la temperatura, los ciclos de temperatura y la humedad [51]. Para los sistemas de electrónica de potencia, la temperatura y sus ciclos son los principales factores estresantes que afectan el rendimiento de componentes críticos para la confiabilidad en el sistema [56-58].

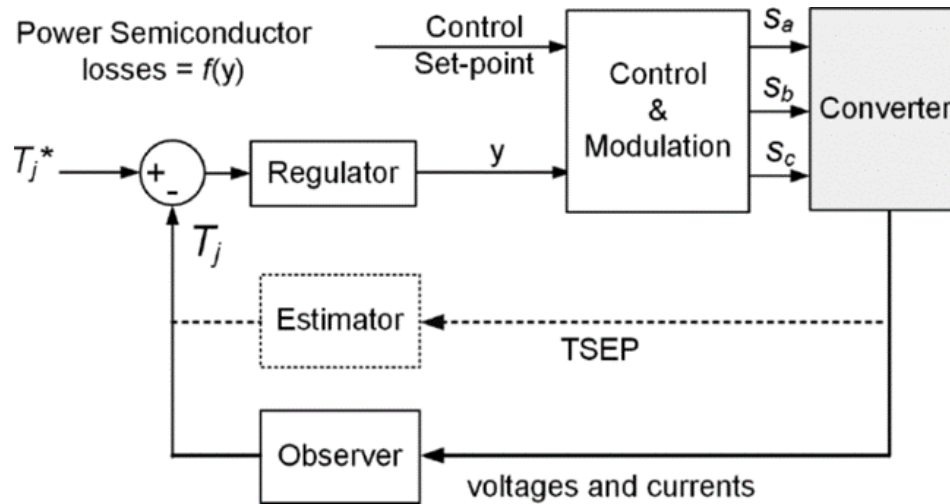
El análisis térmico de convertidores de potencia, especialmente en el caso de estructuras más complejas, como los multiniveles o multiceldas, revela que algunos de los dispositivos semiconductores de potencia pueden estar más estresados respecto a otros y esta diferencia puede ser aún más evidente en algunas condiciones particulares como los causados por fallas del sistema

[62]. Por lo tanto, la posibilidad de modificar la modulación y el control del convertidor de potencia utilizando como retroalimentación la temperatura de unión del dispositivo más estresado es una posibilidad atractiva. El enfoque más sencillo es ajustar la frecuencia de conmutación y el límite de corriente para regular las pérdidas y evitar el exceso de temperatura o reducir el cambio de temperatura [62, 63, 68, 74].

En la Figura 9 se muestra el diagrama de bloques general para el control térmico activo de los semiconductores de potencia una vez medida o estimada la temperatura de la unión, en el caso de convertidores de potencia en paralelo que presentan algunas redundancias, también es posible compartir la carga entre las diferentes unidades también con el fin de controlar la oscilación de temperatura. Otra alternativa es hacer circular potencia reactiva entre los diferentes convertidores de potencia conectados en paralelo en un convertidor de alta potencia o en un parque eólico o fotovoltaico para reducir la oscilación de temperatura en los dispositivos semiconductores de potencia más estresados [75]. La idea sólo se puede aplicar en el caso de convertidores de potencia, como los inversores de punto neutro, donde hay una distribución desigual de las pérdidas de potencia y como consecuencia de la temperatura de los dispositivos semiconductores de potencia, siendo esta diferencia aún mayor en algunas circunstancias estresantes particulares, como en el caso de cambios repentinos de energía como por ejemplo las ráfagas de viento, fallas en la red o condiciones atmosféricas variables.

Figura 9.

Diagrama de bloque general para el control térmico de los semiconductores de potencia [92]



La confiabilidad se posiciona como un indicador de rendimiento crítico en sistemas electrónicos de potencia. La investigación en este campo ha evolucionado más allá del paradigma simplista basado en una tasa de falla constante para adoptar un enfoque más completo y avanzado. Es un desafío explorar los aspectos clave para mejorar la confiabilidad de la electrónica de potencia como la implementación de procesos enfocados en la validación de la robustez de los sistemas electrónicos de potencia, y la adopción de pronósticos, gestión del estado, control térmico activo y estrategias tolerantes a fallas para garantizar una operación de campo confiable. Estos avances representan un cambio significativo y prometedor en la búsqueda de sistemas de electrónica de potencia más confiables y robustos, con aplicaciones cruciales en diversos sectores de la tecnología moderna [92].

4. Caso de estudio

A partir de artículos consultados en las bases de datos se presentan un caso de estudio analítico, de integración de energía fotovoltaica a la red y se presentan a continuación:

4.2 Estudio analítico de la distorsión armónica de una planta solar conectada a la red

Tradicionalmente, los sistemas de distribución han sido diseñados para operar de forma radial [54]. Sin embargo, con la creciente integración de generación fotovoltaica en estos sistemas, se han observado impactos significativos en la calidad de la energía debido a los convertidores de potencia [52, 53]. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis del estado de la energía antes de conectar estos sistemas a la red, con el fin de evitar interferencias en el funcionamiento del sistema.

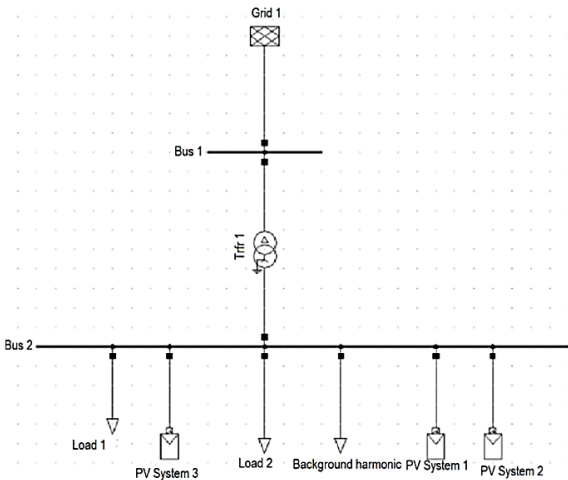
A continuación, se presenta un caso de estudio simulado que ejemplifica y proporciona una visión de los desafíos asociados al impacto de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, mediante su análisis se muestra una representación práctica de cómo la integración de sistemas fotovoltaicos puede influir en la calidad de las ondas de tensión y corriente, y destaca la importancia de analizar y mitigar estos impactos al conectarse a la red.

4.2.1 *Modelo de la planta fotovoltaica*

Para analizar el impacto de la integración de fuentes fotovoltaicas a la red en [52], se presenta un caso donde se estudia una red de distribución radial alimentada por tres plantas fotovoltaicas con capacidad de 12.5 MW conectadas a una barra de 33 kV, también se cuenta con un transformador de 10 MVA que eleva esta tensión a 66 kV como se muestra en la Figura 10 .El sistema se modela y simula utilizando el software DigSilent para evaluar la distorsión armónica total (THD) en el Punto de Acoplamiento Común (PCC) y el punto del transformador.

Figura 10.

Sistema del caso de estudio fotovoltaico [52]



En el sistema se interconectan tres (3) plantas fotovoltaicas con diferentes capacidades de generación las cuales están descritas en la tabla 4.

Tabla 4.

Datos del sistema fotovoltaico [52]

PV System 1	5 MW
PV System 2	5 MW
PV System 3	2.5 MW

En este estudio, los autores presentan cuatro (4) casos distintos en los que se varía la integración de los sistemas fotovoltaicos a la red como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5.

Casos realizados [52]

Caso de estudio 1	0 MW
Caso de estudio 2	5 MW
Caso de estudio 3	10 MW
Caso de estudio 4	12.5 MW

Por otro lado, para cada caso también se considera una cargabilidad diferente en el transformador, con el objetivo de analizar cómo influye el estado de este equipo ante la presencia de convertidores de potencia y a nivel general en la calidad de la energía en red; desarrollando la simulación con estas características se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6.

Resultados de Distorsión Armónica caso fotovoltaico [52]

Case studies	Trfr Loading in %	VHD at PCC in %	VTHD al PCC in %	ITHD at Trfr in %
Case study 1	56%	1.2%	3.9%	7.2%
Case study 2	16%	1.5%	4.4%	29.6%
Case study 3	51%	1.8%	4.9%	10.9%
Case study 4	76%	2.1%	5.5%	8.4%

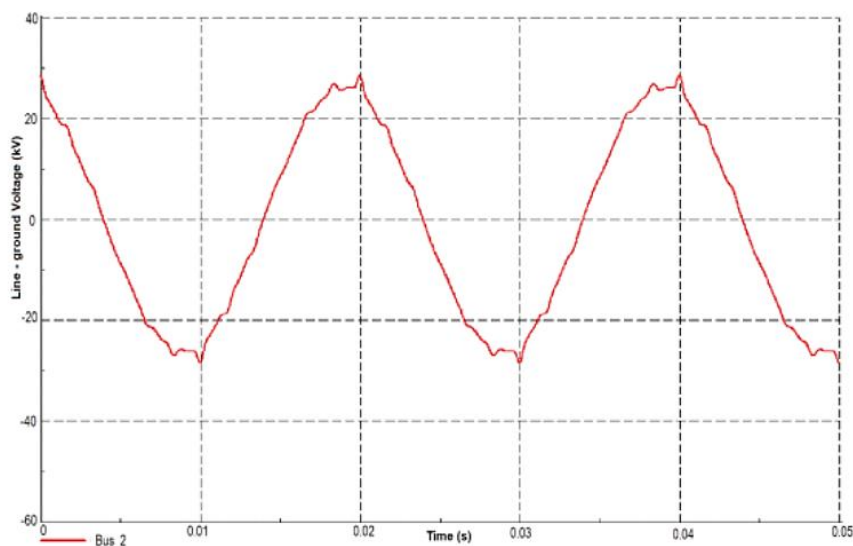
4.2.2 Resultados casos de estudio fotovoltaico

A partir de los resultados obtenidos se observa que la distorsión armónica total de tensión en el Punto de Acoplamiento Común (PCC) aumenta un 0,5 % respectivamente entre cada caso de estudio a medida que aumenta la integración de los sistemas fotovoltaicos, para el caso de estudio 4 se observa que según la normativa [8 –10] sobrepasa los límites de distorsión armónica, ya que para este caso donde la barra es de 66 kV el porcentaje permitido es de 5% y está 0,5% superando del establecido, en cuanto a la distorsión armónica de corriente en todos los casos hay gran presencia de distorsión armónica, el estudio más crítico se observa en el caso 2, la distorsión armónica de corriente en el punto del transformador está cercana al 30%, debido en parte a que la cargabilidad del transformador es baja, para que el funcionamiento de un transformador sea óptimo y el equipo tenga un buen rendimiento la cargabilidad debe ser superior al 45% sin exceder su capacidad nominal [72] y por otro lado a la presencia de armónicos generados por los convertidores de potencia.

En la figura 11 se observa la onda de tensión del caso 1 en la barra para un tiempo de 0.05 segundos, la forma de onda se observa distorsionada, pero alcanza a ser aceptable dentro de la calidad de la energía en la red, la THD de tensión que presenta es de 3.6%.

Figura 11.

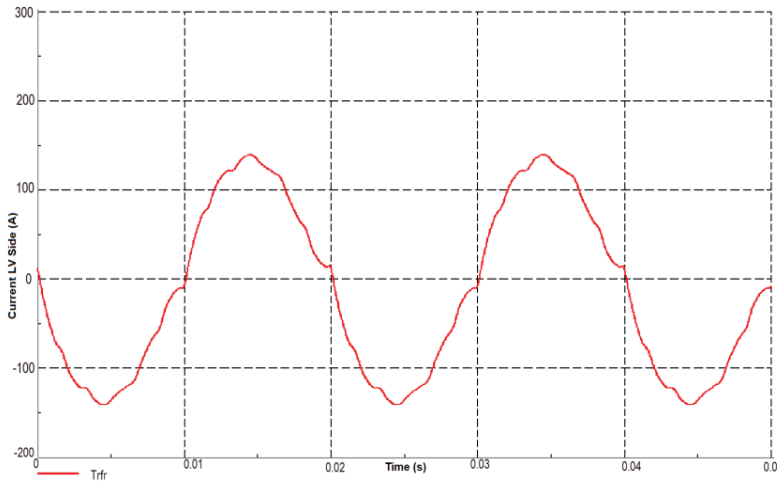
Onda de tensión en la barra caso 1 [52]



La figura 12 muestra la onda de corriente en el transformador para el caso 1, notablemente se observa deformada y la distorsión medida es del 7.2%, este valor indica que en el sistema hay alta presencia de armónicos que afectan la calidad de la energía eléctrica, es importante para estos casos tomar medidas de mitigación y evitar posibles problemas mencionados en 3.2, donde principalmente se puede considerar daños considerables en el transformador.

Figura 12.

Onda de corriente en el transformador caso 1 [52]



Para el caso 2 la onda de corriente en el transformador se observa bastante deformada (Ver figura 13), presenta distorsión armónica del 29.6%, este estudio se hizo con una cargabilidad del transformador del 16%, se puede concluir que la cargabilidad interfiere también en la calidad de la onda y sumado a esto las distorsiones presentes en el sistema.

Figura 13.

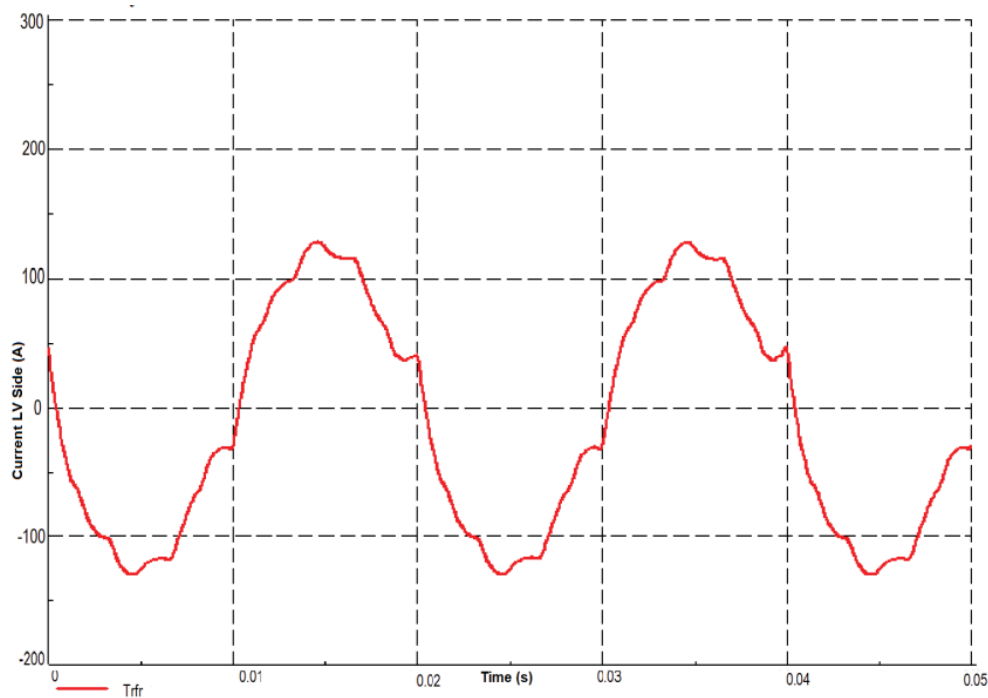
Onda de corriente en el transformador caso II [52]



Continuando, en la figura 14 se observa la calidad de la onda de corriente para el caso 3 donde la cargabilidad del transformador es del 51%, se sigue presentando alta distorsión con un valor del 10.9%, pero disminuye comparado con el caso 2, este caso hay mayor integración de energía fotovoltaica hay, por lo que esta presencia de armónicos aumenta debido a la mayor participación de convertidores de potencia.

Figura 14.

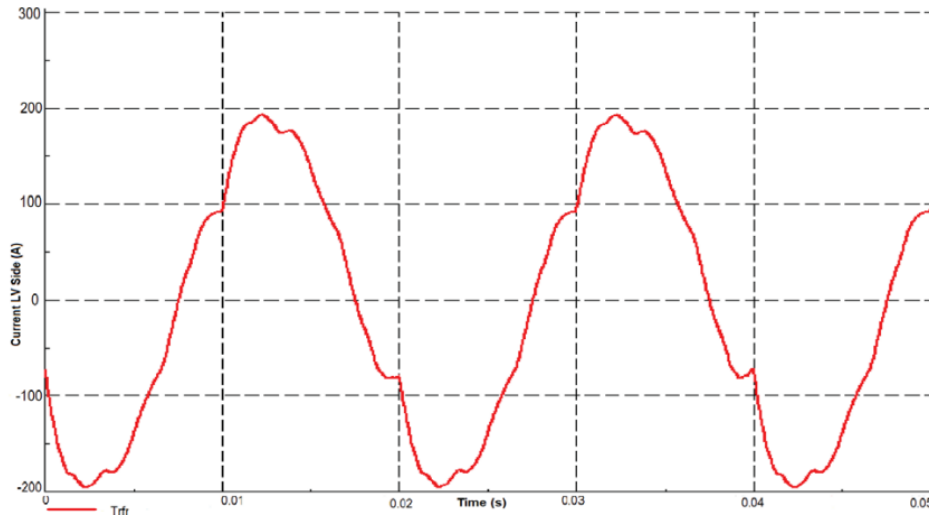
Onda de corriente en el transformador caso III [52]



Por último, analizando la figura 15 donde la cargabilidad del transformador es del 76% se observa que aún hay gran presencia de armónicos, es un caso donde a pesar de que la cargabilidad sea adecuada, la presencia de armónicos afecta notoriamente debido a que se está integrando mayor cantidad de sistemas fotovoltaicos interfiriendo en la calidad de la onda de corriente.

Figura 15.

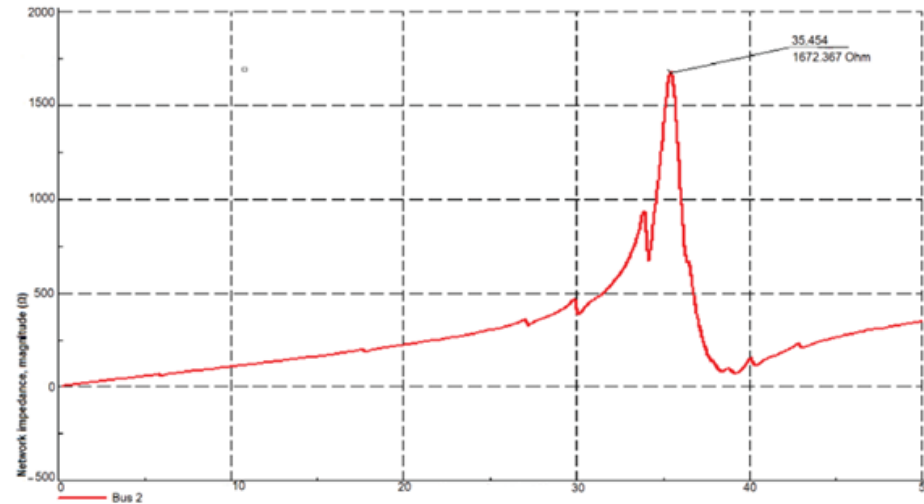
Onda de corriente en el transformador caso IV [52]



Por otro lado, se realizó un barrido de la frecuencia para determinar puntos resonantes del sistema que pueden ampliar la distorsión armónica del sistema, y se encontró que presenta efectos de resonancia en el orden armónico 35.454 con una impedancia de 1672 Ohms (Ver Figura 16), lo que hace que la tensión armónica total y el nivel de distorsión de corriente en el PCC aumenten y por esta razón los valores de THD sean más críticos, posiblemente con consecuencias como las que se mencionan en 3.2.1.

Figura 16.

Barrido de frecuencia en la barra 2 [52]



De este caso de estudio se puede concluir que el sistema integrado por paneles fotovoltaicos presenta problemas de calidad de energía que afectan a la red en el momento de interconectarse, trascendiéndolos a una mayor capacidad de generación serían mayores los inconvenientes, los resultados obtenidos dan una visión en donde se puede estimar que el transformador es el equipo mayormente afectado, este sistema debería contar con equipos de compensación que logren mitigar la distorsión armónica, además, implementar un mejor control de los convertidores de potencia para que desde su función también contribuya al mejoramiento de las ondas de tensión y corriente.

Actualmente en Colombia hay una gran inclusión de plantas solares entre 1 y 10 MW [17], este caso es idóneo para informar que, sin importar la capacidad, existen problemas que afectan la calidad de la energía y que puede causar problemas a nivel general del sistema de potencia. Los operadores de red también tienen la responsabilidad de inspeccionar y evaluar las condiciones de la energía eléctrica a integrar para que se cuente con una red eléctrica estable, confiable y segura.

5. Conclusiones

Los estudios sobre la integración de energías renovables en los sistemas de energía tradicionales resaltan la importancia de reemplazar las fuentes de generación de energía basadas en combustibles fósiles por fuentes renovables. Esta transición permite reducir la dependencia de recursos no renovables como el petróleo, que generan una gran cantidad de contaminantes y tienen un impacto significativo en el medio ambiente. Al disminuir la huella de carbono y los efectos negativos en los ecosistemas, se contribuye a la sostenibilidad y competitividad del sector energético, sin embargo, existen desafíos que requieren acciones y mejoras durante la integración de estas energías renovables para que no afecten la calidad de la energía, ya que como menciona en este proceso hay presencia de distorsión armónica por parte de los convertidores de potencia que repercuten en los demás componentes conectados a la red.

La alta integración de fuentes de energía renovable en la calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos se refiere al uso a gran escala de fuentes de energía renovable, como la solar, la eólica, la hidroeléctrica y otras fuentes limpias, en la generación de electricidad. Esta integración a gran escala tiene el potencial de afectar la calidad general de la energía eléctrica suministrada en la red. Uno de los aspectos críticos de este impacto se relaciona con la distorsión armónica de las señales de tensión y corriente.

En este trabajo de grado se pudo evidenciar que la integración de energía solar y eólica a la red genera problemáticas debido a la conexión de cargas no lineales, que distorsionan las ondas de tensión y corriente, si estos valores de distorsión armónica supera los límites recomendados en las diferentes normativas se ve afectada la calidad de la energía y por ende la eficiencia del sistema

eléctrico, el interés en este fenómeno fue mayor a partir de la década de los 90s con la inclusión de grandes proyectos de transmisión en corriente continua destacándose países europeos y asiáticos, donde actualmente se llevan a cabo mayores estudios y soluciones de la problemática.

Durante la realización del trabajo de grado, se logró recopilar la información necesaria partiendo de los objetivos propuestos. En primera instancia se investigaron los principales problemas presentados ante la distorsión de tensión y corriente tales como efectos de resonancia armónica, interferencia en protecciones eléctricas, problemas en transformadores y calentamiento en conductores que dentro de la investigación son los que mayor presencia hacen en los sistemas eléctricos, después de haber culminado ese proceso se identifican los retos de mejoramiento para mitigar el impacto que causan las distorsiones de las señales de tensión y corriente en red eléctrica ya que es importante atenuar su efecto, como se evidencio en el caso estudio se debe realizar un seguimiento y un control al nivel de distorsión armónica en los sistemas de potencia.

Actualmente se impulsa el negocio de las energías renovables ya que serán el futuro del abastecimiento energético del mundo, y al promover tanto este mercado, es un gran avance para nosotros como futuros ingenieros electricistas saber a qué retos nos enfrentaremos y tener la capacidad de poder opinar acerca del tema, a la fecha no es un problema significativo pero que a medida que se integrando estas energías renovables lo será.

Referencias bibliográficas

1. Z. Tang, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration" in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 8, no. 1, pp. 39-52, Jan. 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02850.
2. M. S. Alam, F. S. Al-Ismael, A. Salem and M. A. Abido, "High-level penetration of renewable energy sources into grid utility: challenges and solutions" in IEEE Access, vol. 8, pp. 190277-190299, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031481.
3. A. Triviño-Cabrera, M. Longo and F. Foiadelli, "Impact of renewable energy sources in the power quality of the Italian electric grid," 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Spain, 2017, pp. 576-581, doi: 10.1109/CPE.2017.7915236.
4. U. Cella, D. Serfontein, J. David and J. Crisp, "Harmonic distortion compliance assessment and renewable generators: issues and proposed update" 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Brisbane, Australia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715705.
5. S. L. Gundebommu, I. Hunko, O. Rubanenko and V. Kuchanskyy, "Assessment of the power quality in electric networks with wind power plants" 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 190-194, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160231.
6. B. N. Ch.V. Chakravarthi and G. V. Siva Krishna Rao, "impact of power quality issues in grid connected photovoltaic system" 2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 2020, pp. 155-158, doi: 10.1109/ICECA49313.2020.9297618.

7. G. Shafiullah, "Impacts of renewable energy integration into the high voltage (HV) networks," 2016 4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET), Dhaka, Bangladesh, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICDRET.2016.7421494.
8. NTC 5001:2008 Calidad de la potencia eléctrica. límites y metodología de evaluación en punto de conexión común.
9. IEEE 519-2022 Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.
10. IEC 61000-3-2:2018 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions.
11. D. Shmilovitz, "On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 526-528, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839744.
12. F. du Plessis and J. Beukes, "Influence of System Parameters on Harmonic Distortion Contributions of Renewable Power Plants," 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), Naples, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808780.
13. Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME Seguimiento a proyectos de generación en desarrollo [Informe]. Marzo 2023. [citado el 16 de abril de 2023]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento_proyectos_generacion/Informe_Avance_proyectos_Generacion_Marzo_2023.pdf
14. WORLD ENERGY TRADE. Superará energía eólica el TW mundial instalado en 2023: Wood Mackenzie [Internet]. 2023 [citado el 16 de abril de 2023]. Disponible en:

<https://energiahoy.com/2023/04/11/superara-energia-eolica-el-tw-mundial-instalado-en-2023-wood-mackenzie/>

15. Energía solar: Perspectiva 2023 en México y el mundo [Internet]. Enlight.mx. Enlight; 2023 [citado el 16 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.enlight.mx/blog/energia-solar-perspectiva-2023-en-mexico-y-el-mundo>
16. Univision P. ¿Cómo funciona un panel solar? [Internet]. Univision. 2013 [citado el 16 de julio de 2023]. Disponible en: <https://www.univision.com/explora/como-funciona-un-panel-solar>
17. Inscripción de proyectos de generación [Informe] Informe de proyectos de generación de electricidad- número de proyectos. 2023. [citado el 10 de julio de 2023]. Disponible en: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMmMyZmM1MGMtNzExZC00NzJILTk5ODAtNWUyMzYxMGMwMGYzIiwidCI6IjMzZWYwNmM5LTBiNjMtNDg3MCIhNTY1LWlzYzc5NWlxNmE1MyIsImMiOjR9>
18. Tamaño del mercado de electrónica de potencia, participación 2022 - 27 [Reporte]. Mordorintelligence.com. [citado el 25 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/power-electronics-market>
19. C. R. Sánchez Reinoso, D. H. Milone, R. H. Buitrago “Estudio de inversores fotovoltaicos Centro de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional” (SINC) – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Ciudad Universitaria UNL, 3000 Santa Fe
20. M. Hanan, X. Ai, S. Azhar, A. Azhar, A. Siddique and W. Aslam, "Harmonics analysis of grid tied solar system by employing FFT," 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet

- and Energy System Integration (EI2), Changsha, China, 2019, pp. 2382-2385, doi: 10.1109/EI247390.2019.9061905.
21. D. Kumar and F. Zare, "Harmonic analysis of grid connected power electronic systems in low voltage distribution networks" in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 1, pp. 70-79, March 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2454537.
22. Adib, R., & Zervos, A. (s/f). Executive Secretary. Ren21.net. Citado el 18 de Julio de 2023, Disponible en: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018_Full-Report_English.pdf
23. F. Ayadi, I. Colak, I. Garip And H. I. Bulbul, "Targets of countries in renewable energy" 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2020, pp. 394-398, doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242765. páginas 394-396
24. M. Shafiullah, S. D. Ahmed and F. A. Al-Sulaiman, "Grid integration challenges and solution strategies for solar pv systems: a review," in IEEE Access, vol. 10, pp. 52233-52257, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3174555.
25. Xixi Fu, Jun Wen, Tingting Liu and Cheng Ji, "Harmonic analysis on power grid of large scale PV grid-connected system" 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA), Ottawa, ON, 2014, pp. 1346-1349, doi: 10.1109/WARTIA.2014.6976532.
26. Armónicos: causas, efectos y minimización [Internet] Ramon Pinyol R&D Product Leader en SALICRU 2016. [citado el 18 de abril de 2023]. Disponible en: <http://chrome->

[extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf](https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf)

27. B. Kroposki et al., "achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy" in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 61-73, March-April 2017, doi: 10.1109/MPE.2016.2637122.
28. X. Liang and C. Andalib -Bin- Karim, "Harmonics and mitigation techniques through advanced control in grid-connected renewable energy sources: a review" in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 4, pp. 3100-3111, July-Aug. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2823680. Páginas 1-10
29. W. Xu, "Status and future directions of power system harmonic analysis" IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., Denver, CO, USA, 2004, pp. 756-761 Vol.1, doi: 10.1109/PES.2004.1372917.
30. A. Medina et al., "Harmonic analysis in frequency and time domain" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 3, pp. 1813-1821, July 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2258688.
31. A. Kalair, N. Abas, A.R. Kalair, Z. Saleem, N. Khan, "Review of harmonic analysis, modeling Harmonic resonance analysis in high-renewable-energy-penetrated power systems considering frequency coupling" Yang Wang, Haimeng Chen, Bo Gao, Xianyong Xiao, Ricardo Torquato, Fernanda C. L. Trindade First published: 28 October 2022
32. S. Martínez-Morales, F.S. Sellschopp-Sánchez, R. Loera-Palomo, M.A. Rivero-Corona, R. Vargas-Salas, "Estudio de resonancias armónicas en red eléctrica ante variación de carga" [Internet] Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo, Año: 2019 Volumen: 1. Disponible en: <http://revistacid.itslerdo.edu.mx/coninci2019/CID061.pdf>

33. Q. Liu, F. Liu, R. Zou and Y. Li, "Harmonic resonance characteristic of large-scale pv plant: modelling, analysis, and engineering case" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 3, pp. 2359-2368, June 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3103671.
34. Wang, Y., Chen, H., Gao, B., Xiao, X., Torquato, R., Trindade, FCL: Análisis de resonancia armónica en sistemas de energía con alta penetración de energía renovable considerando el acoplamiento de frecuencia. Convertidores de energía. economía 3, 333 – 344 (2022).
35. Bao xie, lin zhou, Mingxuan Mao. 2019. "Analysis of resonance and harmonic amplification for grid-connected inverters". The institution of engineering and technology, Volumen 13, número 10, paginas 1821-1828
36. R. Zheng y M. Bollen, "Resonancia de armónicos asociada con un parque eólico", Universidad de Tecnología de Lulea, Skelleftea, sistema de energía eléctrica 2010, ISSN: 1402-1535.
37. S. A. Saleh, A. S. Aljankawey, M. S. Abu-Khaizaran and B. Alsayid, "Influences of power electronic converters on voltage–current behaviors during faults in dgus—part i: wind energy conversion systems" in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 4, pp. 2819-2831, July-Aug. 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2387477.
38. M. Nagpal and C. Henville, "Impact of power-electronic sources on transmission line ground fault protection" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 1, pp. 62-70, Feb. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2709279.
39. A. Olatoke and M. Darwish, "Relay coordination and harmonic analysis in a distribution network with over 20% renewable sources," 2013 48th International Universities' Power

- Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2013.6714871.
40. Quispe, J.C., Orduña, E. "Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review". Springer, Prot Control Mod Power Syst 7, 28 (2022).
41. B. A. Thango, J. A. Jordaan and A. F. nnachi, "On the impact of solar photovoltaic generation on the thermal ageing of transformers" 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), Gammarth, Tunisia, 2020, pp. 356-359, doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236471.
42. Marjan Shafiee Rad, M. Kazerooni, M. J. Ghorbany and H. Mokhtari, "Analysis of the grid harmonics and their impacts on distribution transformers" 2012 IEEE Power and Energy Conference at Illinois, Champaign, IL, USA, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/PECI.2012.6184593.
43. J. M. Carrasco et al., "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, June 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.878356.
44. Dielco "¿Qué es un cable XLPE?" [Artículo Web] [Citado el 18 de agosto del 2023]. Disponible en <https://www.dielco.co/articulos/qu%C3%A9-es-un-cable-xlpe>
45. TANO Cable, "Ventajas del cable XLPE" [Noticia Web] 2023, [citado el 18 de agosto del 2023]. Disponible en <http://www.tanocable.es/noticias/220.html>
46. T. M. Blooming and D. J. Carnovale, "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits" Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Appleton, WI, USA, 2006, pp. 1-9, doi: 10.1109/PAPCON.2006.1673767.

47. G. M. Shafiullah and A. M. T. Oo, "Analysis of harmonics with renewable energy integration into the distribution network," 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), Bangkok, Thailand, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387191.
48. Jorge Enrique Carrión González, Universidad Nacional de Loja, Ecuador Antonio A. Martínez García, Alfredo del Castillo Serpa, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba. "Effects of Current harmonics on the distribution single-phase transformers losses" [2019] [Trabajo teórico experimental] [citado el 19 de agosto del 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3291/329159363004/#:~:text=La%20distorsi%C3%B3n%20de%20la%20corriente,de%20vida%20%C3%BAtil%20del%20transformador>.
49. V. Khadkikar, R. K. Varma, R. Seethapathy, A. Chandra and H. Zeineldin, "Impact of distributed generation penetration on grid current harmonics considering non-linear loads," 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aalborg, Denmark, 2012, pp. 608-614, doi: 10.1109/PEDG.2012.6254065.
50. "IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents," in IEEE Std C57.110™-2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008), vol., no., pp.1-68, 31 Oct. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8511103.
51. F. Blaabjerg, D. Zhou, A. Sangwongwanich y H. Wang, "Diseño para la confiabilidad en sistemas de energía renovable", Simposio internacional sobre electrónica de potencia. (2017) ,Novi Sad, Serbia, 2017, págs. 1-6, doi : 10.1109/PEE.2017.8171658.

52. R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez and M. T. Kahn, "Total Harmonics Distortion (THD) with PV System Integration in Smart Grids: Case Study" 2019 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Wellington, South Africa, 2019, pp. 102-108.
53. F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV Integration Challenges" in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 9, no. 3, pp. 62-71, May-June 2011, doi: 10.1109/MPE.2011.940579.
54. Etier, Issa & Abderrazzaq, M. & Tarabsheh, Anas & Saraereh, Omar & AlBdourd, M. (2016). The Impact of LargeScale Photovoltaic Systems on the Harmonic Increase in Distribution Networks. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 10. 239-244.
55. A. Kavitha, N. S. Kumar and N. Vanaja, "Design and control of grid synchronization of renewable energy sources" 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Nagercoil, India, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICCPCT.2016.7530115.
56. F. A. Silva, "Reliability of Power Electronic Converter Systems [Book News]," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 10, no. 3, pp. 67-68, Sept. 2016, doi: 10.1109/MIE.2016.2590783.
57. J. C. Balda and A. Mantooth, "Power-Semiconductor Devices and Components for New Power Converter Developments: A key enabler for ultrahigh efficiency power electronics," in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 3, no. 2, pp. 53-56, June 2016, doi: 10.1109/MPEL.2016.2551801.
58. R. Ghandehari, "Training on the Comprehensive and Practical Designing Process of Power Electronic Converters" 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies

- Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDSTC49159.2020.9088403.
59. Y. Wang, SWH de Haan y JA Ferreira. 2009. "Potencial de mejorar la densidad de potencia del convertidor PWM con componentes avanzados", 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10.
60. H. Chraye, "Power electronics, a key technology for the renewable energy system integration," 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Ghent, Belgium, 2021, pp. P.1-P.2, doi: 10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570548.
61. Kamalakannan, R., & Sankaranarayanan, V. (2019). "Overview of control algorithm verification methods in power electronics systems". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30(5), 582-594. doi: 10.1007/s40313-019-00529-2.
62. K. Ma, F. Blaabjerg y M. Liserre, "Análisis térmico de convertidores del lado de la red multinivel para turbinas eólicas de 10 MW bajo funcionamiento de bajo voltaje", *IEEE Trans. Aplica. Ind.*, vol. 49, núm. 2, págs. 909-921, marzo/abril. 2013.
63. D. Murdock, J. Torres, J. Connors y R. Lorenz, "Control térmico activo de módulos electrónicos de potencia", *IEEE Trans. Aplica. Ind.* vol. 42, núm. 2, págs. 552-558, marzo/abril. 2006.
64. R. Zheng y M. Bollen, "Resonancia de armónicos asociada con un parque eólico", Universidad de Tecnología de Lulea, Skelleftea, sistema de energía eléctrica 2010, ISSN: 1402-1535.

65. MZ Lowenstein, "Eliminación de los problemas de corriente neutra armónica", Conferencia y exposición de transmisión y distribución IEEE/PES de 2008, Chicago, IL, EE. UU., 2008, págs. 1 a 4, doi: 10.1109/TDC.2008.4517148.
66. K. D. Patil and W. Z. Gandhare, "Threat of harmonics to underground cables," 2012 Students Conference on Engineering and Systems, Allahabad, India, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCES.2012.6199082..
67. KD Patil y WZ Gandhare, "Efectos de los armónicos en los sistemas de distribución sobre el aumento de la temperatura y la vida útil de los cables de alimentación XLPE", Conferencia internacional sobre sistemas de potencia y energía de 2011, Chennai, India, 2011, págs. 1 a 6, doi: 10.1109/ICPES .2011.6156680.
68. S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, "Harmonic analysis in a power system with wind generation" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 4, pp. 2006-2016, Oct. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.864063.
69. (D. Shmilovitz, 2005) "On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 526-528, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839744.
70. YG Sahin y F. Aras, "Investigación de los efectos armónicos en los cables eléctricos subterráneos", Conferencia internacional sobre ingeniería eléctrica, energía y accionamientos eléctricos de 2007, Setúbal, Portugal, 2007, págs. 589-594, doi: 10.1109/POWERENG.2007.4380123.
71. N. Cortés, G. Ramos and D. Celeita, "Frequency response and harmonic protection analysis of power grids with inverter-based resources," 2022 IEEE Industry Applications Society

- Annual Meeting (IAS), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IAS54023.2022.9939975.
72. Luis Alberto Castañeda Lievano, "Dimensionamiento óptimo de transformadores de potencia" [Trabajo de grado] 2006, Universidad de La Salle. [citado el 28 de junio de 2023]. Disponible en: http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1515&context=ing_electrica
73. Rauma Kalle. "Electrical resonances and harmonics in a wind power plant". Technical University of Catalonia, Spain. February 2012.
74. H. Wang et al, "Transition to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics", en IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 2, núm. 1, págs. 97-114, marzo de 2014, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2290282.
75. L. Wei, J. McGuire y RA Lukaszewski, "Análisis del control de frecuencia PWM para mejorar la vida útil del inversor PWM", IEEE Trans. Aplica. Ind, vol. 47, núm. 2, págs. 922-929, marzo/abril. 2011.
76. Archila Valderrama, J. E., Mantilla Villalobos, M. A., Barrero, J. G., Petit Suárez, J. F., & Ordoñez Plata, G. (2016) [Artículo]. "A maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems under partially shaded conditions". Ingeniería y Universidad, 391. <https://doi.org/10.11144/javeriana.iyu20-2.mppt>
77. "IEEE recommended practice for establishing liquid-immersed and dry-type power and distribution transformer capability when supplying non sinusoidal load currents" in IEEE Std C57.110™-2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008), vol., no., pp.1-68, 31 Oct. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8511103.

78. Y. Gu, H. Yang, W. Sun, Y. Chi, W. Li and X. He, "Hierarchical control of DC microgrids robustness and smartness" in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 6, no. 2, pp. 384-393, June 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2017.00920.
79. Rey, J. M., Vergara, P. P., Castilla, M., Camacho, A., Velasco, M., & Martí, P. (2020). Droop-free hierarchical control strategy for inverter-based AC microgrids. IET Power Electronics, 1403–1415. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0705>
80. Y. Chung, P. H. Trinh, H. Cho, J. -Y. Kim, J. -T. Cho and T. -H. Kim, "Design and evaluation of voltage control techniques by hierarchical coordination of multiple power converters in low-Voltage DC distribution systems," CIRED Workshop 2016, Helsinki, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2016.0752.
81. Benjamín Israel Vega Gutiérrez, "Estrategias y modos de control de convertidores para la regulación de frecuencia en sistemas de potencia sin inercia" Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas departamento de ingeniería eléctrica, Santiago de Chile, 2021 [Internet]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/181886/Estrategias-y-modos-de-control-de-convertidores-para-la-regulacion-de-frecuencia-en-sistemas-de-potencia-sin-inercia.pdf?sequence=1>
82. Mantilla, M. A., Petit, J. F., & Ordóñez, G. (2021). Control of multi-functional grid-connected PV systems with load compensation under distorted and unbalanced grid voltages. Electric Power Systems Research, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106918>
83. V. Vega, C. Duarte, G. Ordoñez and N. Kagan, "Selecting wavelet functions for detection of power quality disturbances," 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference

- and Exposition: Latin America, Bogota, Colombia, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/TDC-LA.2008.4641782.
84. J. M. Rey, M. Castilla, J. Miret, A. Camacho and R. Guzman, "Adaptive slope voltage control for distributed generation inverters with improved transient performance," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 3, pp. 1644-1654, Sept. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2909780.
85. Juan esteban palacios, Diseño e implementación de estrategias de control para inversores de tensión trabajando en paralelo y funcionando como generadores síncronos virtuales [Trabajo de grado] Universidad Autónoma de Occidente, 2020 Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12386/T09237.pdf;jsessionid=FF6F0EA19EDE845DACC9CC15D107A0C8?sequence=5>
86. J. F. Petit, G. Robles and H. Amaris, "Predictive algorithm for harmonic mitigation in non-linear loads based on active filters," 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, Russia, 2005, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2005.4524645.
87. I. J. Moreno, M. A. Mantilla, A. Esparza, J. M. Rey and D. J. Rincón, "Flexibilities of a Voltage Support Control Strategy for Grid-Connected Inverter-Interfaced Distributed Generators during Voltage Sags," 2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Shanghai, China, 2023, pp. 645-650, doi: 10.1109/PEDG56097.2023.10215232.