



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

**Propuestas de sistemas de filtros armónicos para mejorar la calidad
de energía en un parque eólico de La Libertad**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Davila Shuña, John Steep (orcid.org/0000-0003-3163-6207)

Perez Villa, Pablo Cristian (orcid.org/0000-0001-7068-3933)

ASESOR:

Dr. Luján López, Jorge Eduardo (orcid.org/0000-0003-1208-1242)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, Transmisión y Distribución

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2023

Dedicatoria

"Dedico este trabajo con profundo cariño a mi familia, cuyo apoyo inquebrantable y amor incondicional han sido mi fuente constante de fortaleza a lo largo de este viaje académico. Agradezco sinceramente su fe en mí y el aliento constante que me han brindado en cada etapa de este camino"

Agradecimiento

"Un sincero agradecimiento al Dr. Jorge Luján López, cuyo soporte a lo largo de este viaje académico ha sido fundamental para el éxito de este trabajo de investigación. Sus enseñanzas y consejos han dejado una huella duradera en mi desarrollo académico"

"Un agradecimiento especial a nuestro asesor especialista, el Dr. Oscar Peña, por su guía experta y apoyo a lo largo de la realización de este proyecto de tesis. Su orientación ha sido esencial en cada etapa de esta travesía académica"

Declaratoria de autenticidad del asesor



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, LUJÁN LÓPEZ JORGE EDUARDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Propuesta de sistemas de filtros armónicos para mejorar la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad.", cuyos autores son DAVILA SHUÑA JOHN STEEP, PEREZ VILLA PABLO CRISTIAN, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 17.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 08 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
LUJÁN LÓPEZ JORGE EDUARDO DNI: 17897692 ORCID: 0000-0003-1208-1242	Firmado electrónicamente por: JLUJAN el 08-12- 2023 07:02:55

Código documento Trilce: TRI - 0688506

Declaratoria de originalidad del autor(es)



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, DAVILA SHUÑA JOHN STEEP, PEREZ VILLA PABLO CRISTIAN estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis Completa titulada: "Propuesta de sistemas de filtros armónicos para mejorar la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad.", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis Completa:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
JOHN STEEP DAVILA SHUÑA DNI: 42517695 ORCID: 0000-0003-3163-6207	Firmado electrónicamente por: JDAVILAS el 08-12- 2023 15:36:14
PABLO CRISTIAN PEREZ VILLA DNI: 41075885 ORCID: 0000-0001-7068-3933	Firmado electrónicamente por: PPÉREZV el 08-12- 2023 15:45:21

Código documento Trilce: TRI - 0688507

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Declaratoria de autenticidad del asesor.....	iv
Declaratoria de originalidad del autor(es)	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de tablas.....	vii
Índice de gráficos y figuras	viii
Resumen	x
Abstract.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	5
III. METODOLOGÍA.....	14
3.1 Tipo y diseño de investigación	14
3.2 Variables y operacionalización.....	15
3.3 Población, muestra, muestreo	16
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.5 Procedimientos	17
3.6 Método de análisis de datos	17
3.7 Aspectos éticos.....	18
IV. RESULTADOS	19
V. DISCUSIÓN	45
VI. CONCLUSIONES.....	50
VII. RECOMENDACIONES	51
Referencias.....	52
ANEXOS.....	56

Índice de gráficos y figuras

Figura 1. Diagrama de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) ...	3
Figura 2. Diagrama unifilar del parque eólico	18
Figura 3. Red eléctrica en estudio	19
Figura 4. Gráfica de la distorsión armónica total de tensión	22
Figura 5. Gráfica de la distorsión armónica total de corriente	23
Figura 6. Gráfica de la distorsión individual de tensión para los armónicos de orden 3, 5 y 7	25
Figura 7. Gráfica de la distorsión individual de corriente para los armónicos de orden 3, 5 y 7	28
Figura 8. Filtro de armónicos que desvía la corriente armónica entre las cargas productoras de armónicos y la fuente de alimentación	29
Figura 9. (a) Filtro sintonizado simple (b) Filtro pasa alto (c) Filtro tipo C	30
Figura 10. Sistema de filtros sintonizado simple	30
Figura 11. Curva de impedancia del filtro de amortiguación simple para el armónico de orden 5	32
Figura 12. Variación de la curva de impedancia con el factor de calidad Q	33
Figura 13. Sistema de filtros amortiguado pasa alto	33
Figura 14. Curva de la impedancia del filtro pasa alto para el armónico de orden 5 ..	34
Figura 15. Sistema de filtros amortiguado pasa alto tipo C	35
Figura 16. Curva de la impedancia del filtro pasa alto tipo C para el armónico de orden 5	36
Figura 17. Configuración de la red sin el sistema de filtros	38
Figura 18. Forma de onda de la corriente distorsionada	39
Figura 19. Configuración de la red con el sistema de filtros de sintonización simple	39
Figura 20. Forma de onda de la corriente con el sistema de filtros sintonizado simple	40
Figura 21. Configuración de la red con el sistema de filtros amortiguado pasa alto..	40
Figura 22. Forma de onda de la corriente con el sistema de filtros amortiguado pasa alto	41

Figura 23. Configuración de la red con el sistema de filtros amortiguado pasa alto tipo C..... 41

Figura 24. Forma de onda de la corriente con el sistema de filtros amortiguado pasa alto tipo C 42

Figura 25. Variación del costo según el tipo de sistema de filtros 43

Resumen

Este estudio se enfoca en la mejora de la calidad de energía en un parque eólico mediante las propuestas de sistemas de filtros armónicos. El estudio proporciona una descripción detallada de los fundamentos teóricos de los diferentes tipos de filtros armónicos y sus aplicaciones, así como los procedimientos de diseño y selección. La investigación se llevó a cabo utilizando herramientas de simulación y análisis de datos, y los resultados obtenidos muestran que los sistemas de filtros armónicos analizados son altamente efectivos para mitigar los efectos negativos de los armónicos en el parque eólico. Se observó una reducción significativa en los niveles de armónicos en la red eléctrica, lo que se traduce en una mejora en la calidad de energía suministrada en el parque eólico.

Este estudio proporciona información diversa para la mejora de la calidad de energía en parques eólicos. Los resultados obtenidos con la utilización de software MATLAB / Simulink nos arroja que el filtro tipo amortiguado simple reduce los THDi 11.99% a 4.9%, filtro paso alto disminuye el THDi de 11.99% a 5.1% y el filtro tipo C de THDi 11.99% a 2.5%. Son una herramienta útil para el diseño y selección de sistemas de filtros armónicos en proyectos similares, y contribuyen al avance en la mitigación de problemas asociados con los armónicos en parques eólicos.

Palabras clave: Calidad de energía, filtros armónicos, Análisis de sistemas, eólica, filtro pasivo.

Abstract

This study focuses on improving power quality in a wind farm through the proposals for harmonic filter systems. The study provides a detailed description of the theoretical foundations of the different types of harmonic filters and their applications, as well as the design and selection procedures. The research was carried out using simulation and data analysis tools, and the results obtained show that the harmonic filter systems analyzed are highly effective in mitigating the negative effects of harmonics in the wind farm. A significant reduction in harmonic levels will be observed in the electrical grid, which translates into an improvement in the quality of energy supplied to the wind farm. This study provides various information for improving energy quality in wind farms. The results obtained with the use of the MATLAB / Simulink software show that the simple damped type of filter reduces the THDi from 11.99% to 4.9%, the high pass filter reduces the THDi from 11.99% to 5.1% and the type C filter reduces the THDi from 11.99%. to 2.5%. They are a useful tool for the design and selection of harmonic filter systems in similar projects and contributing to progress in mitigating problems associated with harmonics in wind farms.

Keywords: Power quality, harmonic filters, Systems analysis, wind power, passive filter.

I. INTRODUCCIÓN

El creciente interés a nivel mundial por el calentamiento global y el uso de energía limpias está tratando de dejar de lado las energías producidas por el carbón, petróleo y gas provocado una tendencia en la generación de energía eléctrica mediante el uso de recursos renovables como la energía que se obtiene a través del sol y el viento (TRAN, y otros, 2019). La generación renovable, incluido los parques eólicos, está en línea con el compromiso mundial de abordar el cambio climático (Yuqi , y otros, 2021). El uso de la energía eólica se desarrolló a inicios del siglo XX, se convirtió en la fuente de energía limpia y sostenible más prometedora del mundo (WIJDANE, y otros, 2021) en la última década el incremento de las centrales eólicas fue bastante veloz a diferencia de otras fuentes de energía renovable, cuyos principales productores en el mundo son Estados Unidos, Alemania, España y Dinamarca. Actualmente las regiones con menor crecimiento en energía eólica y capacidad instalada es el Caribe y América Latica (HERNÁNDEZ, y otros, 2020).

La potencia instalada en las centrales eólicas en los últimos años fue del 30 % de acuerdo a la publicación del Consejo Mundial de Energía Eólica, el 2020 fue un año histórico ya lograron una capacidad instalada de 93 GW en todo el mundo (WIJDANE, y otros, 2021), se proyecta que para el 2050 este tipo de energía contaría con una capacidad de producción de 5044 (GW) para los aerogeneradores terrestres y una capacidad de 1000 (GW) para aerogeneradores marinos (FAYSSAL, y otros, 2021).

El incremento del costo de los combustibles, problemas ambientales, como la contaminación del aire, conducen a la búsqueda de recursos energéticos (MISHRA, y otros, 2022), muchos países ya se han propuesto producir una proporción significativa de electricidad a partir de recursos naturales renovables para mantener la sostenibilidad ambiental (BIKDELI, y otros, 2022).

Sin embargo, el incremento de las instalaciones de convertidores de potencia conectados a las redes eléctricas genera inconvenientes a la red de energía, como la distorsión armónica (JIMÉNEZ, y otros, 2023). La reducción de armónicos y ruido

son temas para tomar en cuenta en la mejora de la calidad de energía, mencionando que las cargas no lineales es la principal causa de generación de armónicos, especialmente para los motores de inducción, cables, generadores, transformadores, luces, disyuntores y fusibles (RAZAK, y otros, 2019).

En el Perú existen 7 planta eólicas que se encuentran en funcionamiento las cuales brindan 408 MW de capacidad instalada, los primeros 9 meses del año 2021 representó el 3.1 % de la energía producida en todo el Perú, las centrales eólicas se encuentran distribuidas en diferentes lugares a nivel nacional, las 3 plantas eólicas de mayor capacidad se encuentran ubicadas en la región Ica, otras 2 se encuentran en la región de Cajamarca, 1 en la Libertad y la última en Piura (MINEM, 2021), con la aprobación del Decreto Legislativo N° 1002 de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el usos de energía renovable en el año 2008 el Perú se convirtió en un país referente para los demás países, pero en el último lustro no se ha desarrollado grandes avances en el rubro de la energía eólica, debido a que su puesta en funcionamiento atrae varios inconvenientes tales como la falta de accesibilidad, su compleja unificación a gran escala y los pagos elevados que pudieran afectar a los usuarios (OSINERGMIN, 2019).

Parque eólico en estudio, tiene una capacidad instalada de 83 MW a un nivel de tensión de 30 kV, la cual se comunica mediante una línea de transmisión eléctrica en 220 kV al sistema interconectado nacional (OSINERGMIN, 2022). Este parque presenta niveles de armónicos que impactan directamente en la calidad de la energía.

Los armónicos son una forma de distorsión de la señal eléctrica que puede tener efectos negativos en los sistemas de energía eléctrica y en los equipos eléctricos conectados a ellos. Estos armónicos se generan principalmente debido a cargas no lineales (DE LA ROSA, 2006). En los parques eólicos los armónicos se generan debido principalmente a los inversores que forman parte de los generadores de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés).

Los inversores conocidos también como convertidores de CC a CA tienen la función de convertir una tensión de entrada de CC en una tensión de salida de CA

simétrica de la magnitud y frecuencia deseadas. La tensión de salida puede ser fija o variable a una frecuencia fija o variable. Se puede obtener una tensión de salida variable variando la tensión continua de entrada y manteniendo constante la ganancia del inversor. Las formas de onda de la tensión de salida de los inversores ideales deben ser sinusoidales. Sin embargo, las formas de onda de los inversores prácticos no son sinusoidales y contienen ciertos armónicos (CARRIVEAU, 2012).

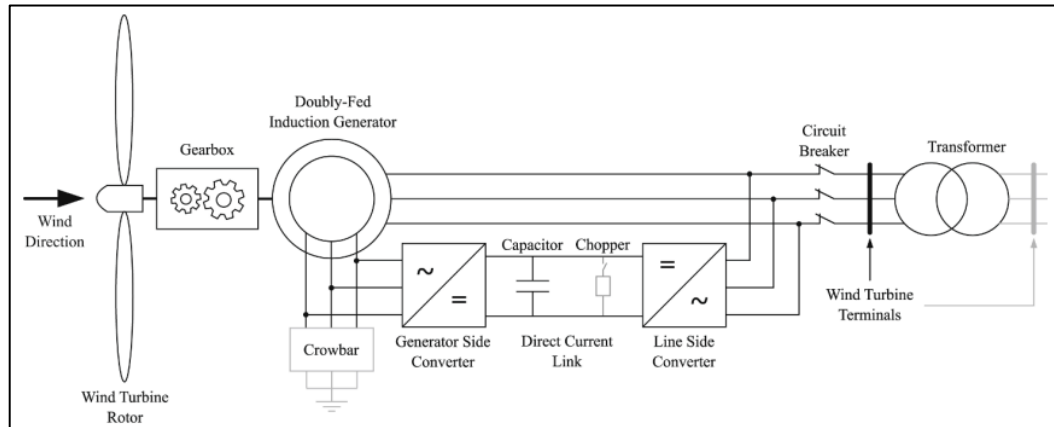


Figura 1. Diagrama de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)

La presencia de convertidores de potencia genera en los terminales de los aerogeneradores una distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) los cuales enlazan los parámetros del aerogenerador a los de la red eléctrica (HERNÁNDEZ, y otros, 2023).

Los armónicos pueden causar sobrecalentamiento en los transformadores, generadores y motores eléctricos, interferencias en los sistemas de comunicación y control, problemas en la calidad de la energía eléctrica, fluctuaciones en el voltaje y la corriente eléctrica, problemas de resonancia en los sistemas eléctricos, fallos en los equipos y reducción de su vida útil, y aumento de los costos de mantenimiento. (DE LA ROSA, 2006).

Abordar este fenómeno resultó crucial, para mejorar la calidad de energía en el parque eólico en estudio. Proponiendo sistemas de filtros de armónicos como una estrategia esencial para preservar la integridad y la eficiencia del sistema energético

en este parque en particular.

La investigación del problema se plantea mediante la formulación de la siguiente pregunta: ¿Cuál es el impacto de las propuestas de sistemas de filtros armónicos en la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad?, siendo los problemas específicos, ¿Cuál es la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad?, ¿Cómo proponer los sistemas de filtros armónicos en un parque eólico de La Libertad?, ¿Cuál es la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad con los sistemas de filtros armónicos aplicando el software Matlab/Simulink?.

(ARIAS Gonzales, 2020) refiere que la justificación de una investigación corresponde a la expresión de motivaciones que explican las razones por la cual esta se ha llevado adelante; siendo las justificaciones efectuadas desde diferentes perspectivas y de acuerdo a la naturaleza de la propia investigación; la presente investigación ha definido la justificación práctica, en razón de que existió la necesidad de mejorar la calidad de la energía producida en el parque eólico, y una de los métodos más adecuados es de la supresión de los armónicos; asimismo, la justificación económica, se sustenta en que al mejorar la calidad de la energía producida, los niveles de producción y distribución van a mejorar y por ende incrementar los niveles de facturación e ingresos por consumo de energía.

Conforme a lo establecido, el objetivo general de esta investigación es: Evaluar el impacto de las propuestas de los sistemas de filtros armónicos en la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad. Los objetivos específicos fueron: Determinar la calidad de energía, analizar las propuestas de los sistemas de filtros armónicos, determinar la calidad de energía con los sistemas de filtros armónicos aplicando el software Matlab/Simulink.

La hipótesis general planteada en la presente investigación expresa que al evaluar las propuestas de sistemas de filtros armónicos contribuirá significativamente en la mejorar de la calidad de energía en el parque eólico de La Libertad.

II. MARCO TEÓRICO

En cuanto a los antecedentes que han abordado las variables de estudio se ha considerado el trabajo de (SHENG-KUAN, y otros, 2020), su investigación se desarrolló en una sección modificada de un sistema eléctrico de Taiwán, quienes en su artículo propusieron como objetivo principal estudio para abordar los desafíos relacionados con la conexión de nuevas plantas de energía eólica o solar a la red eléctrica, específicamente en términos de la calidad de la energía y la estabilidad del sistema. Se busca mitigar los posibles efectos adversos, como la generación de nuevos armónicos y frecuencias de oscilación natural al agregar estas plantas. El enfoque propuesto implica la implementación de un filtro pasivo en el punto de conexión a la red (PCC) para eliminar estos armónicos y frecuencias no deseadas. El estudio utiliza herramientas como análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT) en Matlab/Simulink y análisis de señales pequeñas para identificar y comprender estas frecuencias. Además, se examinan varios filtros de CA con el objetivo de reducir la resonancia armónica y eliminar las nuevas frecuencias de oscilación natural o armónica. La evaluación del rendimiento se realiza mediante la comparación de valores propios y el porcentaje de distorsión armónica total (THD) antes y después de la implementación del filtro, de las cuales sin filtros armónicos es de 3.27%, con filtro de paso alto RC 1.14%, filtro armónico sintonizado único 3.23%, filtro de paso alto 1.21 % y filtro tipo C 1.05%. Los resultados de la simulación indican que un filtro tipo C puede reducir los armónicos, eliminar la frecuencia de oscilación natural, disminuir el THD y mejorar la estabilidad del sistema de energía.

(ISHAYA, y otros, 2023), objetivo es mitigar armónicos en un sistema de energía trifásico, las cargas no lineales, al generar armónicos en sistemas de energía con efectos perjudiciales como sobrecalentamiento y daños al equipo, constituyen un desafío, especialmente con el aumento del uso de dispositivos electrónicos. Para mejorar la calidad de la energía, se emplean comúnmente filtros. En este trabajo, se diseñó un filtro pasivo sintonizado simple (STPF) para reducir específicamente los armónicos en un sistema trifásico. La metodología detalló la configuración, función y modelo matemático del STPF, así como el enfoque general con mediciones y simulaciones en MATLAB/Simulink. Se focalizó en reducir los armónicos de las

secuencias 5, 7, 11, 13, 17 y 19, evaluando el rendimiento mediante mediciones en el punto de acoplamiento común. Los resultados mostraron que al conectar el STPF, el THDi se redujo del 14,93% al 4,87%, cumpliendo con el estándar IEEE 519-2022, respaldando la efectividad del filtro para mejorar la calidad del sistema de energía.

(MISHRA, y otros, 2022), en su artículo propusieron como objetivo analizar y evaluar el rendimiento de un filtro LCL propuesto para un sistema de conversión de energía eólica basado en un generador de inducción eléctrica doblemente alimentado. El artículo busca atenuar componentes armónicos de la corriente generada por el DFIG mediante el diseño y la implementación de filtros, para aumentar la calidad de energía. Además, se pretende comparar el LCL filtro propuesto con el filtro LCL convencional y realizar un análisis de estabilidad del sistema DFIG con y sin el filtro propuesto. Además de validar la efectividad del método de diseño del filtro propuesto y demostrar su utilidad en la mejora del rendimiento, eficiencia en el sistema de conversión de energía eólica.

Asimismo, (DARUSSALAM, y otros, 2020), quienes en su artículo proporciona información y conocimientos sobre la distorsión armónica y las estrategias para mitigar sus efectos, proporcionan una descripción general de la distorsión armónica y discute la importancia de abordar las dificultades por la mala calidad de energía causados por cargas no lineales. También explora los estándares armónicos, incluidos IEEE 519-2014 e IEC 61000-3-2, categoriza las técnicas de mitigación armónica en tres grupos: filtros armónicos pasivos, filtros armónicos activos y filtros armónicos híbridos. Estas técnicas se utilizaron para reducir el nivel de contaminación armónica en la red de distribución de energía.

Los investigadores (FAYSSAL, y otros, 2021), en su artículo presentan una investigación experimental sobre una turbina eólica que utiliza el control directo de potencia DFIG y un filtro LCL en modo autónomo, evaluando la eficiencia y simplicidad de este sistema de generación de energía eólica y su capacidad para mitigar los armónicos. Los autores describen en detalle la configuración experimental utilizada, incluyendo la implementación del control directo de potencia DFIG y el uso del filtro LCL para optimizar la calidad de la energía generada. La obtención de las pruebas

realizadas se ajusta en diferentes condiciones de velocidad del viento, analizando el rendimiento del sistema en términos de respuesta, errores de corriente y potencia, entre otros parámetros. Los resultados demuestran la capacidad del sistema para mitigar los armónicos generados por la turbina eólica, lo que lo convierte en una referencia relevante para el desarrollo de estrategias de mitigación de armónicos en parques eólicos.

Asimismo, (BEZERRA, y otros, 2019), en su investigación los autores se centran en la implementación de métodos para la inspección de sistemas de producción de energía eólica, específicamente en la filtración de armónicos de corriente generados por un generador de inducción doblemente alimentado. Comparan dos estrategias diferentes y proponen algoritmos para compensar los armónicos generados por el convertidor del lado de la red, con la finalidad de mejorar la energía generada. Datos obtenidos a través de simulaciones y experimentos demuestran la eficacia de las estrategias propuestas en la reducción de la distorsión armónica. Estos hallazgos son de gran relevancia para la industria de parques eólicos, ya que la mitigación de armónicos es un aspecto crucial para asegurar un suministro de energía eléctrica de alta calidad y confiabilidad.

En el mismo sentido, (RODARTE, y otros, 2021), en su investigación propusieron desarrollar métodos efectivos para reducir los armónicos en sistemas de generación de energía eólica. Reconociendo la importancia de mantener una calidad de energía óptima en estos sistemas, se centraron en la aplicación de un método de control lineal en el convertidor del lado de la red. Esta técnica permitió rastrear las señales periódicas correspondientes a los armónicos de corriente en el convertidor lado de la red, logrando así una alta capacidad de rechazo de armónicos de corriente. Además de reconocer la importancia de la adecuación del factor de potencia en dichos sistemas, se planteó la implementación de la inyección de potencia reactiva en un generador de inducción doblemente alimentado. Esta táctica posibilitó la regulación del factor de potencia y la optimización de la eficiencia en el sistema de generación eólica.

Los autores (SABIR, y otros, 2021), en su investigación analizan los armónicos generados en un generador eléctrico de inducción doblemente alimentado impulsado

por una turbina eólica durante cargas lineales y no lineales. En su estudio, los autores abordan la relevancia de la calidad de energía en parques eólicos y cómo los armónicos generados pueden afectarla. Destacan que, al conectar cargas no lineales al sistema DFIG, se produce una cantidad significativa de armónicos en la electricidad generada. Estos armónicos pueden tener efectos adversos en la red eléctrica, como distorsión de voltaje y corriente, pérdida de eficiencia y daño a los equipos conectados. Con el objetivo de cambiar la mala calidad de energía en parques eólicos, los autores proponen el uso de un filtro activo híbrido para la reducción de los armónicos generados por el sistema DFIG. Mediante simulaciones realizadas, utilizan el Control del Lado de la Red (GSC) y el Control del Lado del Rotor (RSC) para evaluar la eficacia del filtro activo híbrido durante cargas lineales y no lineales. Los resultados obtenidos demuestran que el filtro activo híbrido reduce los armónicos hasta un 4.96% en comparación con el 29.66% inicial cuando se conecta una carga no lineal al sistema DFIG. Además, se observa que cuando no se conecta una carga no lineal, el valor de los armónicos es de solo 0.14%. Estos hallazgos respaldan la eficacia del filtro activo híbrido en la mejora de la mala calidad de energía en parques eólicos al reducir los niveles de armónicos generados. Los autores concluyen que su investigación proporciona una base sólida para abordar los problemas de generación de energía en parques eólicos. Los hallazgos demuestran que la implementación de un filtro activo híbrido puede ser una solución efectiva para mitigar los armónicos generados por los sistemas DFIG impulsados por turbinas eólicas.

(MUTHURAJ, y otros, 2021), han realizado una investigación exhaustiva sobre el sistema de transformación de energía eólica basado en un generador eléctrico de inducción de doble alimentación y su aplicación en condiciones de red desbalanceadas y armónicas. Su estudio se centra en abordar los desafíos asociados con la mejora de la energía en parques eólicos y propone el uso de convertidores de matriz y filtros FIR (Finite Impulse Response) de paso de banda para optimizar el rendimiento del sistema. En su artículo, los autores destacan la importancia de optimizar la conversión de energía eólica en condiciones adversas de la red eléctrica. Para lograr esto, proponen una estrategia de control que acabe la necesidad de descomponer los componentes de la energía del estator que cuenta con una secuencia positiva y negativa. Además,

señalan que los convertidores de matriz ofrecen ventajas significativas al eliminar la necesidad de métodos de control para limitar las fluctuaciones de voltaje CC. Los autores también resaltan el papel crucial de los filtros FIR de paso de banda en la mejora del rendimiento del sistema. Estos filtros están diseñados con anchos de banda adecuados para cada objetivo de control, lo que permite generar voltajes de referencia del rotor de frecuencia de deslizamiento para sintetizar pulsos de modulación de vector espacial para el convertidor de matriz.

(ABDEL Wahed, y otros, 2020), en su artículo han llevado a cabo una investigación sobre la mitigación de armónicos en parques eólicos mediante el uso de una función de filtrado activo en derivación basada en sistemas con generadores de inducción de doble alimentación. Propusieron como objetivo analizar y evaluar la energía en parques eólicos, considerando aspectos como la presencia de armónicos, fluctuaciones de tensión, desequilibrios de carga y otros fenómenos que puedan afectar la estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica. Además, en su artículo propusieron como principal objetivo evidenciar la eficacia de la función de filtrado activo en derivación propuestas, basada en la identificación precisa de corrientes armónicas y su compensación utilizando teorías de potencia reactiva y activa instantánea. Los autores presentan resultados y análisis de simulaciones para respaldar la efectividad de esta función en la mitigación de armónicos.

Los investigadores (VISHAL, y otros, 2019), en su investigación identificaron que las turbinas eólicas basadas en DFIG presentan baja calidad de energía debido a que cuentan con cargas no lineales que generan distorsiones armónicas en el sistema. Estas corrientes armónicas generan una mala calidad de energía que es inyectada a la red, lo que puede tener efectos negativos en la operación y el rendimiento de los parques eólicos. Para abordar este desafío, los autores propusieron la implementación de un filtro activo en las turbinas eólicas basadas en DFIG. Este filtro activo utiliza un nuevo control vectorial y filtros de autoajuste para compensar la generación de las corrientes armónicas de las cargas no lineales.

En cuanto a los fundamentos teóricos sobre las variables de estudio, tenemos:

La calidad de energía, según el standard 1159 (IEEE, 2019) es la capacidad de un sistema o equipo eléctrico para operar de manera adecuada sin causar perturbaciones

electromagnéticas perjudiciales a otros sistemas o equipos conectados en el mismo entorno electromagnético. Según la norma 61000-4-30 (IEC, 2015), se refiere al grado en que las características de tensión, corriente y frecuencia de la energía eléctrica suministrada cumplen con el nivel de calidad esperado y aceptable para el normal funcionamiento de equipos en su entorno electromagnético.

El standard 1159 (IEEE, 2019) identifica varias dimensiones de calidad de energía que pueden ser consideradas en el análisis y evaluación de un sistema eléctrico, para este propósito se consideró la distorsión de forma de onda por armónicos.

Distorsión de forma de onda: Se describe como la desviación de estado estacionario de la onda sinusoidal de frecuencia de línea ideal, que se basa principalmente en su composición espectral. Existen varios tipos:

DC Offset: La tensión o corriente de CC presente en una red de CA se denomina compensación de CC. Este fenómeno puede ser causado por perturbaciones geomagnéticas o por los efectos de la rectificación de media onda.

Armónicos: Estos son voltajes o corrientes sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema de potencia, que normalmente es de 50 Hz o 60 Hz. La forma de onda se distorsiona cuando los armónicos interactúan con el voltaje o la corriente fundamental. Los equipos no lineales o las cargas de red pueden provocar distorsión armónica.

Interarmónicos: un voltaje o corriente multiplicado por la frecuencia de operación del sistema de potencia (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz), cuyos componentes de frecuencia no son números enteros. Las causas principales de la distorsión de la forma de onda interarmónica incluyen inversores modulados por pulsos y formas de onda (como fuentes de energía distribuida), convertidores de frecuencia estáticos, circuitos de conmutación, hornos de inducción, calentadores y arcos eléctricos, especialmente aquellos que hacen que los inversores pierdan la sincronización con la red.

Notching: Estas son perturbaciones de voltaje intermitentes que ocurren durante la operación normal de los equipos eléctricos cuando la corriente cambia de una fase a otra. Un caso especial es el esfuerzo cortante, que es periódico, pero tiene

un componente de frecuencia importante.

Voltage notching ringing: Es una variante de la tensión notching, cuando una resonancia del sistema da lugar a una respuesta de oscilación en cada uno de los notching de conmutación.

Ruido: El ruido es una señal eléctrica no deseada con un contenido espectral de banda ancha (normalmente inferior a 200 kHz) que se superpone a la tensión o la corriente en los conductores vivos, neutros o de fase de un sistema eléctrico. En esencia, el ruido es cualquier distorsión involuntaria de la señal de potencia que no se puede categorizar como distorsión armónica o transitorios. La electrónica de potencia, los circuitos de control, la maquinaria de formación de arcos, las cargas de rectificadores de estado sólido y las fuentes de CA pueden contribuir al ruido.

Indicadores: Distorsión armónica individual de tensión, Distorsión armónica individual de corriente, Distorsión armónica total (THD), Distorsión de demanda total (TDD).

Sistemas de filtros armónicos, según el standard 519 (IEEE, 2022) es un sistema utilizado para controlar y reducir la distorsión armónica en una red eléctrica, mitigando así los efectos perjudiciales de los armónicos. Los sistemas de filtros armónicos pueden estar compuestos por elementos como inductores, capacitores y resistencias dispuestos de manera adecuada para proporcionar una atenuación selectiva de los armónicos. Los sistemas de filtros armónicos pueden ser diseñados y configurados para abordar armónicos específicos o para abordar un rango más amplio de armónicos. Según (DUGAN, y otros, 2004) los sistemas de filtros armónicos, son sistemas diseñados para suprimir los armónicos presentes en una señal eléctrica, evitando que se propaguen a través de la red eléctrica y protegiendo los equipos y dispositivos conectados de los efectos perjudiciales de los armónicos.

Dimensiones de sistemas de filtros armónicos según (DAS, 2015):

Frecuencia de corte: La frecuencia a la cual el filtro armónico comienza a atenuar las componentes armónicas no deseadas. El indicador más comúnmente utilizado para la frecuencia de corte es la "fc", se expresa en Hertz (Hz) o radianes por segundo (rad/s),

dependiendo del contexto y de la convención utilizada.

Amortiguamiento: Un parámetro que determina la tasa de disipación de energía en el filtro armónico y afecta la respuesta transitoria.

Los valores del factor de amortiguamiento ζ pueden variar entre 0 y 1, y diferentes valores tienen efectos diferentes en la respuesta del filtro:

$\zeta = 0$: Indica un filtro sin amortiguamiento crítico. La respuesta en frecuencia puede mostrar oscilaciones y un decaimiento muy lento después de la frecuencia de corte.

$0 < \zeta < 1$: Representa un filtro subamortiguado. La respuesta en frecuencia muestra oscilaciones amortiguadas y un decaimiento gradual después de la frecuencia de corte. Un valor más cercano a 1 indica un amortiguamiento más ligero y oscilaciones más prolongadas.

$\zeta = 1$: Indica un filtro amortiguado crítico. La respuesta en frecuencia no muestra oscilaciones y tiene un decaimiento más rápido después de la frecuencia de corte.

$\zeta > 1$: Representa un filtro sobreamortiguado. La respuesta en frecuencia no muestra oscilaciones y tiene un decaimiento más rápido que en un filtro amortiguado crítico.

Impedancia de salida: La impedancia que presenta el filtro armónico hacia la carga y afecta la transferencia de corriente armónica.

Selectividad armónica: La capacidad del filtro armónico para atenuar selectivamente ciertos armónicos mientras permite el paso de otros.

La métrica principal utilizada para describir la selectividad armónica es la relación entre la frecuencia de corte y el ancho de banda del filtro. Esta relación se denomina factor de calidad del filtro o factor Q.

Las normas 1159 (IEEE, 2019) y 61000-4-30 (IEC, 2015) Crean estándares y métodos de medición para la evaluación de parámetros relacionados con la calidad de la electricidad, medir y evaluar estos parámetros para determinar si la calidad de la

electricidad cumple con los requisitos especificados de la aplicación o el funcionamiento normal de los equipos eléctricos.

Series de Fourier: Fourier argumentó que cualquier función continua que se repita durante un intervalo de tiempo, puede representarse mediante la suma de un componente de CC, un componente sinusoidal fundamental y una serie de componentes sinusoidales de orden superior (llamados armónicos) cuyas frecuencias son números enteros de la onda fundamental. El análisis de armónicos implica calcular la magnitud y la fase de los armónicos fundamentales y superiores de una forma de onda periódica. La serie se llama serie de Fourier y describe la relación entre una función en el dominio del tiempo y una función en el dominio de la frecuencia (ARRILLAGA, y otros, 2003).

III. METODOLOGÍA

La metodología se refiere a las estrategias o pasos que sigue el investigador para responder a las preguntas de investigación y lograr los objetivos planteados (RAGAB, y otros, 2018).

3.1 Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación

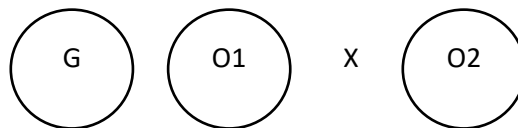
La investigación es aplicada, debido al entendimiento sobre la calidad de energía y los filtros armónicos a fin de mitigar las distorsiones en un parque eólico. Al respecto (BAIRAGI, y otros, 2019) argumentan que las investigaciones aplicadas son aquellas que se valen de los conocimientos adquiridos a fin de utilizarlos para solucionar un problema y obtener beneficios. Por su alcance es explicativa, en razón que de los resultados detallan y explican las características y comportamientos de la relación de causa efecto que mantienen ambas variables. En relación con esto (PRZEMYSŁAW, y otros, 2021) refieren que las investigaciones explicativas buscan explicar la relación de causa efecto que reportan dos variables. Por su enfoque la investigación es cuantitativa, debido a que las variables tanto calidad de energía como sistemas de filtros armónicos fueron medidas a escalas de razón y sus resultados trabajados con métodos estadísticos para probar las hipótesis que responden a los problemas de investigación. Sobre el particular, (APUKE, 2017) y (BRANNEN, 1992) coinciden al señalar que las investigaciones cuantitativas son aquellas en que las variables han sido medidas en escalas numéricas y que sus resultados tratados con métodos estadísticos a fin de corroborar la hipótesis de investigación.

Diseño de investigación

Los estudios experimentales son aquellos donde la variable independiente es sometida a un tratamiento para producir un efecto sobre la variable dependiente, así mismo, (ARIAS Gonzales, 2020) afirma que los pre-experimentos son aquellos donde la variable afectada es sometida a medición dos veces a fin de verificar los cambios

acontecidos, estas dos mediciones son efectuadas sobre el grupo de tratamiento (muestra) no habiendo grupo de control.

Este estudio es de diseño experimental del tipo pre experimental, dado que se buscará determinar el impacto de los sistemas de filtros armónicos en la calidad de energía, realizado el Análisis del sistema en el software MATLAB Simulink. Se evaluará la situación de la variable dependiente antes y después de la intervención de la variable independiente.



Donde:

G: Grupo

X: Sistemas de filtros armónicos

O1: Observación de la variable calidad de energía pre-estímulo

O2: Observación de la variable calidad de energía post estímulo

3.2 Variables y operacionalización

Variable 1: Sistemas de filtros armónicos

Definición conceptual

Sistemas diseñados para suprimir los armónicos presentes en una señal eléctrica, evitando que se propaguen a través de la red eléctrica y protegiendo los equipos y dispositivos conectados de los efectos perjudiciales de los armónicos (DAS, 2015).

Definición operacional

Los sistemas de filtros armónicos se relacionan con la frecuencia de corte, el amortiguamiento, impedancia de salida, capacidad de compensación y selectividad armónica. (DAS, 2015).

Variable 2: Calidad de energía

Definición conceptual

Es la capacidad de un sistema o equipo eléctrico para operar de manera adecuada sin causar perturbaciones electromagnéticas perjudiciales a otros sistemas o equipos conectados en el mismo entorno electromagnético según la norma 1159 (IEEE, 2019).

Definición operacional

La calidad de energía en este estudio se relaciona con la distorsión de la forma de onda (IEEE, 2019).

En el anexo 01 se muestra una tabla de operacionalización de las variables.

3.3 Población, muestra, muestreo

Población: 07 Parques eólicos del Perú

- Criterios de inclusión: Se incluye el parque del departamento de La Libertad porque es la zona cercana para realizar nuestro estudio de investigación.
- Criterios de exclusión: Se excluyen los demás parques eólicos al no contar con información de su sistema eléctrico y por estar fuera de nuestra zona de investigación.

Muestra: Parque eólico de La Libertad

Muestreo: Unidad de análisis: 01 Parque eólico

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas de recolección de datos

Las técnicas son las estrategias que diseña el investigador para poder recopilar los datos que permiten medir la variable y sus dimensiones (TAHERDOOST, 2021); la

técnica que se usó en esta investigación es de análisis documental, que permitió analizar los documentos, reportes y registros que nos proporcionó la empresa tanto para la variable independiente filtros armónicos como para la variable dependiente calidad de energía.

Instrumentos de recolección de datos

En cuanto a los instrumentos, estos son los medios o elementos que se utilizan para que las técnicas consigan los propósitos establecidos (AFOLAYAN, y otros, 2019), los instrumentos que se utilizaron son las fichas de registros para el análisis de la información.

Validación y confiabilidad

La ficha de registro fue validada por el docente del curso y no requiere análisis de confiabilidad, dado que ello se aplica solo a los cuestionarios.

3.5 Procedimientos

Se inició con el permiso correspondiente a la central de energía, después de la aprobación se revisó los registros de los documentos, los datos históricos registrados en Excel, así como la extracción de los datos de los analizadores de redes instalados en el parque eólico. Para la elaboración del estudio se usó diversos instrumentos de acuerdo con la necesidad, posteriormente se procedió con el análisis de la información obtenida, se realizó el debate para llegar a las conclusiones después de contrastar con los antecedentes.

3.6 Método de análisis de datos

Se realizó el procesamiento de datos tomados de un equipo analizador de calidad de energía y se usó las hojas de cálculo de Microsoft Excel para representar las diferentes tablas que nos proporcionó el análisis de los datos de los registros obtenidos. Se realizó el análisis mediante software de simulación MATLAB Simulink vStudents 2021.

3.7 Aspectos éticos

El proyecto de estudio contempló principios éticos, respetando los derechos de las fuentes de información que aportan al desarrollo de la investigación, los autores se harán referencia según la norma ISO. Se respetó los datos brindados por el parque eólico, garantizando que el presente proyecto de investigación no tiene intenciones de causar daño a la empresa ni mucho menos desprestigiar su trayectoria. Finalmente, el presente proyecto consideró el principio de justicia, comprometiéndonos a mostrar la veracidad de los resultados obtenidos después del análisis y la simulación, para ello se corroboró mediante el programa antiplagio turnitin.

El parque eólico objeto de estudio, cuenta con aerogeneradores dispuestos en circuitos interconectados, los cuales se vinculan a la barra principal con un nivel de tensión de 30 kV. Esta tensión se eleva posteriormente mediante el transformador de potencia a 220 kV, permitiendo así la integración del parque eólico en el sistema interconectado eléctrico. Como se muestra en el siguiente diagrama unifilar:

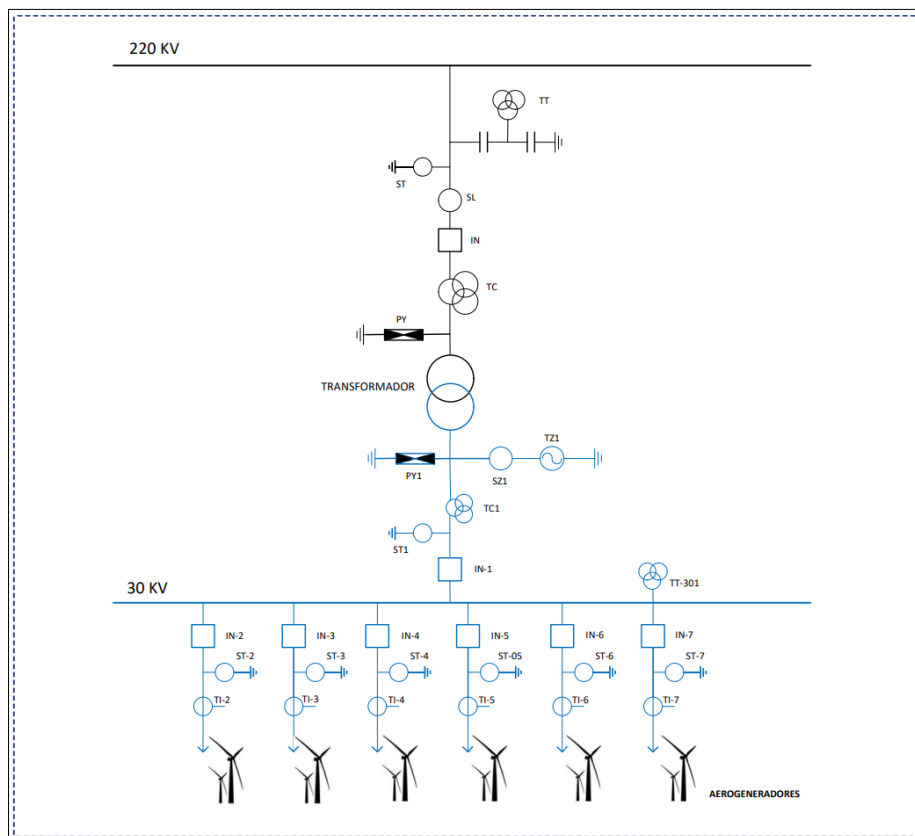


Figura 2. Diagrama unifilar del parque eólico

IV. RESULTADOS

Habiéndose aplicado los instrumentos de recolección de datos, se muestra los resultados obtenidos, luego de realizar el análisis de los datos a través de las hojas de cálculo Microsoft Excel y el software de simulación MATLAB Simulink vStudents 2021.

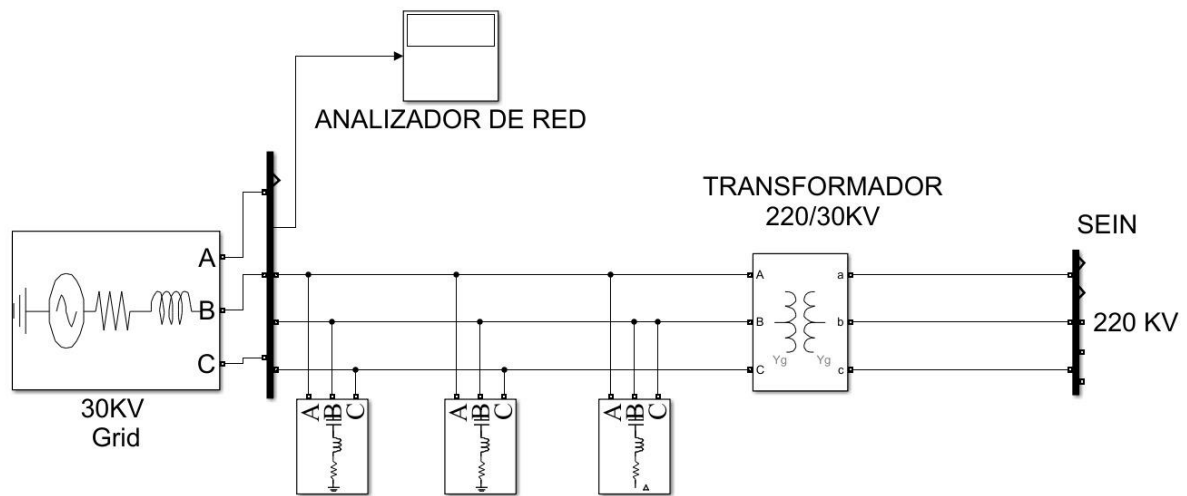


Figura 3. Red eléctrica en estudio

A continuación, se presentan los resultados y las principales conclusiones derivadas de esta investigación.

Objetivo específico 1: Determinar la calidad de energía.

Para determinar la calidad de energía se realizó la medición de armónicos, teniendo en cuenta los límites máximos permitidos por la norma IEEE-519-2022 y el análisis de la distorsión de la forma de onda con las series de Fourier.

Límites máximos permitidos por la IEEE-519-2022:

Límites de distorsión de tensión, en este caso el punto de medición de armónicos se tomó en la barra de 30KV, correspondiendo los valores resaltados en la tabla de límites máximos de distorsión de tensión de la IEEE-519-2022.

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%) $h \leq 50$	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV $< V$	1.0	1.5 ^a

Límites de distorsión de corriente, para este caso se calculó el cociente de corriente de cortocircuito máxima (I_{sc}) entre la corriente de carga máxima (I_L) en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés):

$$I_{sc}/I_L = 16$$

Correspondiendo los límites resaltados en la tabla de la IEEE-519-2022 con los límites de distorsión de corriente para tensiones entre 120V y 69KV.

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order ^b						
I_{sc}/I_L	$2 \leq h < 11^a$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	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	4.0	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

Distorsión de la forma de onda:

Una desviación de estado estacionario de una onda sinusoidal de frecuencia de potencia se denomina distorsión de forma de onda. Por lo general, se utiliza la serie de Fourier para analizar la forma de onda no sinusoidal.

Las formas de onda periódicas no sinusoidales pueden formularse en términos de series de Fourier. Cada término de la serie de Fourier se denomina componente armónico de la forma de onda distorsionada. Las frecuencias de los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Por lo tanto, las formas de onda de

tensión y corriente no sinusoidales pueden definirse como (FUCHS, y otros, 2023):

$$v(t) = V_{DC} + \sum_{h=1}^n V_{rms}^{(h)} \cos(h\omega_0 t + \alpha_h) \dots \dots \dots (1)$$

$$i(t) = I_{DC} + \sum_{h=1}^n I_{rms}^{(h)} \cos(h\omega_0 t + \beta_h) \dots \dots \dots (2)$$

Dónde ω_0 es la frecuencia fundamental, h es el orden armónico, y $V_{rms}^{(h)}$, $I_{rms}^{(h)}$, α_h , y β_h son los valores eficaces de amplitud y los desfases de la tensión y la corriente para el armónico h-ésimo.

Distorsión armónica total de tensión (THDv)

Tabla 1. Valores máximos por día de la distorsión armónica total de tensión para las 3 fases

Día	Max. THD Va (%)	Max. THD Vb (%)	Max. THD Vc (%)	Max. THD Va, Vb, Vc (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	2.9	2.78	3.19	3.19	5
2	2.82	2.62	2.92	2.92	5
3	2.88	3.1	3.27	3.27	5
4	2.93	2.63	2.79	2.93	5
5	2.93	3.04	3.34	3.34	5
6	2.77	3.03	3.19	3.19	5
7	3.65	3.41	3.17	3.65	5

Nota. THDv: Distorsión armónica total de tensión

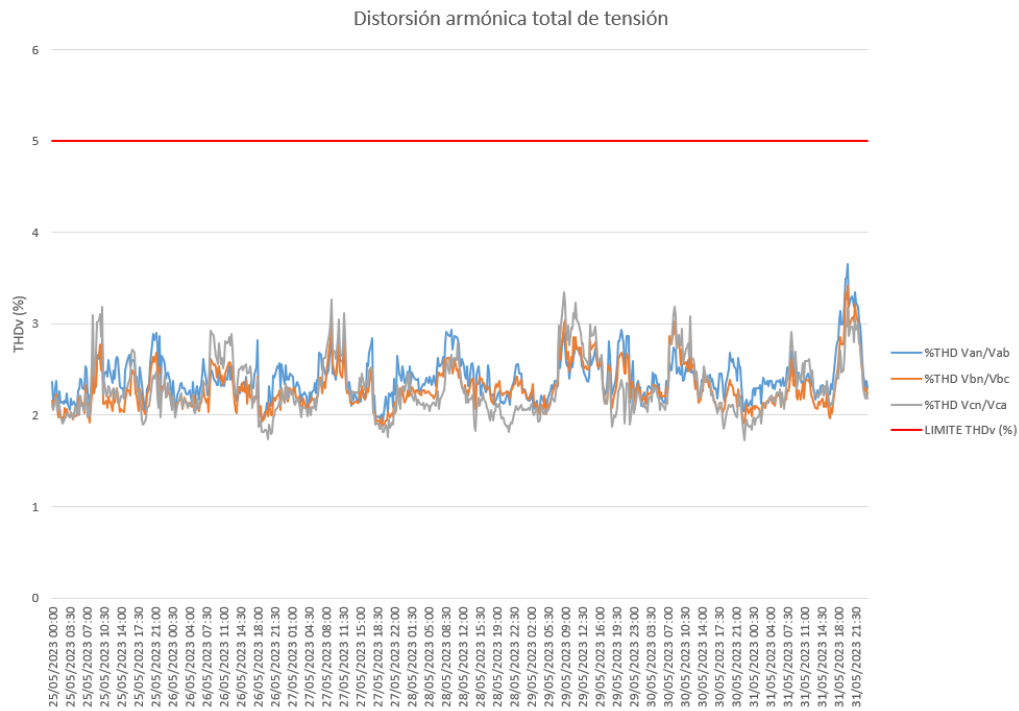


Figura 4. Gráfica de la distorsión armónica total de tensión

Interpretación

La norma IEEE 519 establecen que la distorsión armónica total de tensión no debe superar el 5% para tensiones entre 120V y 69KV. Al examinar la gráfica de la THD, se observa que los valores se encuentran dentro de los límites máximos permitidos.

Distorsión armónica total de corriente (THDi)

Tabla 2. Valores máximos por día de la distorsión armónica total de corriente para las 3 fases

Día	Max. THD Ia (%)	Max. THD Ib (%)	Max. THD Ic (%)	Max. THD Ia, Ib, Ic (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	2.92	2.69	3.53	3.53	5
2	2.44	2.06	3.43	3.43	5
3	8.14	7.21	9.67	9.67	5
4	4.24	4.48	5.25	5.25	5
5	4.41	4.48	5.45	5.45	5
6	6.66	6.14	7.99	7.99	5
7	8.29	6.12	11.14	11.14	5

Nota. THDi: Distorsión armónica total de corriente

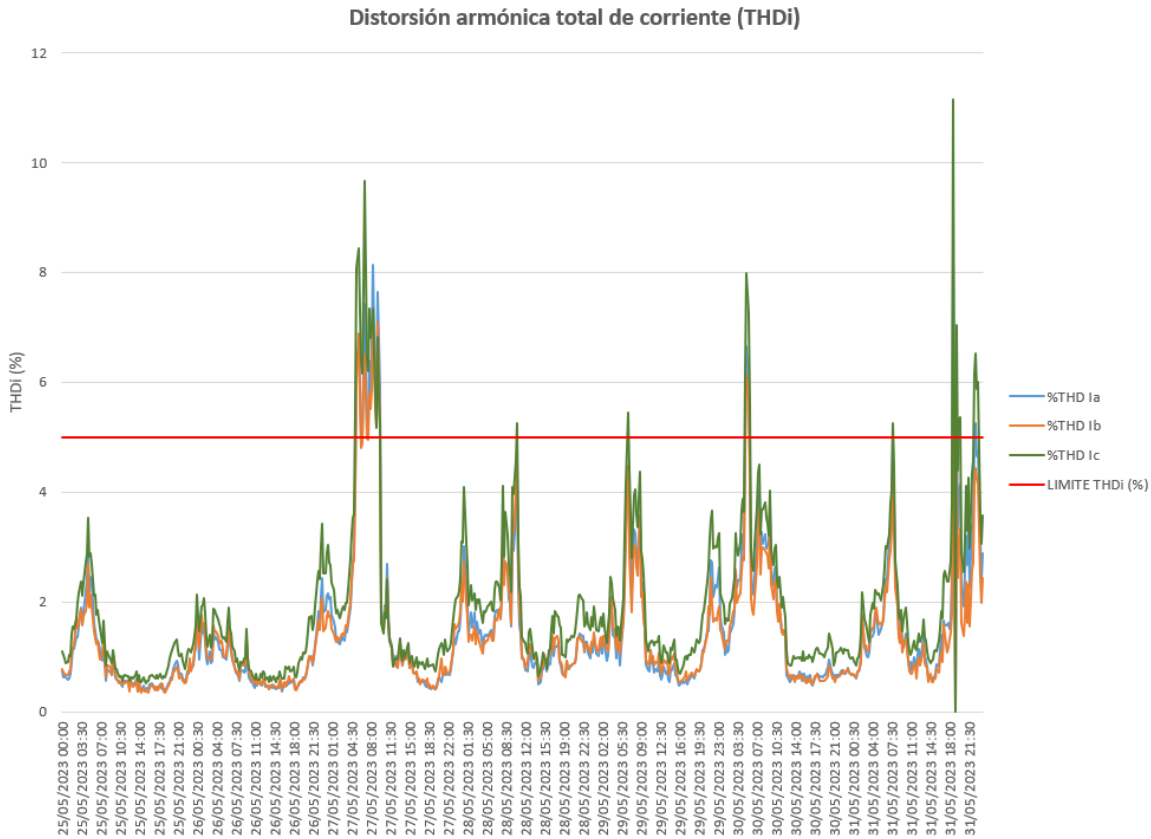


Figura 5. Gráfica de la distorsión armónica total de corriente

Interpretación

Se llevó a cabo un análisis de la distorsión armónica total de corriente siguiendo las pautas y límites establecidos por el Estándar IEEE 519. Los resultados obtenidos de esta medición han revelado datos significativos que merecen un análisis detallado.

El Estándar IEEE 519 define límites específicos para la distorsión armónica total de corriente, dependiendo del tipo de sistema y la capacidad de cortocircuito. En nuestro caso, el sistema en estudio está sujeto a los límites del IEEE 519 para sistemas industriales, que establece un límite de THD de corriente no superior al 5%. Sin embargo, al examinar la gráfica de la THD de corriente, se observa una serie de valores que superan este límite en varios puntos de medición y durante diferentes períodos de tiempo. Estos valores fuera de norma indican la presencia de distorsión armónica de corriente en el sistema, lo que podría tener implicaciones significativas en términos de calidad de la energía eléctrica y funcionamiento de los equipos conectados al sistema.

Distorsión armónica individual de tensión

Tabla 3. Valores máximos por día de la distorsión armónica individual de tensión de orden 3 para las tres fases

Día	Max. Arm. Ind. 3 Va (%)	Max. Arm. Ind. 3 Vb (%)	Max. Arm. Ind. 3 Vc (%)	Max. Va, Vb, Vc (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	1.76	1.76	1.6	1.76	3
2	1.72	1.75	1.6	1.75	3
3	1.7	1.74	1.56	1.74	3
4	1.69	1.76	1.52	1.76	3
5	1.64	1.76	1.54	1.76	3
6	1.66	1.8	1.54	1.8	3
7	1.65	1.7	1.54	1.7	3

Nota. Arm. Ind. V 3: Armónico individual de tensión de orden 3

Tabla 4. Valores máximos por día de la distorsión armónica individual de tensión de orden 5 para las tres fases

Día	Max. Arm. Ind. 5 Va (%)	Max. Arm. Ind. 5 Vb (%)	Max. Arm. Ind. 5 Vc (%)	Max. Va, Vb, Vc (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	1.51	1.41	1.31	1.51	3
2	1.44	1.38	1.34	1.44	3
3	2.08	1.83	1.99	2.08	3
4	2.02	1.97	1.84	2.02	3
5	1.60	1.61	1.49	1.61	3
6	1.70	1.58	1.55	1.70	3
7	1.92	1.54	1.59	1.92	3

Nota. Arm. Ind. 5 V: Armónico individual de tensión de orden 5

Tabla 5. Valores máximos por día de la distorsión armónica individual de tensión de orden 7 para las tres fases

Día	Max. Arm. Ind. 7 Va (%)	Max. Arm. Ind. 7 Vb (%)	Max. Arm. Ind. 7 Vc (%)	Max. Va, Vb, Vc (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	2.09	1.86	2.64	2.64	3
2	1.89	1.73	2.28	2.28	3
3	1.93	2.32	2.52	2.52	3
4	1.44	1.23	1.62	1.62	3
5	1.97	2.1	2.76	2.76	3
6	1.76	2.04	2.53	2.53	3
7	2.82	2.6	2.38	2.82	3

Nota. Arm. Ind. 7 V: Armónico individual de tensión de orden 7

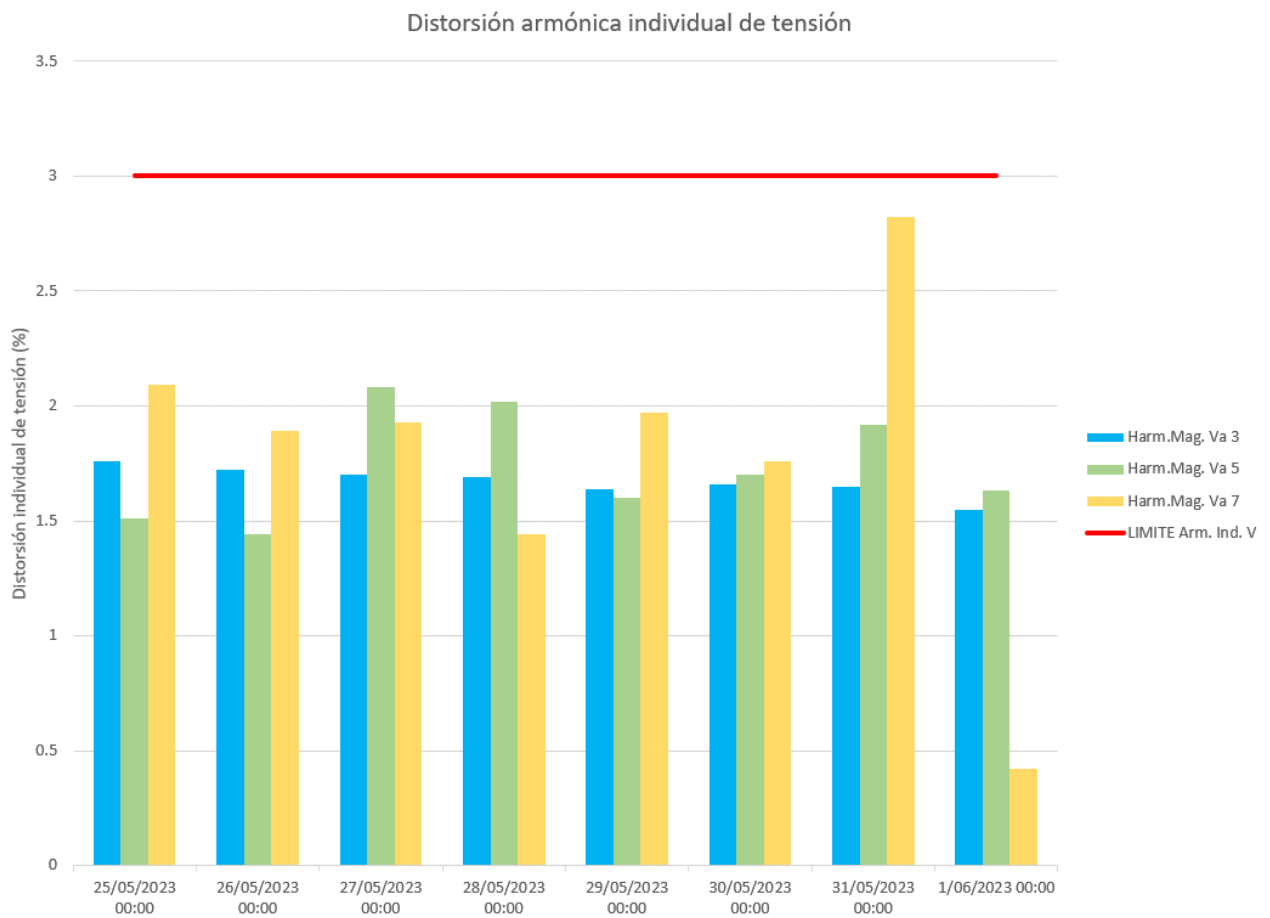


Figura 6. Gráfica de la distorsión individual de tensión para los armónicos de orden 3, 5 y 7

Interpretación

Se realizó la evaluación de la distorsión armónica individual de tensión, siguiendo las directrices establecidas por el Estándar IEEE 519. Que define el límite de 3% de distorsión armónica individual de tensión para tensiones entre 1KV y 69KV.

Al examinar la gráfica de distorsión armónica individual de tensión de orden 3, 5 y 7, se evidencian valores individuales de armónicas que no superan los límites establecidos por la norma en diversos momentos y ubicaciones dentro del sistema de distribución.

Distorsión armónica individual de corriente

Tabla 6. Valores máximos por día de la distorsión armónica individual de corriente de orden 3 para las tres fases

Día	Max. Arm. Ind. 3 Ia (%)	Max. Arm. Ind. 3 Ib (%)	Max. Arm. Ind. 3 Ic (%)	Max. Ia, Ib, Ic (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	2.31	2.06	3.13	3.13	4
2	2.02	1.76	3.19	3.19	4
3	5.71	5.52	8.45	8.45	4
4	2.52	2.32	3.99	3.99	4
5	2.94	2.49	4.19	4.19	4
6	5.19	4.95	7.09	7.09	4
7	5.95	4.55	10.3	10.3	4

Nota. Arm. Ind. 3 I: Armónico individual de corriente de orden 3

Tabla 7. Valores máximos por día de la distorsión armónica individual de corriente de orden 5 para las tres fases

Día	Max. Arm. Ind. 5 la (%)	Max. Arm. Ind. 5 lb (%)	Max. Arm. Ind. 5 lc (%)	Max. la, lb, lc (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	0.76	0.65	0.74	0.76	4
2	1.04	1.03	0.94	1.04	4
3	3.76	2.99	3.88	3.88	4
4	2.04	2.26	2.00	2.26	4
5	2.41	2.79	2.32	2.79	4
6	2.02	1.68	1.90	2.02	4
7	4.15	2.91	2.83	4.15	4

Nota. Arm. Ind. 5 l: Armónico individual de corriente de orden 5

Tabla 8. Valores máximos por día de la distorsión armónica individual de corriente de orden 7 para las tres fases

Día	Max. Arm. Ind. 7 la (%)	Max. Arm. Ind. 7 lb (%)	Max. Arm. Ind. 7 lc (%)	Max. la, lb, lc (%)	Límite Max. IEEE-519 (%)
1	0.85	1.07	0.86	1.07	4
2	0.78	0.48	0.83	0.78	4
3	4.26	4.51	3.63	4.51	4
4	0.88	1.79	1.41	1.79	4
5	2.09	2.58	2.05	2.58	4
6	2.14	2.47	2.01	2.47	4
7	1.51	1.85	1.63	1.85	4

Nota. Arm. Ind. 7 l: Armónico individual de corriente de orden 7

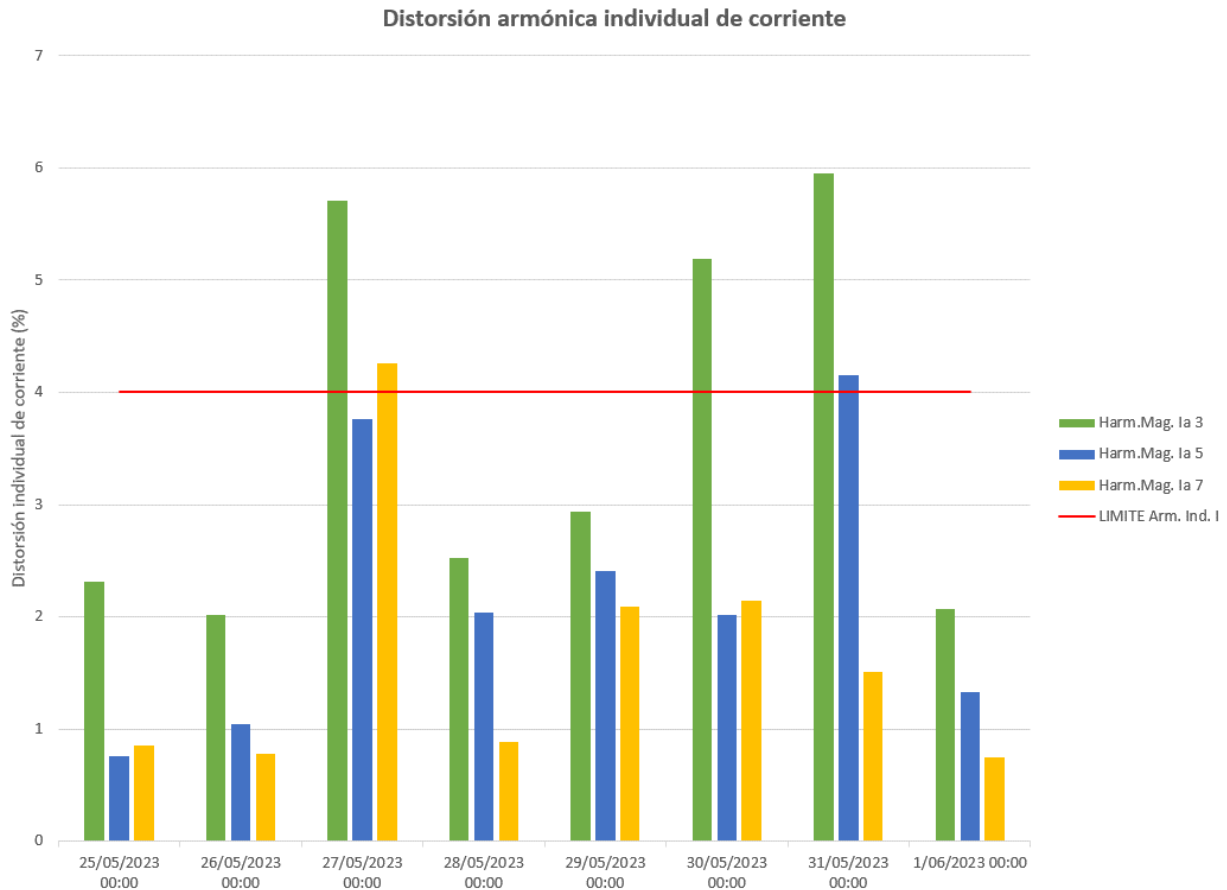


Figura 7. Gráfica de la distorsión individual de corriente para los armónicos de orden 3, 5 y 7

Interpretación

Al examinar la gráfica de distorsión armónica individual de corriente, se observa claramente que varios valores individuales de armónicas de orden 3, 5 y 7 superan el valor de 4% establecido por la norma IEEE 519 en diferentes momentos y ubicaciones dentro del sistema. Estos valores fuera de norma indican la presencia de distorsión armónica significativa en la forma de onda de corriente, lo que puede tener implicaciones significativas en la calidad de la energía eléctrica suministrada y en el funcionamiento de los equipos conectados.

Objetivo específico 2: Análisis de las propuestas de sistemas filtros armónicos.

Una de las formas habituales de controlar la distorsión armónica es colocar un filtro pasivo de armónicos en derivación cerca de la carga o cargas productoras de

armónicos. El dispositivo productor de armónicos puede considerarse generalmente como una fuente de corriente armónica (o como una fuente de tensión armónica que da lugar a un flujo de corriente armónica). El objetivo del filtro de armónicos es derivar parte de la corriente armónica de la carga al filtro, reduciendo así la cantidad de corriente armónica que fluye al sistema eléctrico (IEEE, 2020) (véase la figura 8).

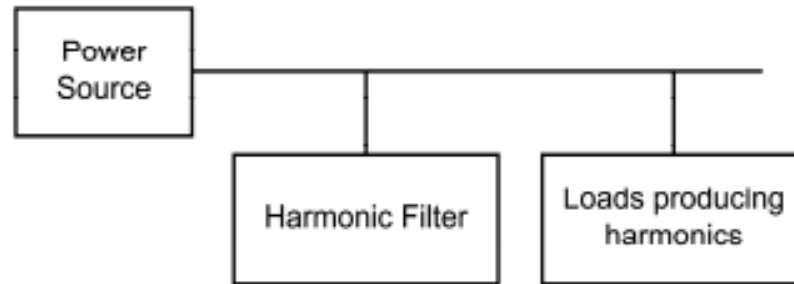


Figura 8. Filtro de armónicos que desvía la corriente armónica entre las cargas productoras de armónicos y la fuente de alimentación

La implementación de sistemas de filtros armónicos pasivos se presenta como una solución efectiva para la mitigación de armónicos. Estos sistemas de filtros están diseñados para atenuar selectivamente las armónicas no deseadas, mejorando así la calidad del suministro eléctrico. En este contexto, el objetivo 2 es analizar tres sistemas de filtros armónicos con el fin de comprender y optimizar su funcionamiento y seleccionar la mejor alternativa para mitigar los efectos negativos de las armónicas que se producen en un parque eólico.

Existen varias configuraciones de filtros pasivos armónicos en derivación, como filtros de sintonía simple sintonizados, filtros pasa alto, etc. Estas configuraciones proporcionan una rama de baja impedancia en la red eléctrica para atrapar los órdenes armónicos que el filtro está sintonizado para mitigar. Teóricamente, estos filtros tienen impedancia cero a la frecuencia de sintonización, absorbiendo así el armónico de interés (ABBAS, y otros, 2019).

Tres tipos de filtros de CA convencionales se muestran en la figura (SHENG-KUAN, y otros, 2020)

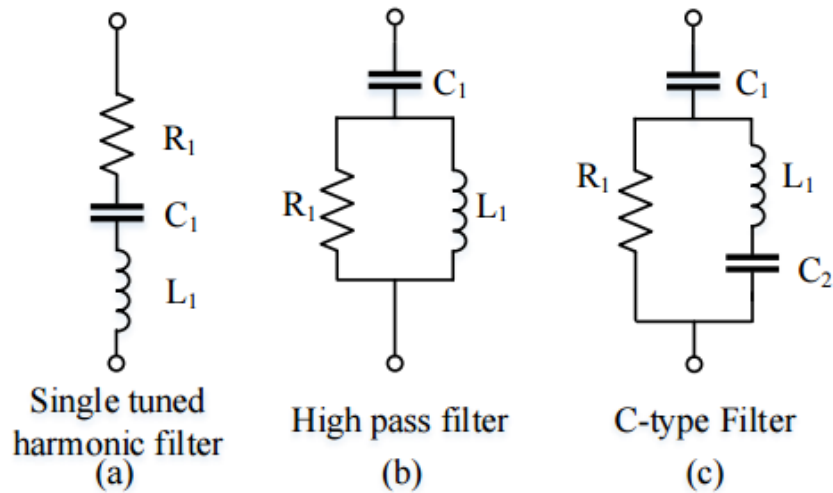


Figura 9. (a) Filtro sintonizado simple (b) Filtro pasa alto (c) Filtro tipo C

Análisis del sistema de filtros pasivo sintonizado simple

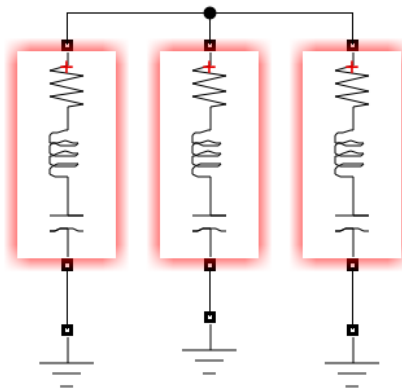


Figura 10. Sistema de filtros sintonizado simple

Los filtros de sintonía simple (ST, por sus siglas en inglés) son filtros eficientes y pasarán por alto un determinado armónico al que están sintonizados. Muchas veces se aplica un grupo de filtros ST, cada uno sintonizado a una frecuencia específica (DAS, 2015).

Interpretación

Para el análisis de un sistema de filtros sintonizado simple (circuito resonante RLC), se utilizó el software Matlab/Simulink, considerando los diferentes parámetros afectan

el comportamiento del filtro (DAS, 2015):

Impedancia del filtro (Z)

Es la impedancia del circuito serie RLC:

$$Z = R + j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} \dots\dots\dots (3)$$

En un filtro ST, como las impedancias inductiva y capacitiva son iguales en la frecuencia de resonancia, la impedancia viene dada por la resistencia R :

A la frecuencia angular de resonancia ω_n , $Z = R$.

ω es la frecuencia angular sintonizada en radianes y viene dada por:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (4)$$

X_0 es la reactancia del inductor o condensador a la frecuencia angular sintonizada.

Aquí $n = \frac{f_n}{f}$, donde f_n es la frecuencia sintonizada del filtro y f es la frecuencia del sistema de potencia.

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots (5)$$

Frecuencia Resonante (f_n)

Es la frecuencia en la cual la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales en magnitud, pero opuestas en fase.

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (6)$$

En el modelo, f_n es el punto central alrededor del cual el filtro sintonizado responde más eficientemente. En este caso se ha diseñado el sistema para compensar las frecuencias armónicas de orden 3 (180Hz), 5 (300Hz) y 7 (420Hz).

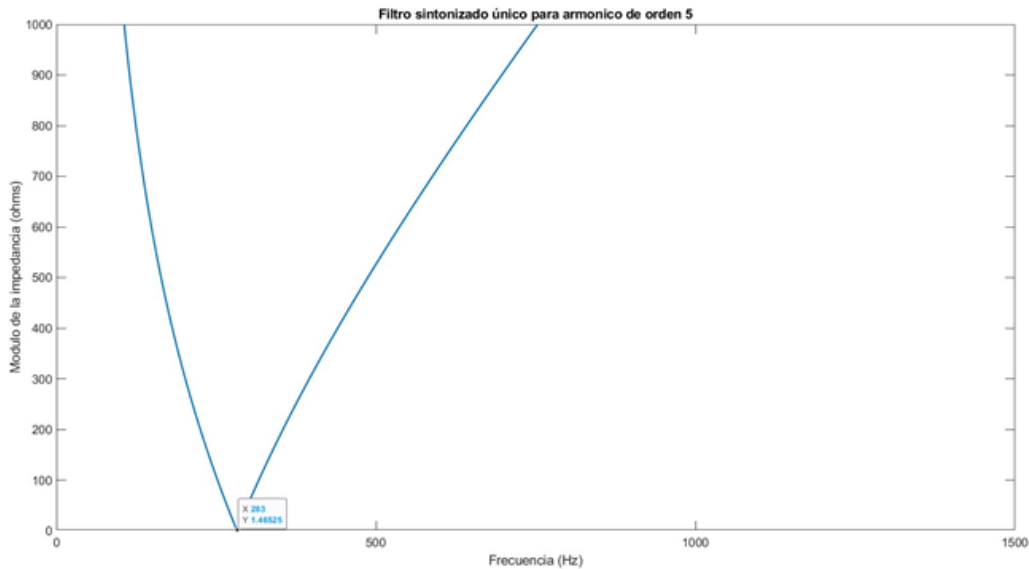


Figura 11. Curva de impedancia del filtro de amortiguación simple para el armónico de orden 5

Factor de Calidad (Q):

Está relacionado con la anchura de banda del filtro y su capacidad para seleccionar una frecuencia específica. Un valor alto de Q indica una respuesta de banda estrecha y una mayor eficiencia del filtro en la discriminación de frecuencias cercanas a la frecuencia resonante.

El factor de calidad del filtro de sintonización se define como:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \dots\dots\dots (7)$$

En el modelo se evalúan los diferentes valores de Q, variando el valor de la resistencia, como se muestra en la figura para sintonización de la frecuencia armónica de orden 5:

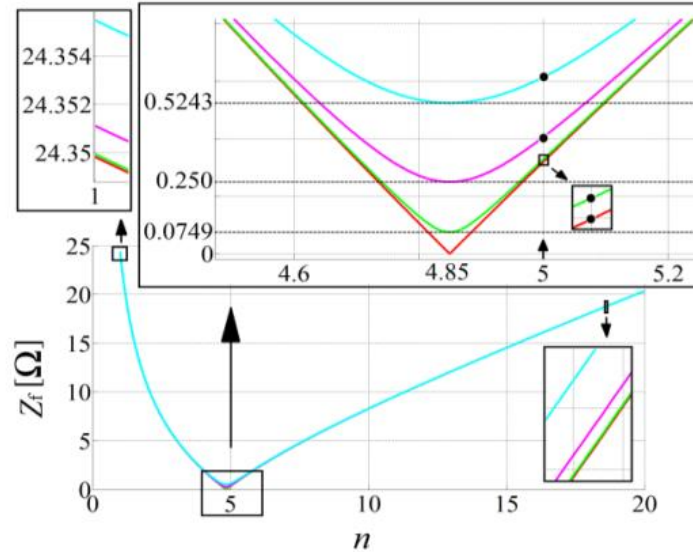


Figura 12. Variación de la curva de impedancia con el factor de calidad Q

Análisis de un sistema de filtros pasivo amortiguado pasa alto

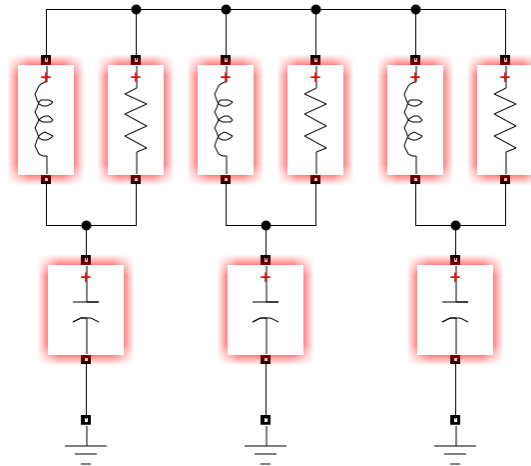


Figura 13. Sistema de filtros amortiguado pasa alto

Interpretación

Para el análisis de un sistema de filtros amortiguado pasa alto de segundo orden se

consideró se utilizó el software Matlab/Simulink, considerando los diferentes parámetros afectan el comportamiento del filtro (DAS, 2015):

Impedancia del filtro (Z)

Es la impedancia del circuito:

$$Z = \frac{1}{j\omega_n C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega_n L} \right)^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

Frecuencia Resonante (f_0)

En el modelo, f_0 es el punto central alrededor del cual el filtro sintonizado responde más eficientemente. En nuestro caso se ha diseñado el sistema para compensar las frecuencias armónicas de orden 3 (180Hz), 5 (300Hz) y 7 (420Hz). En la siguiente imagen se puede apreciar la curva de impedancia VS frecuencia para el orden armónico 5.

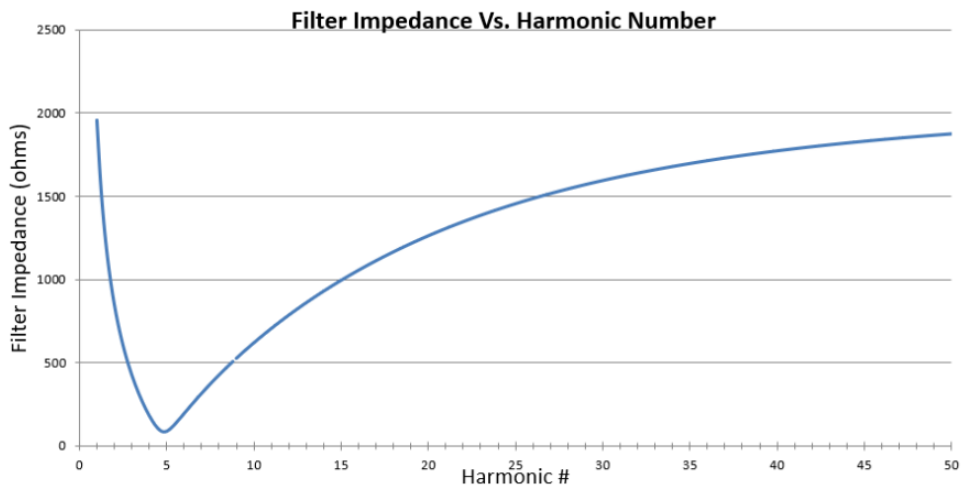


Figura 14. Curva de la impedancia del filtro pasa alto para el armónico de orden 5

Factor de Calidad (Q):

Está relacionado con la anchura de banda del filtro y su capacidad para seleccionar una frecuencia específica. Un valor alto de Q indica una respuesta de banda estrecha

y una mayor eficiencia del filtro en la discriminación de frecuencias cercanas a la frecuencia resonante. En el modelo se evalúan los diferentes valores de Q.

El factor de calidad del filtro de sintonización se define como:

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} \dots\dots\dots (9)$$

Ancho de Banda (Δf):

El ancho de banda es la gama de frecuencias en la cual la respuesta del filtro está dentro de ciertos límites aceptables. Está directamente relacionado con el factor de calidad (Q). Un filtro con un Q alto tendrá un ancho de banda estrecho, y viceversa.

Factor de Amortiguación (D):

Se relaciona con la respuesta transitoria del sistema y la presencia de oscilaciones en la salida. Un valor bajo de D sugiere un sistema subamortiguado con oscilaciones prolongadas, mientras que un valor alto indica un sistema más amortiguado con una respuesta más rápida.

Análisis de un sistema de filtros pasivo amortiguado pasa alto tipo C

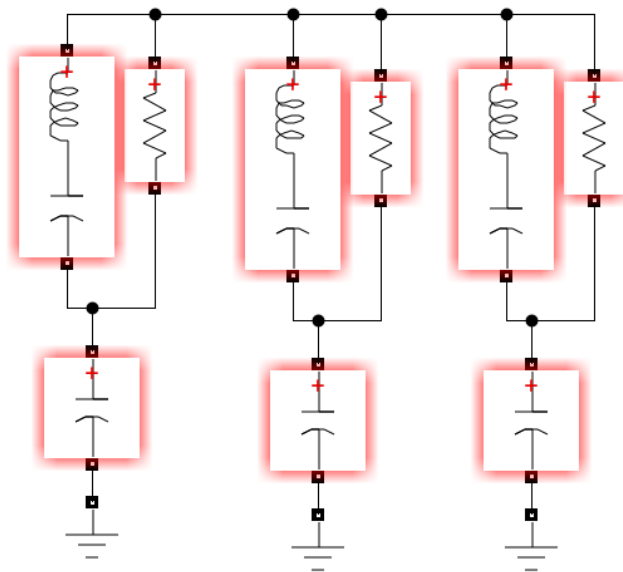


Figura 15. Sistema de filtros amortiguado pasa alto tipo C

Interpretación

Para el análisis de un sistema de filtros amortiguado pasa alto de segundo orden se utilizó el software Matlab/Simulink, considerando los diferentes parámetros afectan el comportamiento del filtro:

Impedancia del filtro (Z)

Es la impedancia del circuito:

$$Z = \frac{1}{j\omega_n C_1} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega_n L + 1/j\omega_n C} \right)^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

Frecuencia Resonante (f_0)

En el modelo, f_0 es el punto central alrededor del cual el filtro sintonizado responde más eficientemente. En nuestro caso se ha diseñado el sistema para compensar las frecuencias armónicas de orden 3 (180Hz), 5 (300Hz) y 7 (420Hz). En la siguiente imagen se puede apreciar la curva de impedancia VS frecuencia para el orden armónico 5.

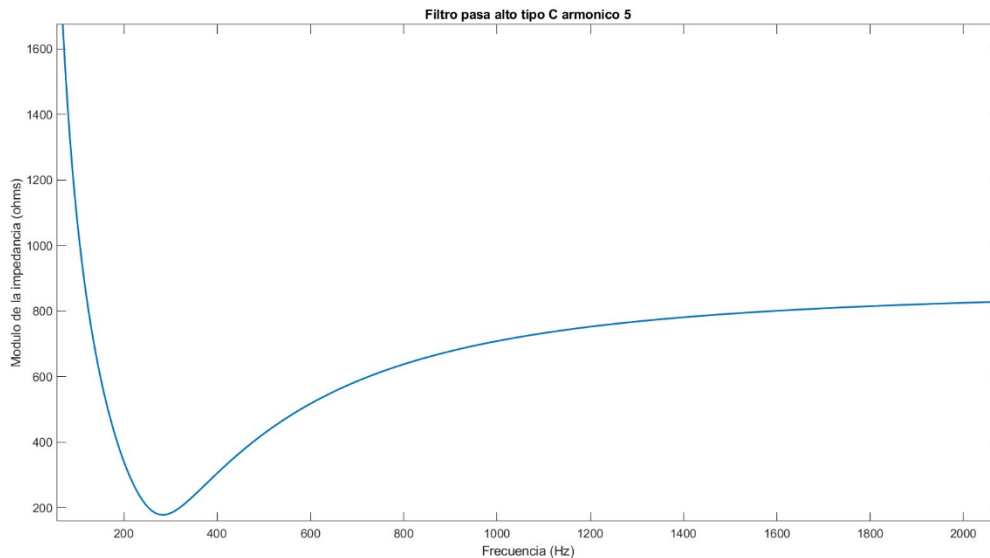


Figura 16. Curva de la impedancia del filtro pasa alto tipo C para el armónico de orden 5

Factor de Calidad (Q):

Está relacionado con la anchura de banda del filtro y su capacidad para seleccionar una frecuencia específica. Un valor alto de Q indica una respuesta de banda estrecha y una mayor eficiencia del filtro en la discriminación de frecuencias cercanas a la frecuencia resonante. En el modelo se evalúan los diferentes valores de Q.

El factor de calidad del filtro de sintonización se define como:

$$Q = \frac{R\omega_0 C}{\omega_0^2 LC - 1} \dots\dots\dots (11)$$

Ancho de Banda (Δf):

El ancho de banda es la gama de frecuencias en la cual la respuesta del filtro está dentro de ciertos límites aceptables. Está directamente relacionado con el factor de calidad (Q). Un filtro con un Q alto tendrá un ancho de banda estrecho, y viceversa.

Factor de Amortiguación (D):

Se relaciona con la respuesta transitoria del sistema y la presencia de oscilaciones en la salida. Un valor bajo de D sugiere un sistema subamortiguado con oscilaciones prolongadas, mientras que un valor alto indica un sistema más amortiguado con una respuesta más rápida.

Objetivo específico 3: Simular la calidad de energía con la implementación de sistemas de filtros armónicos.

Se utilizó a MATLAB SIMULINK v studens 2021 como herramienta de simulación para modelar la respuesta del sistema con las tres configuraciones distintas de sistemas de filtros armónicos.

En la simulación informática de análisis de armónicos, las tensiones y corrientes distorsionadas debidas a dispositivos no lineales se modelan como fuentes de armónicos, y las soluciones de flujo de potencia de la red se encuentran con estas fuentes de armónicos. El enfoque general consiste en simular las fuentes de corriente

armónica inyectando las corrientes armónicas en la red y simular las fuentes de tensión armónica colocando tensión armónica en los buses, y calcular las tensiones y corrientes en la red en función de las fuentes armónicas en cada frecuencia armónica individual. Una vez resueltas las tensiones y corrientes de la red, se calculan distintos índices de armónicos en los puntos críticos y se comparan con los límites de las normas o códigos, o con cualquier limitación contractual aplicable (IEEE, 2018).

Simulación de la red sin los sistemas de filtros armónicos:

Analizamos la forma de onda de corriente con la generación de armónicos individuales del tercer, quinto y cuarto orden.

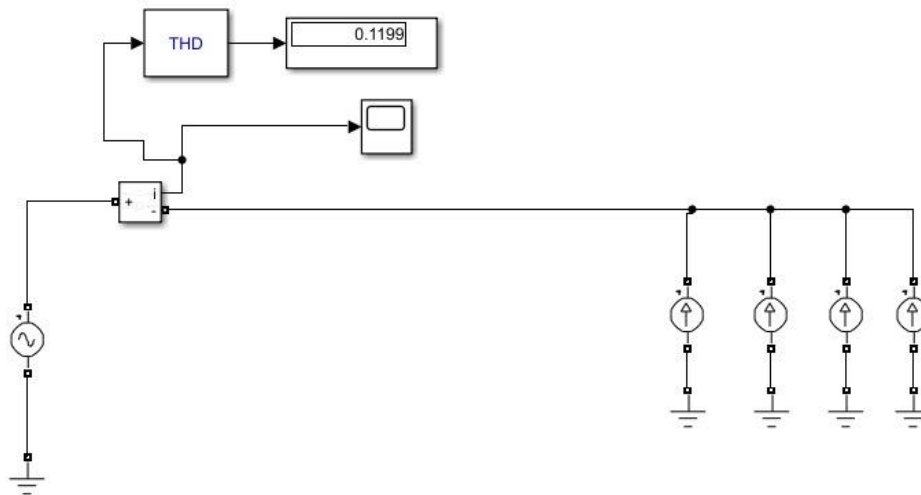


Figura 17. Configuración de la red sin el sistema de filtros

Se obtiene una forma de onda distorsionada con un THDi del 11.99%, como se puede apreciar en la siguiente figura:

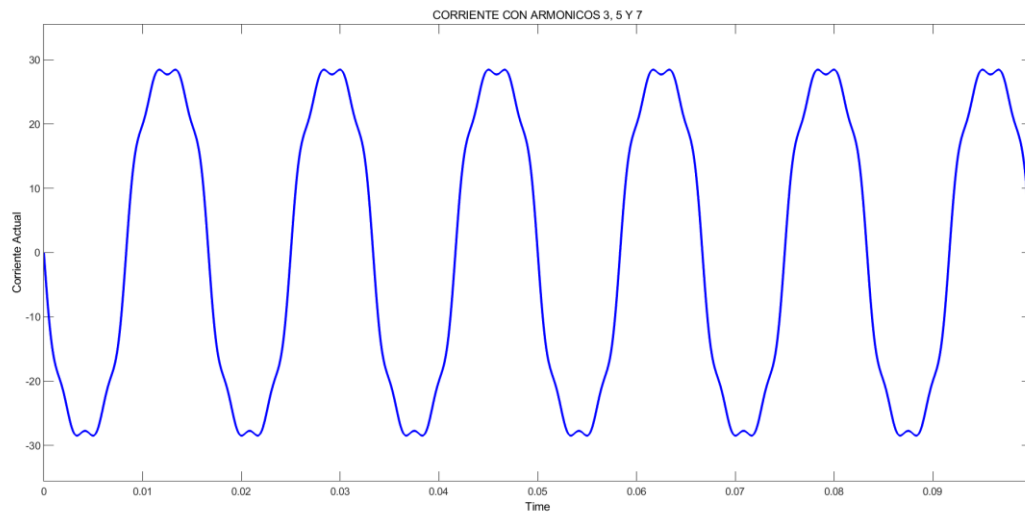


Figura 18. Forma de onda de la corriente distorsionada

Simulación de la red con los diferentes sistemas de filtros armónicos:

Analizamos los valores de THDi de orden 3, 5 y 7.

Simulación con el sistema de filtros de sintonización simple:

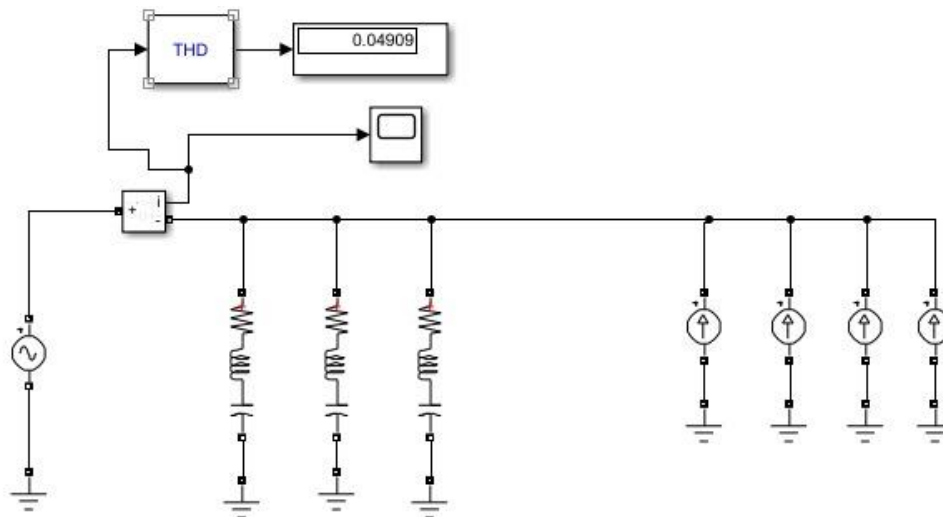


Figura 19. Configuración de la red con el sistema de filtros de sintonización simple

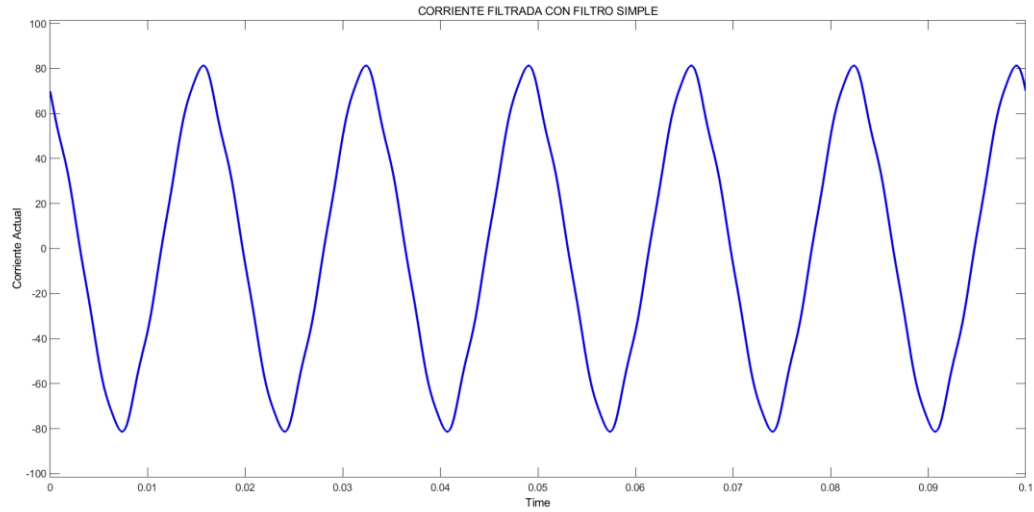


Figura 20. Forma de onda de la corriente con el sistema de filtros sintonizado simple

Simulación con el sistema de filtros de amortiguación pasa alto:

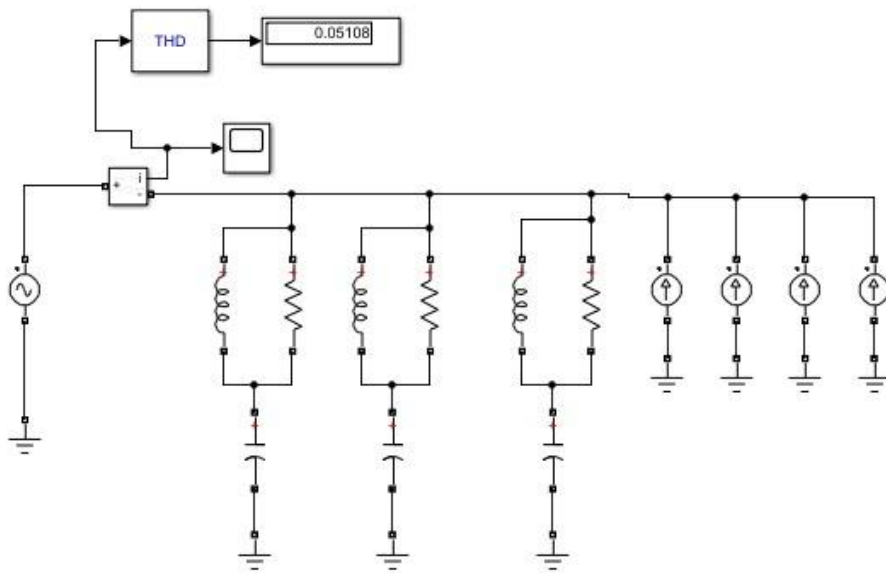


Figura 21. Configuración de la red con el sistema de filtros amortiguado pasa alto

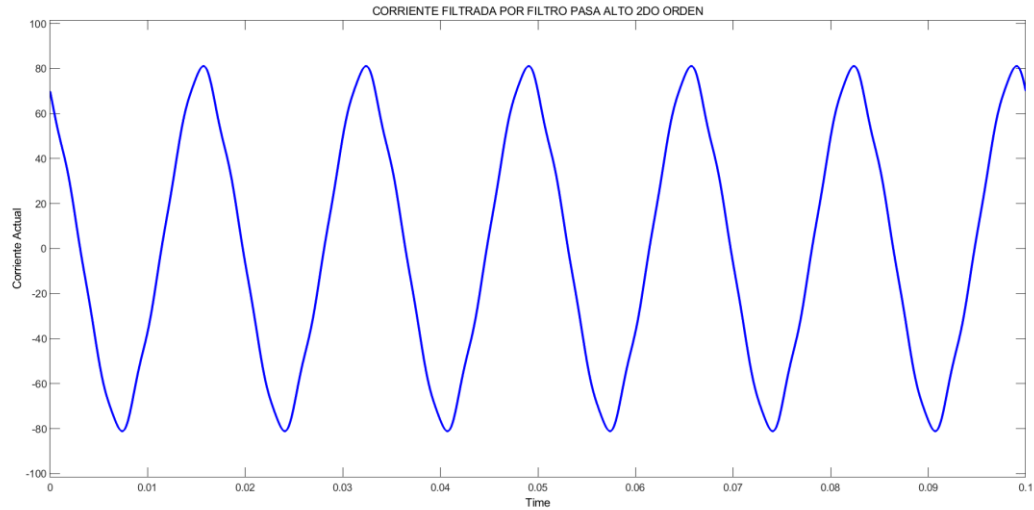


Figura 22. Forma de onda de la corriente con el sistema de filtros amortiguado pasa alto

Simulación con el sistema de filtros de amortiguación pasa alto tipo C:

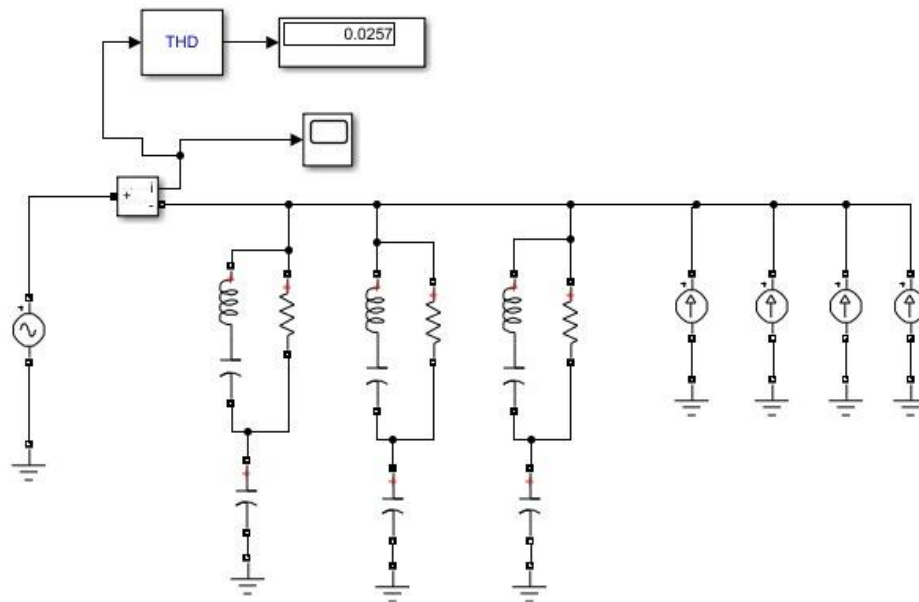


Figura 23. Configuración de la red con el sistema de filtros amortiguado pasa alto tipo C

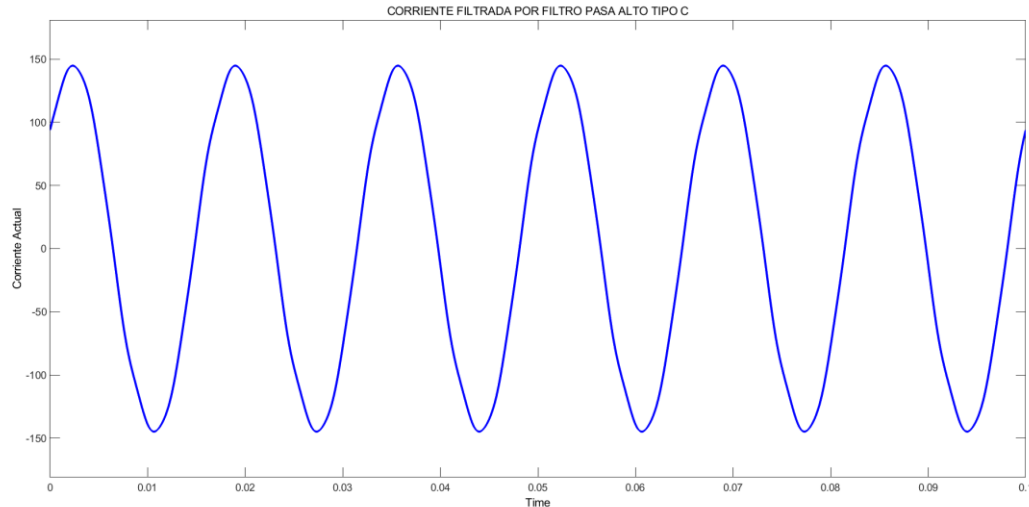


Figura 24. Forma de onda de la corriente con el sistema de filtros amortiguado pasa alto tipo C

Interpretación

El sistema de filtros de sintonización simple mostró una atenuación en las 3 frecuencias de resonancia, logrando una reducción del THDi del 11.99% al 4.91%.

La respuesta en frecuencia demostró una selectividad eficiente, minimizando la interferencia con la frecuencia fundamental. La simulación indicó que el filtro de sintonización simple cumplió con éxito su objetivo de atenuar el armónico específico.

El sistema de filtros pasa alto amortiguado mostró una atenuación a partir de las frecuencias de corte, logrando una reducción del THDi del 11.99% al 5.1%.

La respuesta transitoria demostró una rápida disipación de la energía, evitando oscilaciones prolongadas. La frecuencia fundamental se mantuvo prácticamente sin cambios, confirmando la eficacia del filtro en atenuar armónicos de frecuencias más altas.

El filtro amortiguado tipo C exhibió una atenuación significativa en la frecuencia de resonancia, alcanzando una reducción del THDi del 11.99% al 2.5%.

La capacitancia controló la respuesta transitoria, logrando una absorción eficaz de la energía sin generar oscilaciones no deseadas. La simulación confirmó que el filtro amortiguado tipo C proporcionó una respuesta precisa y estable en la atenuación del armónico objetivo.

Para la evolución del beneficio / costo se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

Estudio de Armónicos:

Se realizó un estudio de campo para identificar los armónicos presentes en la red del parque eólico. Las mediciones revelaron la presencia significativa de armónicos de tercer, quinto y séptimo orden.

Diseño de Sistemas de Filtros Armónicos:

Con base en la información recopilada, se diseñaron sistemas de filtros armónicos específicos para abordar los armónicos identificados. Se seleccionaron filtros de sintonización simple y filtros amortiguados para cubrir las frecuencias clave.

Simulaciones y Análisis Económico:

Se utilizaron herramientas de simulación para analizar el comportamiento de los filtros armónicos en diferentes escenarios operativos.

El análisis económico consideró los costos de inversión en la adquisición e instalación de los filtros, así como los costos operativos y de mantenimiento a lo largo del tiempo.

Comparación de Escenarios:

Se evaluaron varios escenarios, de propuestas de sistemas de filtros armónicos.

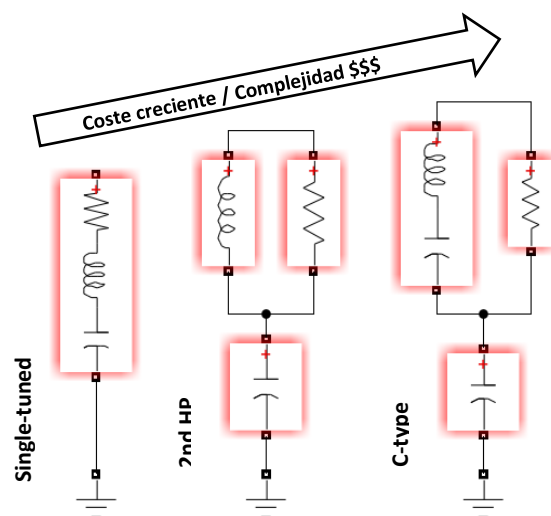


Figura 25. Variación del costo según el tipo de sistema de filtros

Interpretación

La simulación mostró una reducción efectiva de los niveles de armónicos en la red del parque eólico, mejorando la calidad de la energía suministrada.

La relación beneficio/costo resultó ser favorable, con un B/C superior a 1, indicando que los beneficios económicos superan los costos asociados.

Basándose en los resultados obtenidos, se concluyó que la implementación de sistemas de filtros armónicos en el parque eólico es económicamente viable y beneficia significativamente la calidad de la energía.

V. DISCUSIÓN

En la investigación se planteó el primero objetivo específico que fue determinar la calidad de energía en el parque eólico de La Libertad, se pudo reducir del valor inicial de THDi = 11.99% a 2.5% a través de las propuestas de filtros armónicos simulados en MATLAB / Simulink v Studens 2021, esto nos da entender que existe una relación entre las dos variables de nuestra investigación. Quiere decir que la mejora de la variable independiente afecta de manera positiva a la variable dependiente ocasionado una mejor calidad de energía en la planta eólica. Dado lo expuesto, se valida la hipótesis de investigación que sostiene la existencia de una correlación entre las variables de calidad de energía y los filtros armónicos en el parque eólico de La Libertad. Basándonos en el standard 1159 (IEEE, 2019) donde manifiesta que la calidad de energía es la capacidad de un sistema o equipo eléctrico para operar de manera adecuada sin causar perturbaciones electromagnéticas perjudiciales a otros sistemas o equipos conectados en el mismo entorno electromagnético. Según la norma 61000-4-30 (IEC, 2015), se refiere al grado en que las características de tensión, corriente y frecuencia de la energía eléctrica suministrada cumplen con el nivel de calidad esperado y aceptable para el normal funcionamiento de equipos en su entorno electromagnético. De forma similar (SHENG-KUAN, y otros, 2020), En su investigación, mediante la aplicación de diversos modelos de filtros pasivos, llega a la conclusión de que logra reducir los valores iniciales de THDi del 3.27% a un nivel considerablemente inferior, alcanzando un 1.05%. así también la investigación de los autores (ISHAYA, y otros, 2023) utiliza filtro pasivo sintonizado simple logrando disminuir de manera considerable la distorsión armónica inicial de THDi de 14.93% a 4.87%.

En consecuencia, al examinar los resultados y basándonos en lo mencionado anteriormente, ratificamos que las propuestas de sistemas de filtros armónicos más sólida se traducen en una respuesta más efectiva en términos de calidad de energía, alcanzando niveles óptimos en el parque eólico de La Libertad.

El segundo objetivo fue propuesto de sistemas de filtros armónicos en el parque eólico de La Libertad. En la investigación se planteó diversos sistemas de filtros armónicos como, filtro armónico de sintonización simple, filtro de paso alto y filtro tipo

C, estos fueron calculados en cada caso para poder ser contrastados de su utilidad en la mitigación de armónicos con la ayuda de un simulador MATLAB / Simulink vStudens 2021. A partir de lo expuesto previamente, se respalda la hipótesis de investigación. La implementación de distintos sistemas de filtros armónicos propuestos eficientemente ha demostrado una mejora sustancial en la calidad de energía, validando así la existencia de una relación entre ambas variables. Basándonos en la norma estándar 519 (IEEE, 2022), un sistema de filtros armónicos es esencial para controlar y reducir la distorsión armónica en una red eléctrica, contrarrestando los efectos perjudiciales de los armónicos. Estos sistemas emplean componentes como inductores, capacitores y resistencias, dispuestos de manera estratégica para lograr una atenuación selectiva de los armónicos. Pueden ser diseñados para abordar armónicos específicos o para tratar un rango más amplio de armónicos, proporcionando así una solución integral para mejorar la calidad de la energía eléctrica. Según (DUGAN, y otros, 2004), Los filtros armónicos son sistemas diseñados para suprimir los armónicos en una señal eléctrica, previniendo su propagación en la red eléctrica y protegiendo así los equipos conectados de los efectos nocivos de los armónicos. Así mismo (SHENG-KUAN, y otros, 2020), empleo en su investigación diverso sistemas de filtros armónicos pasivos como filtro de paso alto RC, filtro armónico sintonizado único, filtro de paso alto y filtro tipo C, este resultado concuerda con los que se propuso, ya que en las dos investigaciones usaron sistemas de filtros similares para realizar la mitigación de los armónicos y así mejorar la calidad de la energía en un parque eólico. Los investigadores (ISHAYA, y otros, 2023), usaron un sistema de filtro pasivo sintonizado simple con las cuales obtuvieron resultados positivos por ello la relación con nuestra investigación es vinculante en cuanto al resultado de uno de los filtros con las cuales podemos contrastar de manera porcentual. Estos resultados son coincidentes pero no vinculantes por utilizar filtros activos en la investigación de los autores (MISHRA, y otros, 2022), donde realiza un estudio sobre el funcionamiento del filtro LCL Filtro convencional y propone un filtro LCL optimizado obteniendo como resultado la disminución de la distorsión armónica total a un valor inferior al 5% según la normal IEEE 519, así mismo (DARUSSALAM, y otros, 2020), estos investigadores realizaron un estudio de las diferentes técnicas de

filtros armónicos como filtros activos, filtros pasivos y filtro híbridos para poder mitigar las distorsiones armónicas, dentro de estas técnicas usamos la de los filtros pasivos para poder realizar nuestra investigación es por ello que es vinculante desde el punto de vista del uso de una de sus técnicas. (FAYSSAL, y otros, 2021), es vinculante a nuestro estudio ya que utilizaron filtro pasivo LCL para mejorar las distorsiones armónicas, además lograron un factor de potencia de 0.98. Con esto se evidencia que los sistemas de filtros armónicos son esenciales para controlar y disminuir las distorsiones armónicas en un sistema eléctrico, sin importar en qué lugar se encuentre la planta eólica. (MUTHURAJ, y otros, 2021), En su investigación exhaustiva sobre el sistema de transformación de energía eólica con un generador eléctrico de inducción de doble alimentación, los autores abordan desafíos relacionados con condiciones desbalanceadas y armónicas en la red eléctrica de parques eólicos. Proponen estrategias innovadoras, como el uso de convertidores de matriz y filtros FIR de paso de banda, para optimizar el rendimiento del sistema en condiciones adversas, además, se subraya el papel fundamental de los filtros FIR de paso de banda en la mejora general del rendimiento del sistema. (ABDEL Wahed, y otros, 2020), en su artículo, los autores investigaron la mitigación de armónicos en parques eólicos mediante el uso de una función de filtrado activo en derivación con sistemas de generadores de inducción de doble alimentación. El objetivo principal fue analizar y evaluar la energía en parques eólicos, considerando factores como la presencia de armónicos, fluctuaciones de tensión y desequilibrios de carga que podrían impactar la estabilidad de la red eléctrica. Además, se destacó la eficacia de la función de filtrado activo en derivación propuestas, que se basa en la identificación precisa de corrientes armónicas y su compensación mediante teorías de potencia reactiva y activa instantánea. Los resultados y análisis de simulaciones respaldan la efectividad de esta función en la mitigación de armónicos.

En el tercer objetivo específico fue determinar la calidad de energía con los sistemas de filtros armónicos aplicando el software MATLAB / Simulink v Studens 2021, Los resultados obtenidos con la aplicación de los diferentes sistemas de filtros armónicos como del filtro armónico de sintonización simple es de THDi 11.99 a 4.9%, filtro de paso alto paso de THDi 11.99 a disminuir hasta 5.1%, filtro tipo C descendió

de THDi 11.99 a 2.5%, con estos valores podemos deducir que el filtro tipo C es la mejor opción dentro de nuestras propuestas de uso de filtros pasivos. De las cuales podemos decir que nuestra hipótesis tiene relación entre las variables de nuestra investigación. (BEZERRA, y otros, 2019), En su investigación, se enfocan en mejorar la eficiencia de los sistemas de producción de energía eólica, centrándose específicamente en la mitigación de armónicos de corriente generados por un generador de inducción doblemente alimentado, utiliza dos sistemas obteniendo los siguientes resultados, con el controlador PI mejora de 17.21% a 5.68% con el controlador proporcional multiresonante de 14.21% a 3.18%. (RODARTE, y otros, 2021), En su investigación, se propuso desarrollar métodos efectivos para reducir los armónicos en sistemas de generación de energía eólica. Se enfocaron en mantener una calidad óptima de la energía, centrándose específicamente en la implementación de un método de control lineal en el convertidor del lado de la red loco mejorar de 10.47% a 3.06%. Esta estrategia permitió rastrear y mitigar eficientemente las señales periódicas asociadas a los armónicos de corriente en dicho convertidor, logrando así una destacada capacidad de rechazo de los armónicos generados. Asimismo, (MISHRA, y otros, 2022), en su artículo, los autores se propusieron analizar y evaluar el rendimiento de un filtro LCL propuesto para un sistema de conversión de energía eólica con un generador de inducción eléctrica doblemente alimentado. Demostraron que el valor de armónicos sin filtro era del 17.05%, y al utilizar el filtro propuesto, este valor se redujo significativamente a un 4.69%. Además de validar la efectividad del método de diseño del filtro, los resultados destacan su utilidad en la mejora del rendimiento y la eficiencia del sistema de conversión de energía eólica. Los autores (SABIR, y otros, 2021), en su investigación analizan los armónicos generados en un generador eléctrico de inducción doblemente alimentado impulsado por una turbina eólica durante cargas lineales y no lineales. En su estudio, los autores abordan la relevancia de la calidad de energía en parques eólicos y cómo los armónicos generados pueden afectarla. Los resultados obtenidos demuestran que el filtro activo híbrido reduce los armónicos hasta un 4.96% en comparación con el 29.66% inicial. Los investigadores (VISHAL, y otros, 2019), en su investigación identificaron que las turbinas eólicas basadas en DFIG presentan baja calidad de energía debido a que

cuentan con cargas no lineales que generan distorsiones armónicas en el sistema. Este filtro activo utiliza un nuevo control vectorial y filtros de autoajuste para compensar la generación de las corrientes armónicas de las cargas no lineales. Se lleva a cabo la evaluación de la Distorsión Armónica Total (THD) mediante el análisis de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) en la corriente de la red. Se observa que la THD es del 2,88%, una cifra notablemente inferior a los límites establecidos en los estándares IEEE-519.

Por último, el objetivo general fue evaluar el impacto de las propuestas de los sistemas de filtros armónicos en la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad. El impacto después de evaluar cada uno de las propuestas de filtros armónicos es efectivamente positiva ya que se pudo corroborar con el simulador MATLAB/Simulink vStudens 2021 que todos los sistemas logran mitigar los armónicos de manera sustancial, pero siendo el más adecuado el filtro tipo C que reduce de 11.99% a 2.5%. podemos decir que la hipótesis es vinculante porque se relaciona con las variables de nuestra investigación. Esta propuesta corroborada mejoró la calidad de energía en el parque eólico de La Libertad simuladamente. En relación a esto (PRZEMYSLAW, y otros, 2021), las investigaciones explicativas buscan establecer la relación de causa y efecto entre dos variables. En este estudio, se aplicarán teorías como la serie de Fourier para evaluar cómo el modelado de sistemas de filtros armónicos impacta la calidad de energía en un parque eólico de La Libertad. Estos son comparados con (SABIR, y otros, 2021), que no son vinculantes con nuestra investigación porque usan un diferente modelo de sistema de filtros que los híbridos tienen el mismo objetivo de reducir las distorsiones armónicas y así mejora la calidad de energía en esta investigación redujeron de 29.66 % de armónicos a 4.96 % de armónicos. Cabe mencionar que mientras exista una buena relación entre variables las mejoras serán de consideración para la variable dependiente ya que si la variable independiente obtiene mejoras la calidad de energía seguirá siendo óptima.

VI. CONCLUSIONES

1. Se determinó que la calidad de energía mediante la medición de la distorsión armónica, obteniendo una distorsión armónica total de corriente de 11.99%. Este resultado se sitúa fuera de los límites máximos permitidos por el estándar IEEE 519-2022, indicando una desviación considerable en la pureza de la corriente eléctrica suministrada.
2. Se analizó la revisión de diversos tipos de sistemas de filtros armónicos como amortiguados de sintonización simple, filtro de paso alto, filtro tipo C.
3. Se determinó los diversos resultados que se realizó con los sistemas de filtros como filtro de sintonización simple que mejoro de 11.99% a 4.9%, filtro de paso alto de 11.99% a 5.1% y el filtro de tipo C con un 11.99% de distorsiones armónicas con corriente inicial sin filtro, a una reducción después de la simulación con los filtros armónicos de 2.5%, con esta propuesta se mejoró la calidad de energía en la planta eólica de La Libertad.
4. Se evaluó la relación que existe entre las dos variables de la investigación donde se concluye que la variable independiente tiene incidencia en la variable dependiente mejorando considerablemente las pérdidas por distorsiones armónicas en el sistema eléctrico de la planta eólica de La Libertad.

VII. RECOMENDACIONES

Habiendo analizado los resultados de la investigación se plantea los siguientes resultados:

Ampliar el enfoque de la variable con la revisión de nuevos sistemas de filtros armónicos, debido a que en la presente investigación se planteó 3 tipos de sistemas de filtros armónicos, con la investigación de nuevos sistemas se podría talvez resolver los problemas de distorsiones armónicos de una manera más simplificada y efectiva.

Planificar auditorías externas e internas por parte de la empresa, para observar y evaluar en cumplimiento de sus procesos en toda la planta eólica de La Libertad, además de fortalecer el funcionamiento óptimo de los diversos equipos con los que cuenta todo el sistema de operación de la planta eólica.

Fortalecer los mantenimientos preventivos en los tiempos establecidos con la finalidad de detectar inconvenientes de manera oportuna y así evitar paradas de equipos o cortes de suministro eléctrico por paradas de la planta eólica de La Libertad. Es muy importante fortalecer los trabajos de prevención porque solo de esa manera podremos estar preparados para cualquier falla que se pudiera presentar en el futuro.

Establecer un programa de monitoreo periódico de la calidad de energía en la planta eólica acorde al estándar IEEE 1159-2019.

Bibliografía

- ABBAS, Ahmed S., y otros. 2019.** *Comprehensive Parametric Analysis of Single Tuned Filter in Distribution Systems* . 2019.
- ABDEL Wahed, Touati, y otros. 2020.** *Harmonic mitigation using shunt active filtering function based a Wind Energy Conversion System equipped with double fed induction generator DFIG*. s.l. : IEEE Xplore, 2020.
- AFOLAYAN, Michael Sunday y ONIYINDE, Omolade Adeyemi . 2019.** *Interviews and Questionnaires as Legal Research Instruments*. 2019.
- APUKE, Oberiri Destiny . 2017.** *Quantitative Research Methods a Synopsis Approach*. s.l. : AGJ, 2017.
- ARGÜELLO, Andrés , TORQUATO, Ricardo y FREITAS, Walmir . 2023.** *Passive Filter Tuning for Harmonic Resonance Mitigation in Wind Parks*. s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2023.
- ARIAS Gonzales, José Luis. 2020.** *Proyecto de tesis - Guía para la elaboración*. Arequipa : s.n., 2020.
- ARRILLAGA, J. y WATSON, N.R. 2003.** *Power System Harmonics*. Second Edition. s.l. : WILEY, 2003.
- BAIRAGI, Vinayak y MUNOT, Mousami. 2019.** *Research Methodology - A practical and scientific approach*. New York : CRC Press, 2019.
- BEZERRA, Edson, y otros. 2019.** *Control of Powers for Wind Power Generation and Grid Current Harmonics Filtering From Doubly Fed Induction Generator: Comparison of Two Strategies*. s.l. : IEEEAccess, 2019. Vol. 7.
- BIKDELI, Efaf, y otros. 2022.** *State of the Art of the Techniques for Grid Forming Inverters to Solve the Challenges of Renewable Rich Power Grids*. s.l. : Energies, 2022. Vol. 15.
- BRANNEN, Julia . 1992.** *Mixing Methods: Qualitative and Quantitative Research*. 1992.
- CAI, Lijun, y otros. 2020.** *Analysis of Impact of Harmonic Disturbances on the Mechanical System of Wind Turbine*. Alemania : IFAC PapersOnLine, 2020. Vol. 53. 12871–12875.

- CARRIVEAU, Rupp. 2012.** *Advances in Wind Power*. s.l. : InTech, 2012.
- DARUSSALAM, Rudi, y otros. 2020.** *Study of Harmonic Mitigation Techniques Based on Ranges Level Voltage Refer to IEEE 519-2014*. 2020.
- DAS, J.C. 2015.** *Power system harmonics and passive filter design*. 2015.
- DE LA ROSA, Francisco C. 2006.** *Harmonics and Power Systems*. s.l. : CRC Press, 2006.
- DUGAN, Roger, y otros. 2004.** *Electrical Power Systems Quality*. Second Edition. s.l. : McGraw-Hill, 2004.
- FAYSSAL, Amraneun, BRUNO, François y AZEDDINE, Chaiba. 2021.** *Investigación experimental de aerogeneradores simples y eficientes basados en control directo de potencia DFIG usando filtro LCL para modo autónomo*. s.l. : ELSEVIER, 2021.
- FUCHS, Ewald F. y MASOUM, Mohammad A.S. . 2023.** *Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives*. s.l. : ELSEVIER, 2023.
- HERNÁNDEZ, E., y otros. 2023.** *Model-Based Validation of Grid-connected DFIG-based Wind Turbine*. s.l. : IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 2023.
- HERNÁNDEZ, Emmanuel, y otros. 2020.** *Modelling and Validation of a Grid-Connected DFIG by Exploiting the Frequency-Domain Harmonic Analysis*. México : Applied Sciences MDPI, 2020. Vol. 10.
- IEC. 2015.** 61000-4-30. *Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*. 2015.
- IEEE. 2019.** Standard 1159. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 2019.
- . **2020.** Standard 1531. *IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters*. 2020.
- . **2018.** Standard 3002.8. *Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems*. 2018.
- . **2022.** Standard 519. *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control*. 2022.
- ISHAYA, Meshack Meshack Magaji y ADEGBOYE, Oluwatayomi Oluwatayomi. 2023.** *Single-tuned passive filter (STPF) for mitigating harmonics in a 3-phase power system*. 2023.

JIMÉNEZ, Román, HERNÁNDEZ, Mayoral y M., Madrigal. 2023. *Experimental Comparison of the Different Switching Techniques applied to Back-to-Back Converter connected to DFIG-based Wind Turbine for Harmonic Analysis.* s.l. : IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 2023.

MINEM. 2021. Plataforma Digital Única del Estado Peruano. [En línea] 24 de 11 de 2021. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/563316-siete-centrales-eolicasayudan-a-atender-la-demanda-electrica-del-pais-con-energias-limpias>.

MISHRA, Anirban y CHATTERJEE, Kalyan. 2022. *Harmonic analysis and attenuation using LCL-filter in doubly fed induction generator based wind conversion system using real time simulation based OPAL-RT.* India : Alexandria Engineering Journal, 2022. Vol. 61. 3773–3792.

MUTHURAJ, G. Samuel, BALARAMAN, Sujatha y RAJA, P. 2021. *DFIG-based Wind Energy Conversion System Using Matrix Converter Under Unbalanced and Harmonic Grid Conditions with Band Pass-FIR Filters.* India : IETE Journal of Research, 2021. 0377-2063.

OSINERGMIN. 2019. Experiencia y perspectivas en la ruta del Perú. [En línea] 11 de 2019.

https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf.

—. **2022.** Fichas técnicas de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica. [En línea] 07 de 2022. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/generacion/1.Fichas_Tecnicas_Centrales_Operacion.pdf.

PRZEMYSŁAW, Biecek y TOMASZ, Burzykowski. 2021. *Explanatory Model Analysis - Explore, explain, and Examine Predictive Models.* s.l. : CRC Press, 2021.

RAGAB, Mohamed y ARISHA, Amr. 2018. *Research Methodology in Business: A Starter's Guide.* s.l. : Sciedu Press, 2018. Vol. 5.

RAZAK, Mohammad Abdur , y otros. 2019. *Design and Simulation of PV Based Harmonic Compensator for Three Phase load.* s.l. : IEEE, 2019.

RODARTE, Francisco, y otros. 2021. *Harmonics Reduction and Reactive Power Injection in Wind Generation Systems.* s.l. : MDPI, 2021.

- SABIR, Bushra, y otros. 2021.** *Analysis of Generated Harmonics in DFIG Driven by Wind Turbine during Linear & Non-Linear Load.* India : IEEE Xplore, 2021.
- SHENG-KUAN, Wang y CHEMG-YING, Lu. 2020.** *Analysis and Design of a C-type Filter for a Wind or Solar Power Plant.* 2020.
- TAHERDOOST, Hamed . 2021.** *Data Collection Methods and Tools for Research; A Step-by-Step Guide to Choose Data Collection Technique for Academic and Business Research Projects.* s.l. : IJARM, 2021.
- TRAN, Viet T. , y otros. 2019.** *An Efficient Energy Management Approach for a Solar-Powered EV Battery Charging Facility to Support Distribution Grids.* s.l. : IEEE, 2019.
- UMADEVI, K., LALITHA, S.V.N.L. y CHETWANI, S.H. 2019.** *Dynamic Modeling for Improvement in Power Quality Issues of DFIG Wind Farms Interconnected with Grid.* s.l. : International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2019. Vol. 8. 2278-3075.
- VISHAL, MISHRA, Anirban y CHATTERJEE, Kalyan. 2019.** *Power Quality Enhancement of DFIG based Wind Turbine by Active Filter Implementation.* s.l. : IEEE Xplore, 2019. Vol. 1.
- WIJDANE, El Maataoui, y otros. 2021.** *Minimized Total Harmonic Distortion of a Multi-level Inverter of a Wind Power Conversion Chain Synchronized to the Grid-LCL Filter Optimization and Third Harmonic Cancellation.* s.l. : Electrica 2022, 2021.
- Yuqi , Zhao y Jovica , Milanović. 2021.** *Equivalent Modelling of Wind Farms for Probabilistic Harmonic Propagation Studies.* s.l. : IEEE Xplore, 2021.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de operacionalización de variable

Tabla 9. Matriz de operacionalización de la variable sistemas de filtros armónicos

Variables de estudio	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente (Sistemas de filtros armónicos)	Sistemas diseñados para suprimir los armónicos presentes en una señal eléctrica, evitando que se propaguen a través de la red eléctrica y protegiendo los equipos y dispositivos conectados de los efectos perjudiciales de los armónicos. (DAS, 2015)	Los sistemas de filtros armónicos se relacionan con la frecuencia de corte, el amortiguamiento, impedancia de salida, capacidad de compensación y selectividad armónica. (DAS, 2015)	Frecuencia de corte	Frecuencia (Hz)	De razón
			Amortiguamiento	Factor de amortiguamiento (S/U)	De razón
			Impedancia	Impedancia (Ohm)	De razón
			Selectividad armónica	Factor de calidad (S/U)	De razón

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Matriz de operacionalización de la variable calidad de energía

Variables de estudio	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
Variable dependiente (Calidad de energía)	Es la capacidad de un sistema o equipo eléctrico para operar de manera adecuada sin causar perturbaciones electromagnéticas perjudiciales a otros sistemas o equipos conectados en el mismo entorno electromagnético. (IEEE 1159, 2019)	La calidad de energía en este estudio se relaciona con la distorsión de la forma de onda. (IEEE 1159, 2019)	Distorsión de forma de onda	Distorsión armónica total de tensión (%)	De razón
				Distorsión armónica total de corriente (%)	De razón
				Distorsión armónica individual de tensión (%)	De razón
				Distorsión armónica individual de corriente (%)	De razón

Fuente: Elaboración propia

