



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA
A LA SALIDA DE UN INVERSOR HÍBRIDO
DE 3kVA”**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

AUTORES:

Alexis Damián Soria Soria

Yuly Alejandra Urresty Noguera

TUTOR:

Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda, M.Sc.

LATACUNGA – ECUADOR

AGOSTO 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

SORIA SORIA ALEXIS DAMIÁN, con cédula de ciudadanía No. 180541916-3, URRESTY NOGUERA YULY ALEJANDRA, con cédula de ciudadanía No. 210083701-8 declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: “ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA A LA SALIDA DE UN INVERSOR HÍBRIDO DE 3kVA”**, siendo el Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda, M.Sc., Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, agosto 19 del 2024.



Alexis Damián Soria Soria
180541916-3



Yuly Alejandra Urresty Noguera
210083701-8

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA A LA SALIDA DE UN INVERSOR HÍBRIDO DE 3kVA”, de Soria Soria Alexis Damián y Urresty Noguera Yuly Alejandra, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos, normas técnicas, traducción, formatos previstos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 19 de agosto de 2024



Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda, M.Sc.

171043449-7

TUTOR


AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN


En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, ellos postulantes: Soria Soria Alexis Damián ; Urresty Noguera Yuly Alejandra, con el título del Proyecto de Investigación: “ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA A LA SALIDA DE UN INVERSOR HÍBRIDO DE 3kVA”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

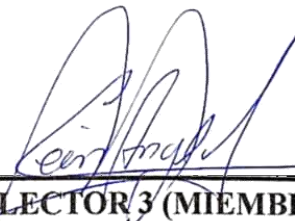
Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 19 de agosto de 2024

Para constancia firman:


LECTOR 1 (PRESIDENTE)
Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas, M.Sc.
CC: 050234776-8


LECTOR 2 (MIEMBRO)
Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado, M.Sc.
CC:050565642-4


LECTOR 3 (MIEMBRO)
Ing. León Segovia Manuel Ángel, M.Sc.
CC:050204135-3

AGRADECIMIENTO

A lo largo de este arduo camino, ha habido muchas personas cuya presencia, apoyo y guía fueron fundamentales para la culminación de este trabajo. A todos ellos, mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha guiado cada uno de mis pasos en este camino de formación. Su presencia constante me ha brindado la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para enfrentar los desafíos de esta carrera. Su luz ha iluminado mi vocación como ingeniero eléctrico, dándome el propósito y el sentido en cada proyecto y cada aprendizaje.

*Quiero agradecer a mis padres **Rubio** y **Gladys**, quienes, con su amor incondicional, sacrificio y valores inculcados, han sido mi pilar en los momentos más difíciles. A mi hermana **Marianela**, por su compañía, su comprensión y por ser siempre un motivo de inspiración. Su confianza en mí querida familia me ha dado la fuerza para perseverar y alcanzar esta meta.*

*A mi tutor de este Trabajo de Investigación el **Ing. Franklin Vásquez**, a mi asesor de este proyecto, el **Dr. Secundino Marrero**, quienes, con su dedicación, paciencia y conocimiento, no solo me enseñaron los principios de la ingeniería eléctrica, sino que también me mostraron la importancia de la ética, la responsabilidad y el compromiso en la práctica profesional. Sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi formación.*

*A mis amigos **Lola**, **Stalin** y **Áyliz**, mis compañeros de camino **Alexis**, **Bryan**, **Jhordy** y **Kevin**, gracias por compartir conmigo este viaje. De manera especial al **Reverendo Padre Adolfo Siza**, sus palabras de aliento, su colaboración y las experiencias vividas juntos han hecho de este proceso algo mucho más valioso.*

*A mi compañera de investigación **Yuly Urresty**, por su predisposición y voluntad para que este logro se dé.*

Finalmente, quiero agradecer a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de esta investigación. A todos ustedes, mi gratitud eterna. Sin su apoyo, esta meta no hubiera sido posible.

*Este logro no es solo mío, sino de todos ustedes. ¡Gracias!,
Alexis Damián Soria Soria*

DEDICATORIA

*Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios,
por ser la fuente de mi fortaleza y guía en cada paso de este camino.
A Él, que ha sembrado en mí la vocación de ingeniero eléctrico,
le agradezco por iluminar mi mente y mi corazón
en la búsqueda del conocimiento y por darme
la capacidad de superar cada obstáculo
con fe y determinación.*

*Dedico este Trabajo de Investigación a **Erika Andrea**,
una persona muy especial en mi vida.
Agradezco profundamente su apoyo incondicional,
su paciencia y la luz que ha traído a mi camino.
Su compañía ha sido una fuente constante de motivación,
y su fe en mí me ha dado fuerzas en los momentos más difíciles.
Gracias por creer en mí, por animarme cuando más lo necesitaba
y por estar a mi lado en cada paso de este recorrido.
Este logro es tanto suyo como mío, y se lo dedico con todo mi cariño.*

*Finalmente, dedico este trabajo a todos aquellos que,
con su ejemplo y sabiduría, me han inspirado a ser mejor cada día.
Que este Trabajo de Titulación sea un testimonio de la fe,
el esfuerzo y la pasión que he puesto en mi formación como ingeniero eléctrico.*

*Sin mucha foto, sin mucho texto,
dedico este Trabajo de Titulación a los que siempre están.
¡Dios les pague!*

Alexis Damián Soria Soria

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios por darme la fuerza y la sabiduría para culminar con éxito este reto en mi vida.

*A mi madre, **Nelly Noguera**, por todo el amor que desde el cielo me brinda cada día. Aunque no pueda verte, sé que siempre me acompañas en cada paso que doy. Sé que estás orgullosa de esto, porque siempre lo quisiste así, y hoy puedo darte el regalo de saber que lo logré.*

*A mi padre, **Diógenes Urresty**, por ser un hombre ejemplar, por siempre confiar en mí, y por ser uno de mis mayores motivos para salir adelante. Estoy agradecida detenerte en mi vida.*

*A mis hermanas, **Patricia Urresty, Susana Urresty, Yojana Urresty** y **Neiler Urresty**, gracias hermanitas por todo su apoyo, por ser una imagen maternal para mí, por el cariño, y por ayudarme en todo lo que han podido. Gracias a ustedes, este sueño es una realidad. Les debo tanto, y guardo en lo más profundo de mi corazón todos los esfuerzos que han hecho por mí. Estoy inmensamente agradecida con cada una de ustedes; sin su apoyo, esto no habría sido posible. Las amo muchísimo.*

*A mis queridos sobrinos, **Javier, Alejandro, Vanesa, Yulieth, Briyid, Camila, Andrés, Yosued, Scarleth** y **Sofía** gracias por todo su cariño, los quiero mucho.*

*A mi tutor de tesis, **Ing. Franklin Vásquez**, infinitas gracias por ser un excelente docente y amigo. Gracias, querido profesor.*

*A mi compañero de Trabajo de Titulación, **Alexis Soria**, por su paciencia y compromiso con este proyecto.*

Gracias a todos los que estuvieron conmigo en este largo camino.

Yuly Alejandra Urresty Noguera

DEDICATORIA

*Para ti, que me ayudaste a convencerme de que esto era lo mío,
que no te rendiste ante los primeros "no" y luchaste
para que pudiera ingresar a la carrera.*

*A ti, que me despertabas cada mañana para ir a estudiar
y me hacías sacar fuerzas de donde no las había.*

*A ti, que un día diste todo por perdido,
pero en vez de rendirte, decidiste estudiar.*

*Esto es para ti, porque solo tú y yo sabemos
cuánto nos costó y todo el esfuerzo que hicimos
para culminar esta etapa.*

*A mis amados padres,
Nelly Noguera y Diógenes Urresty,
por ser seres humanos extraordinarios
y por confiar siempre en mí.*

*A mis queridas hermanas,
Patricia, Susana, Yojana y Neiler,
esto también es para ustedes;
son mi pilar para seguir adelante.*

*A **Martita, Kika, Steven, Atenea y Federico,**
por ser mi alegría al llegar a casa.*

¡Con mucho amor para ustedes!

Yuly Alejandra Urresty Noguera

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO: “ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA A LA SALIDA DE UN
INVERSOR HÍBRIDO DE 3KVA”**

Autores:

Alexis Damián Soria Soria
Yuly Alejandra Urresty Noguera

RESUMEN

Este estudio examina la contaminación armónica en la salida de un inversor híbrido de 3kVA, identificando las principales fuentes de distorsión y proponiendo soluciones para mitigar sus efectos en el sistema eléctrico. El objetivo es evaluar la calidad de energía y proponer mejoras para un funcionamiento óptimo y confiable. Se subraya la importancia de controlar y reducir la contaminación armónica para mantener la eficiencia y fiabilidad del inversor y los dispositivos conectados. La investigación combina un enfoque teórico y experimental con análisis cuantitativo y simulaciones, empleando los métodos de “Grabación de Onda” y filtros pasivos. Los resultados identificaron las fuentes de distorsión armónica bajo diferentes condiciones de carga, evaluaron su impacto en la eficiencia del sistema y analizaron soluciones efectivas, como el uso de filtros sintonizados para minimizar las pérdidas en un 5% a 6% y la implementación de la “Carga Equilibrada” acorde a la norma IEEE Std 519.

Palabras clave: Contaminación Armónica; Inversor Híbrido; Calidad de Energía; Filtro Pasivo.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY

TOPIC: “HARMONIC POLLUTION ANALYSIS AT THE OUTPUT A 3KVA HYBRID INVERTER”.

Authors:

Soria Soria Alexis Damián

Urresty Noguera Yuly Alejandra

ABSTRACT

This study examines harmonic pollution at the output a 3kVA hybrid inverter, by identifying the distortion main sources and proposing solutions to mitigate its effects on the electrical system. The aim is to assess power quality and propose improvements for optimal and reliable operation. It is underlined the importance by controlling and reducing harmonic pollution, in order to keep the inverter efficiency and reliability and connected devices. The research combines a theoretical and experimental approach with quantitative analysis and simulations, using “Wave Recording” methods and passive filters. The results identified harmonic distortion sources under different load conditions, they assessed their impact on system efficiency and analyzed effective solutions, such as the tuned filters use to minimize losses in a 5% to 6% and the “Balanced Loading” implementation according to the IEEE Std 519 regulation.

Keywords: Harmonic pollution, hybrid inverter, power quality, passive filter.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA A LA SALIDA DE UN INVERSOR HÍBRIDO DE 3KVA”** presentado por: **Soria Soria Alexis Damián y Urresty Noguera Yuly Alejandra** egresados de la Carrera de: **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, agosto del 2024.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CC: 0502666514



ÍNDICE

1	INFORMACIÓN GENERAL	1
	Tema del Proyecto:	1
	Modalidad de Titulación:.....	1
	Carrera:	1
	Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:	1
	Equipo de Trabajo:	1
	Área de Conocimiento:.....	1
	Línea de Investigación:.....	1
	Sublíneas de investigación de la carrera:.....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1	Situación Problemática.	4
2.2	Formulación del problema.	4
2.3	OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN	4
	3.3.1 Objeto de Investigación:.....	4
	3.3.2 Campo de Acción:	4
2.4	BENEFICIARIOS	5
	2.4.1 Directo	5
	2.4.2 Indirecto.....	5
2.5	JUSTIFICACIÓN	5
2.6	OBJETIVOS	6
	2.6.1 General:	6
	2.6.2 Específicos:.....	6
	2.6.3 SISTEMA DE TAREAS.....	7
3	MARCO TEÓRICO	8
3.1	Análisis de la Contaminación Armónica a la Salida de un Inversor Híbrido de 3kVA8	
	3.1.1 Introducción.....	9
	3.1.2 Materiales y Métodos	11
	3.1.3 Análisis de Resultados.....	19
	3.1.4 Discusión de resultados	26
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
4.1	Conclusiones.....	27

4.2	Recomendaciones	28
5	REFERENCIAS	29
6	ANEXOS	A;Error! Marcador no definido.
6.1	Anexo 1, Informe de Similitud	A;Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema del funcionamiento de un inversor híbrido	11
Figura 2 - Grabación de forma para registro de armónicos	14
Figura 3 - Formas de Onda.....	14
Figura 4 - Deformación periódica de la señal de voltaje (THDv) o la señal de Corriente (THDi)	16
Figura 5 - Algoritmo para el cálculo del filtro.....	18
Figura 6 - Forma de onda de voltaje y corriente en cargas LC.....	20
Figura 7 - Amplitud armónica en cargas LC	21
Figura 8 - Forma de onda de voltaje y corriente en carga tipo RLC	22
Figura 9 - Amplitud de armónicos de corriente y voltaje en cargas RLC	23
Figura 10 - Resultados de la aplicación del filtro de armónicos	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de Tareas del Plan de Titulación.....	7
Tabla 1 - Resumen de datos del fabricante del Inversor Híbrido utilizado	13
Tabla 2 - Límites de distorsión de voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC)	17
Tabla 3 - Límites de Distorsión de Corriente basada en los estándares IEE e IEC	17
Tabla 4 - Datos sin carga del Analizador	19
Tabla 5 - Potencia de Pérdidas.....	26

1 INFORMACIÓN GENERAL

Tema del Proyecto: Análisis de la Contaminación Armónica a la Salida de un Inversor Híbrido de 3kVA

Modalidad de Titulación: Proyecto de Investigación.

Carrera: Ingeniería en Electricidad

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: Desarrollo de sistemas eléctricos eficientes a nivel residencial, comercial e industrial.

Equipo de Trabajo:

- Alexis Damián Soria Soria
- Yuly Alejandra Urresty Noguera
- Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda, MsC.
- Ing, Secundino Marreno Ramírez, Dr.

Área de Conocimiento: 0613

Línea de Investigación: Energías renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la carrera: Explotación y diseño de Sistemas Eléctricos de Potencia. Conversión y uso racional de la energía eléctrica. Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial. Inteligencia Artificial y Modelo de Sistemas.

2 INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales, el desarrollo del hombre ha estado determinado en gran medida por el uso de diferentes formas de energía según las necesidades y disponibilidades de cada época y lugar. Desde los inicios de la humanidad, las energías renovables eran utilizadas en forma de biomasa, viento, agua y sol, y esas formas de energía fueron la base energética del desarrollo humano. Sin embargo, con la aparición de los recursos energéticos fósiles, el uso de la energía se convirtió en algo más fácil, eficiente y barato [1].

Esto ha ocasionado un consumo indiscriminado de este tipo de energía hasta límites insostenibles, lo que ha llevado a que todos los países en vías de desarrollo y desarrollados realicen constantemente esfuerzos para mejorar la eficiencia de la energía y, en definitiva, reducir el consumo de recursos fósiles. En este campo de las energías renovables, la energía solar fotovoltaica es hoy en día, sin lugar a dudas, una forma limpia y fiable de producción de energía eléctrica a pequeña escala [1].

En la era moderna, con el brote de energías limpias y sostenibles y la tecnología avanzada, los inversores híbridos se han convertido en componentes cruciales de los sistemas de energía renovable. Estos dispositivos no solo permiten la conversión de la energía generada por fuentes como paneles solares, sino que también facilitan la combinación con la red eléctrica y los sistemas de almacenamiento de energía. A pesar de que son varios los beneficios, la conexión y la operación de los inversores híbridos introduce un desafío técnico significativo: la contaminación armónica [2].

La contaminación armónica no es más que la distorsión de la forma de onda de corriente o voltaje, la cual se desvía de la senoide perfecta debido a la presencia de armónicos. Estos armónicos son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental y pueden provocar una serie de problemas en los sistemas eléctricos, incluyendo pérdidas de eficiencia, calentamiento excesivo de los equipos, interferencias electromagnéticas y reducción de la vida útil de los dispositivos conectados [3].

El análisis de la contaminación armónica producido por un inversor híbrido es importantísimo para comprender el impacto de estas distorsiones en la calidad de la energía suministrada. Este análisis no solo permite identificar las fuentes y amplitudes de los armónicos presentes, sino que también ayudar a evaluar las medidas correctivas para mitigar sus efectos como es la implementación de un filtro pasivo y la propuesta práctica que reducirán significativamente

la amplitud de las armónicas presentes en la salida del inversor, mejorando así la calidad de la energía suministrada a la carga. Entre las técnicas más utilizadas y conocidas para este propósito se incluye el uso de filtros de armónicos, la optimización de las estrategias de control del inversor y la mejora del diseño del hardware y son los puntos que varios investigadores le dedicaron especial tratamiento

En este punto, es donde sobresalen los estudios como de "Active Harmonic Filters for Power Quality Improvement" de H. Akagi [4] en 1998. Antes de este trabajo, las estrategias predominantes eran los filtros pasivos, que, aunque eficaces, carecían de flexibilidad y adaptabilidad a diversas condiciones de carga. Akagi y su equipo introdujeron los filtros activos de armónicas (AHF), los cuales utilizan componentes electrónicos de potencia para inyectar corrientes de compensación y cancelar las armónicas no deseadas. Avanzamos en la línea de tiempo hasta 2004, Holtz destacó en "High-Frequency PWM Techniques for Harmonic Reduction in Inverters" [5], introduciendo modulación PWM de alta frecuencia para reducir armónicas en inversores mediante control preciso de semiconductores. En 2012, Bollen y Hassan investigaron el impacto de armónicas en sistemas fotovoltaicos conectados a la red en "Harmonic Analysis and Mitigation in Grid-Connected PV Systems" [6], proponiendo análisis y estrategias para mejorar la calidad de energía. En 2018, Zhang, Y., Wang, Q., & Li, S. enfatizaron técnicas avanzadas de modelado y simulación para analizar armónicas en sistemas de inversores híbridos en "Advanced Simulation Techniques for Harmonic Analysis in Hybrid Inverter Systems" [7], mejorando el diseño de estrategias de mitigación. Estos estudios representan hitos clave en la evolución de la mitigación de armónicas y la mejora de la calidad de la energía en sistemas de inversores para que todos estos sistemas cumplan con normativas vigentes como son: IEEE std 519-2014, IEC 61000-3-2 y IEC 61000-3-4, EN 50160 y reglamentos emitidos por CONELEC y la ARCONEL, estas dos últimas regentan en Ecuador.

En este contexto, el presente estudio examina la naturaleza y el comportamiento de los armónicos generados por inversores híbridos, evaluando su impacto en la eficiencia del sistema y proponiendo soluciones para controlar y minimizar la contaminación armónica. Mediante un enfoque teórico y experimental complementado con un análisis cuantitativo y simulación computacional, se busca brindar una comprensión profunda de estos fenómenos y contribuir al desarrollo de sistemas de energía más limpios y eficientes, cumpliendo así el objetivo de este trabajo investigativo que es analizar la contaminación armónica presente en la salida de un inversor

híbrido de 3kVA, identificando las principales fuentes de distorsión para la propuesta de soluciones que mitigen sus efectos en los sistemas eléctricos.

2.1 Situación Problemática.

La creciente adopción de inversores híbridos en sistemas de energía renovable ha planteado preocupaciones sobre la calidad de la energía suministrada a la red eléctrica [8]. Estos dispositivos, que combinan funciones de inversor solar y cargador de batería, pueden introducir distorsiones armónicas significativas en la forma de onda de salida [9]. La contaminación armónica resultante puede tener efectos adversos en equipos sensibles, eficiencia energética y estabilidad de la red [10]. En particular, los inversores híbridos de 3kVA, comúnmente utilizados en aplicaciones residenciales y comerciales pequeñas, presentan desafíos únicos debido a su diseño compacto y múltiples modos de operación [11]. La falta de estudios exhaustivos sobre el comportamiento armónico de estos inversores en diferentes condiciones de carga y configuraciones del sistema dificulta la implementación de medidas efectivas de mitigación [12]. Además, las normativas actuales pueden no abordar adecuadamente las características específicas de los inversores híbridos, lo que plantea interrogantes sobre la idoneidad de los estándares existentes [13]. Esta situación subraya la necesidad de un análisis detallado de la contaminación armónica en inversores híbridos de 3kVA para garantizar una integración segura y eficiente en las redes eléctricas modernas.

2.2 Formulación del problema.

Desconocimiento del comportamiento de la contaminación armónica en el inversor híbrido de 3kVA de los laboratorios de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi bajo diferentes condiciones de carga.

2.3 OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN

3.3.1 Objeto de Investigación: Contaminación armónica generada a la salida de un inversor híbrido de 3kVA.

3.3.2 Campo de Acción: 330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.09 Transmisión y Distribución

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directo

Administradores de los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas ubicados bajo el Teatro Universitario de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4.2 Indirecto

Estudiantes y futuros tesisistas que hacen uso de los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas ubicados bajo el Teatro Universitario de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.5 JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de energía limpia y eficiente ha impulsado el desarrollo de sistemas de energía renovable, donde los inversores híbridos juegan un papel crucial [14]. Sin embargo, estos dispositivos pueden generar contaminación armónica, afectando la calidad de la energía suministrada y comprometiendo la eficiencia del sistema [15].

El análisis de la contaminación armónica en un inversor híbrido de 3kVA es fundamental para comprender y mitigar y proponer técnicas de mitigación para sus efectos negativos. Esta investigación permitirá identificar las fuentes de distorsión, cuantificar su impacto y proponer estrategias de mitigación efectivas [16]. Además, contribuirá a mejorar el diseño y operación de estos sistemas, optimizando su rendimiento y prolongando su vida útil.

La importancia de este estudio radica en sus potenciales beneficios para diversos sectores. En el ámbito residencial y comercial, permitirá mejorar la calidad de la energía suministrada, reduciendo el riesgo de daños en equipos sensibles [17]. En el sector industrial, contribuirá a aumentar la eficiencia energética y reducir los costos operativos [18].

Desde una perspectiva académica, esta investigación aportará conocimientos valiosos sobre el comportamiento de los inversores híbridos y las técnicas de análisis armónico, sentando bases para futuros estudios en el campo de la electrónica de potencia y las energías renovables [19]. Este análisis es esencial para avanzar hacia sistemas de energía más limpios, eficientes y confiables, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y transición energética.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General:

Analizar la contaminación armónica en la salida del inversor híbrido de 3kVA, ubicado en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, bajo diferentes condiciones de carga, mediante la aplicación del “Método de Grabación de Onda” y registro computacional de la amplitud de armónicos para la determinación de opciones que permitan la reducción de la distorsión armónica.

2.6.2 Específicos:

- Identificar y caracterizar las principales fuentes de distorsión armónica en la salida del inversor híbrido de 3kVA ubicado en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, bajo diferentes condiciones de carga, utilizando el “Método de Grabación de Onda” y el registro computacional de las amplitudes de los armónicos.
- Analizar el impacto de las diferentes condiciones de carga sobre los niveles de contaminación armónica en el inversor, determinando los armónicos predominantes y sus efectos en la calidad de la energía eléctrica en los sistemas conectados al inversor.
- Proponer y evaluar la efectividad de dos medidas de mitigación de armónicos: “Carga Equilibrada” y “Uso de Filtros de Armónicos”, con el fin de reducir la distorsión armónica y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.6.3 SISTEMA DE TAREAS

Tabla 1. Sistema de Tareas del Plan de Titulación

Objetivos Específicos	Actividades (Tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
<p>Identificar y caracterizar las principales fuentes de distorsión armónica en la salida del inversor híbrido de 3kVA ubicado en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, bajo diferentes condiciones de carga, utilizando el “Método de Grabación de Onda” y el registro computacional de las amplitudes de los armónicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar mediciones de salida del inversor en diferentes condiciones de carga. - Aplicar el Método de Grabación de Onda para capturar la forma de onda. - Analizar los datos utilizando software especializado para identificar los armónicos predominantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de los armónicos en diferentes condiciones de carga. - Registro de datos cuantitativos de la distorsión armónica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Osciloscopio digital para capturar ondas. - Software de análisis (FFT). - Computadora para el registro y análisis de datos
<p>Analizar el impacto de las diferentes condiciones de carga sobre los niveles de contaminación armónica en el inversor, determinando los armónicos predominantes y sus efectos en la calidad de la energía eléctrica en los sistemas conectados al inversor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer escenarios con diferentes cargas (resistivas, inductivas, capacitivas). - Comparar los niveles de distorsión armónica en cada escenario. - Graficar los armónicos en función de las condiciones de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de cómo las diferentes cargas afectan la calidad de la energía. - Gráficos y tablas comparativas de armónicos bajo diferentes condiciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Generadores de carga resistiva, inductiva y capacitiva. - Software de simulación eléctrica. - Instrumentos de medición eléctrica
<p>Proponer y evaluar la efectividad de dos medidas de mitigación de</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Calcular filtros armónicos adecuados para la validación de la 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción en la distorsión armónica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de filtros de armónicos. - Registro de la forma de onda y

armónicos: “Carga Equilibrada” y “Uso de Filtros de Armónicos”, con el fin de reducir la distorsión armónica y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi.	efectividad de la técnica “Carga Equilibrada”. - Proponer la técnica de “Carga Equilibrada” en el sistema. - Evaluar la reducción de armónicos tras los cálculos de pérdidas de las medidas propuestas.	- Propuesta de dos técnicas de mitigación.	amplitud de armónicos cuando se hace el ajuste de carga. - Registro computacional mediante gráficas y tablas comparativas con las mediciones para verificar la eficacia de las medidas.
---	---	--	--

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Análisis de la Contaminación Armónica a la Salida de un Inversor Híbrido de 3kVA

A. D. Soria-Soria¹, Y. A. Urresty-Noguera¹, F. H. Vásquez-Teneda¹, S. Marrero-Ramírez¹

alexis.soria9163@utc.edu.ec, yuly.urresty7018@utc.edu.ec, franklin.vasquez@utc.edu.ec, secundino.marrero@utc.edu.ec

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi – UTC, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Latacunga, Ecuador.

DOI: 10.17013/risti.n.pi-pf

Resumen: Este estudio examina la contaminación armónica en la salida de un inversor híbrido de 3kVA, identificando las principales fuentes de distorsión y proponiendo soluciones para mitigar sus efectos en el sistema eléctrico. El objetivo es evaluar la calidad de energía y proponer mejoras para un funcionamiento óptimo y confiable. Se subraya la importancia de controlar y reducir la contaminación armónica para mantener la eficiencia y fiabilidad del inversor y los dispositivos conectados. La investigación combina un enfoque teórico y experimental con análisis cuantitativo y simulaciones, empleando los métodos de “Grabación de Onda” y filtros pasivos. Los resultados identificaron las fuentes de distorsión armónica bajo diferentes condiciones de carga, evaluaron su impacto en la eficiencia del sistema y analizaron soluciones efectivas,

como el uso de filtros sintonizados para minimizar las pérdidas en un 5% a 6% y la implementación de la “Carga Equilibrada” acorde a la norma IEEE Std 519.

Palabras-clave: Contaminación Armónica; Inversor Híbrido; Calidad de Energía; Filtro Pasivo.

“Harmonic Pollution Analysis at the Output a 3kva Hybrid Inverter”.

Abstract: This study examines harmonic pollution at the output a 3kVA hybrid inverter, by identifying the distortion main sources and proposing solutions to mitigate its effects on the electrical system. The aim is to assess power quality and propose improvements for optimal and reliable operation. It is underlined the importance by controlling and reducing harmonic pollution, in order to keep the inverter efficiency and reliability and connected devices. The research combines a theoretical and experimental approach with quantitative analysis and simulations, using “Wave Recording” methods and passive filters. The results identified harmonic distortion sources under different load conditions, they assessed their impact on system efficiency and analyzed effective solutions, such as the tuned filters use to minimize losses in a 5% to 6% and the “Balanced Loading” implementation according to the IEEE Std 519 regulation.

Keywords: Harmonic Pollution, Hybrid Inverter, Power Quality, Passive Filter.

3.1.1 Introducción

El desarrollo humano ha estado históricamente determinado por el uso de diversas formas de energía. Inicialmente, las energías renovables como la biomasa, el viento, el agua y el sol fueron esenciales. Sin embargo, la aparición de los recursos energéticos fósiles hizo que el uso de la energía pasara a ser más contaminante, llegando hoy a un consumo insostenible. El uso excesivo de esta fuente ha impulsado a los países a mejorar la eficiencia energética y reducir el uso de combustibles fósiles. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se destaca como una forma limpia y fiable de producción de energía eléctrica a pequeña y gran escala (Bose, 2013).

En la era moderna, los inversores híbridos, que combinan fuentes de energía renovable con la red eléctrica y sistemas de almacenamiento, se han vuelto cruciales. A pesar de sus beneficios, estos dispositivos combinados con la presencia de cargas no lineales, introducen el desafío de la contaminación armónica, que es la distorsión de la forma de onda de corriente o voltaje debido a la presencia de armónicos. Estos armónicos, que son múltiplos de la frecuencia fundamental,

pueden causar problemas como pérdida de eficiencia, calentamiento excesivo de transformadores, interferencias electromagnéticas y reducción de la vida útil de equipos (Kjaer y otros, 2005), (Enslin & Heskes, 2004).

El análisis de la contaminación armónica es fundamental para entender su impacto en la calidad de la energía e implementar medidas correctivas. Para ello, varios investigadores como (Akagi, 1998), en su estudio "Active Harmonic Filters for Power Quality Improvement", introdujo los filtros activos de armónicas (AHF), que utilizan componentes electrónicos para inyectar corrientes de compensación y cancelar las armónicas no deseadas. Esta técnica ofrece mayor flexibilidad y adaptabilidad en comparación con los filtros pasivos. En la investigación de (Holtz, 2004) se destacan las técnicas de modulación PWM de alta frecuencia para reducir armónicas en inversores mediante un control preciso de semiconductores. En 2012, (Bollen & Hassan, 2012) investigaron el impacto de las armónicas en sistemas fotovoltaicos conectados a la red, proponiendo análisis y estrategias para mejorar la calidad de energía. Otros autores enfatizaron técnicas avanzadas de modelado y simulación para analizar armónicas en sistemas de inversores híbridos, mejorando el diseño de estrategias de mitigación (Zhang y otros, 2023). Con estos antecedentes podemos entonces decir que la incorporación de filtros y el manejo de las diferentes cargas del sistema eléctrico, pueden reducir los efectos nocivos de la deformación de onda en la red producto de los armónicos.

Los inversores híbridos durante su operación pueden generar armónicos que contaminan la señal de salida, lo que puede causar problemas en los equipos conectados a la red eléctrica (Bose, 2013), ellos combinan las topologías de inversores de fuente de voltaje (VSI) y de fuente de corriente (CSI) para aprovechar las ventajas de ambos (Rodríguez y otros, 2002), (Wu, 2006). Los CSI, en cambio, ofrecen mejor calidad de forma de onda de salida y mejor control de corriente, beneficiosos para aplicaciones que requieren alta calidad de corriente y bajo contenido armónico (Kazmierkowski & Malesani, 1998). Esta combinación y configuración como el mostrado en la Figura 1 permite que un inversor híbrido ofrezca rápida respuesta dinámica y alta calidad de salida, siendo adecuado para aplicaciones de alta potencia y sistemas de distribución de energía (Khwan-on y otros, 2012), (Hart, 2001).

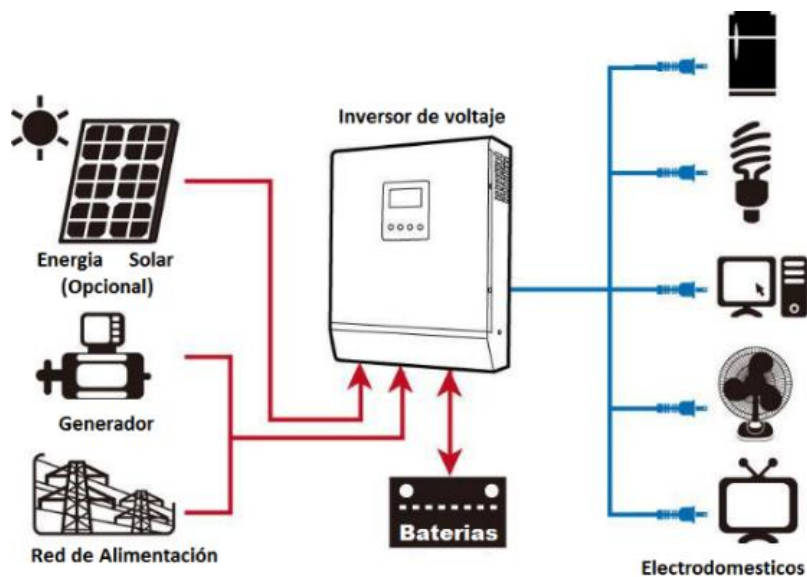


Figura 1 - Esquema del funcionamiento de un inversor híbrido

Fuente: <https://himelco.cl/inversor-de-voltaje/inversor-hibrido/>

El diseño y control de los inversores híbridos como el de la Figura 1 pueden ser más complejos en comparación con los inversores convencionales, ya que requieren estrategias de control específicas para coordinar el funcionamiento de ambas topologías (Rivera y otros, 2017).

Los estudios analizados, representan hitos en la evolución de la mitigación de armónicas y la mejora de la calidad de la energía en sistemas de inversores, muchos de esos estudios los hicieron cumpliendo con normativas internacionales como la IEEE std 519-2014 y reglamentos de CONELEC y ARCONEL en Ecuador. A través de un enfoque teórico y experimental, complementado con un análisis cuantitativo y simulación computacional, se busca entender profundamente estos fenómenos y contribuir al desarrollo de sistemas de energía más limpios y eficientes

Por ello, el objetivo de esta investigación es examinar los armónicos generados en una red fotovoltaica con un inversor híbrido de 3 kVA, para evaluar la calidad de energía y analizar soluciones que minimicen y controlen la contaminación armónica presente.

3.1.2 Materiales y Métodos

La contaminación armónica es un problema común en los sistemas eléctricos modernos, causado por cargas no lineales como variadores de velocidad, convertidores de potencia y dispositivos electrónicos en régimen de interruptores (Arrillaga y otros, 2000), (Emanuel, 2010).

En inversores híbridos, es vital emplear métodos específicos de análisis y mitigación de armónicos (Kjaer y otros, 2005). Estos armónicos pueden provocar pérdidas de eficiencia y reducir la vida útil de los dispositivos conectados a la red (Arrillaga y otros, 2000), (Wakileh, 2001). Para abordar este desafío, se deben implementar estrategias de análisis y mitigación, como mediciones precisas para poder identificar las fuentes y amplitudes de los armónicos (Grady & Santoso, 2001).

En Ecuador, la regulación de la calidad de la energía eléctrica es establecida por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) que se ajusta a la norma IEEE 519, aquí se proporcionan directrices para el control y mitigación de armónicos [34], (IEEE, 2014).

Por tanto, los estudios sobre la contaminación armónica en sistemas fotovoltaicos e inversores híbridos son esenciales para evaluar su conformidad con las normas y proponer estrategias de mitigación (Grady & Santoso, 2001). Para analizar la contaminación armónica en la salida de un inversor híbrido, se han revisado diversas metodologías en la literatura que se señalan a continuación:

- **Análisis Espectral:** Utiliza técnicas de análisis de Fourier para descomponer la señal y determinar las componentes armónicas presentes, como se describe en el estudio de J. Zhang (Zhang y otros, 2023).
- **Modelado Matemático:** Desarrolla modelos matemáticos del inversor y su comportamiento bajo diferentes cargas para predecir la generación de armónicos, como en la investigación de (Gomez & Smith, 2018).
- **Simulación por Software:** Utiliza herramientas de simulación como MATLAB/Simulink o PSpice para modelar el comportamiento del inversor y evaluar la contaminación armónica, como se propone en (Wang y otros, 2015).
- **Medición Experimental:** Realiza mediciones directas en el laboratorio o en campo para obtener datos reales sobre la contaminación armónica generada por el inversor y/o las cargas, siendo fundamental en muchos estudios prácticos e investigaciones (Sharma y otros, 2018).
- **Filtrado Activo o Pasivo:** Implementa filtros activos o pasivos para mitigar los armónicos y evalúa su efectividad mediante mediciones o simulaciones, un tema ampliamente estudiado y aplicado (Fernández, 2019).

3.1.2.1 Especificaciones de equipos y procedimientos utilizados

En la experimentación se ha utilizado un sistema fotovoltaico con un inversor híbrido que tiene las especificaciones dadas en la Tabla 1.

Tabla 2 - Resumen de datos del fabricante del Inversor Híbrido utilizado

Modelo:	InfiniSolar V-LV-3K-24
Características:	Inversor Híbrido Infini Solar V-LV-3K-24 3000VA/2400W, Inversor solar de onda sinusoidal pura, Salida: 120 VAC, 50/60 Hz, Voltaje de batería 24 V, MPPT. Rango 30 - 115vdc, Potencia Máxima de entrada fotovoltaica 2000W, Corriente de carga máxima solar 80 A, W/O Parallel function hasta 6 unidades, USB, RS232+dry contact. Procet Scientific

Fuente: Los Autores (Datos de placa del inversor)

Los datos y características que se resume en la Tabla 2. son los parámetros que servirán para la evaluación de la eficiencia energética del inversor. Para este estudio se ha usado el analizador de calidad de energía MECATRONIK de la serie AN1F3F 1120-0122-011 que tiene un rango de voltajes de 80 V a 250 V en corriente alterna, este analizador tiene la ventaja que permite la visualización de la deformación de onda en tiempo real.

3.1.2.2 Método “Grabación de Onda”

El método de Grabación de Onda es una técnica utilizada para capturar y analizar las formas de onda de voltaje y corriente en un sistema eléctrico con el fin de identificar y cuantificar los armónicos presentes (Arrillaga y otros, 2000). En este estudio se ha seguido la siguiente secuencia para evaluar los armónicos:

- **Configuración del equipo de medición:** Se ajustan parámetros como la frecuencia de muestreo, la duración de la captura y los niveles de trigger.
- **Captura de datos:** Se registran simultáneamente las formas de onda de voltaje y corriente como los de la presenta la Figura 2:



Figura 2 - Grabación de forma para registro de armónicos

Fuente: <https://www.elspec-ltd.com/conociendo-la-norma-iec-61000-4-30-clase-a/?lang=es>

- **Cálculo de índices de distorsión:** Se determinan parámetros como la Distorsión Armónica Total (THD).

Este método implica el uso de analizadores de calidad de energía y osciloscopios, que pueden registrar las formas de onda en tiempo real.

3.1.2.3 Generalidades de la contaminación armónica

Los armónicos son componentes de frecuencia presentes en una señal periódica, siendo múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (Grady & Santoso, 2001). La adición de armónicos distorsiona la onda senoidal como se muestra en la Figura 3:

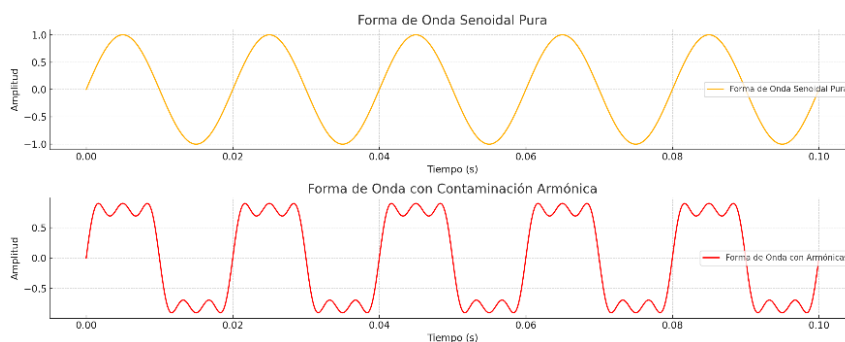


Figura 3 - Formas de Onda

Fuente: Los Autores (Interfaz de GeoGebra)

Estos armónicos mostrados en la Figura 3 pueden ser generados por la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico (Bollen & Gu, 2006). Los armónicos en los sistemas de potencia de corriente alterna (CA) pueden causar varios efectos adversos: Calentamiento excesivo en transformadores y motores eléctricos (IEEE, 2014), [40], Interferencia electromagnética (Rönnerberg

& Bollen, 2000), Distorsión de la forma de onda de tensión (Arrillaga y otros, 2000) y resonancias indeseadas (Akagi, 1998).

El análisis de la contaminación armónica en inversores híbridos implica la evaluación de 4 parámetros clave: forma de onda fundamental, forma de onda distorsionada, la distorsión armónica total (THD) y el espectro armónico. Para la gráfica de forma de onda fundamental se usará la siguiente Ecuación (1) (Hart, 2001):

$$V_{(t)} = V_{max} * \text{sen}(2\pi * f * t) \quad (1)$$

Donde $V_{(t)}$ = Valor instantáneo del voltaje en el tiempo t , V_{max} = Amplitud máxima de la onda sinusoidal, f = Frecuencia de la onda sinusoidal (60Hz), t = Tiempo.

Cabe mencionar que la Ecuación (1) es para la gráfica de la onda fundamental sin distorsión armónica. La ecuación general para representar una onda distorsionada por armónicos, se puede expresar como una suma de la onda fundamental y las componentes armónicas (Transformada Rápida de Fourier - FFT) (Hart, 2001), como se muestra en la Ecuación (2):

$$V_{(t)} = \sum V_n * \text{sen}(k_n * 2 * \pi * f * t + \varphi_n) \quad (2)$$

Donde $V_{(t)}$ = Valor instantáneo del voltaje o corriente distorsionada en el tiempo t , V_n = Amplitud de la componente fundamental y Amplitud del armónico de orden n , f = Frecuencia fundamental, k_n = Orden del armónico. La suma Σ se extiende a todos los armónicos presentes en la onda distorsionada.

Esta Ecuación (2) expresada de forma general, permite representar la forma de onda distorsionada y la tasa de distorsión armónica o THD, es la relación entre el valor residual armónico y la componente fundamental, expresado en valor porcentual como en la Ecuación (3) (Téllez Ramírez, 2010).

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum V_n}}{V_{fund}} * 100 \quad (3)$$

Donde el THD en porciento representa el Total Harmonic Distortion, por sus siglas en inglés, V_n representa valores eficaces de los armónicos de orden n y V_{fund} es el valor eficaz de la

componente fundamental. A continuación, en la Figura 4 se muestra la deformación periódica de la señal de voltaje (THDv) o la señal de Corriente (THDi):

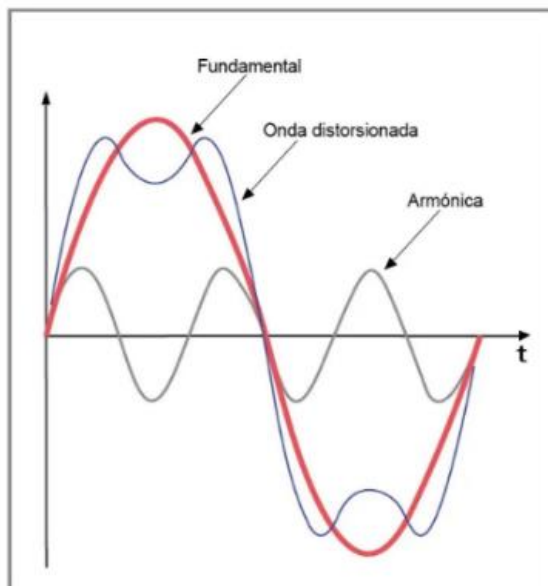


Figura 4 - Deformación periódica de la señal de voltaje (THDv) o la señal de Corriente (THDi)

Fuente: <https://www.secovi.com/blog/3/distorsion-armonica-de-corriente-vs-distorsion-armonica-de-voltaje>

Por otro lado, la Figura 4 muestra la deformación de onda fundamental y la composición armónica de la señal de salida. Muestra la componente armónica individual presente en la señal. Para la mitigación de la contaminación armónica en inversores híbridos se utilizan filtros pasivos, como los filtros LC, y filtros activos, que ofrecen compensación dinámica eficiente (Akagi, 1998), (Bollen & Gu, 2006).

3.1.2.4 Normativas y Estándares

El control de la contaminación armónica es esencial hoy, debido al aumento de cargas no lineales en las redes. Organizaciones como IEEE y en Ecuador, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable y CONELEC establece límites de distorsión armónica.

El estándar IEEE Std 519-2014, titulado "Práctica y Requisitos Recomendados para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", es reconocido porque establece límites de distorsión armónica. La Tabla 3 presentada a continuación hace un resumen de la normativa con los límites permisibles en cada armónico individual para el voltaje.

Tabla 3 - Límites de distorsión de voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC)

Voltaje en el PCC	Armónico individual (%)	THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Fuente: Los Autores (Normativa IEEE Std 519-2014 para THD de voltaje)

El estándar IEEE Std 519-2014 establece límites estrictos para la distorsión armónica total (THD) presentados en la Tabla 3. Para sistemas de baja tensión (menor de 1 kV), el límite recomendado de THD es del 8 %. En sistemas de media tensión (1 kV a 69 kV), se reduce al 5 %, y en sistemas de alta tensión (69 kV a 161 kV), se establece en un 3 % (IEEE, 2014). En Ecuador, el CONELEC y ARCONEL regulan la calidad de energía eléctrica y los niveles de contaminación armónica permitidos en la red. La resolución ARCONEL 005/18 establece límites de distorsión armónica total (THD) y armónicos individuales, basados en el estándar IEEE Std 519-2014. Estas normativas promueven tecnologías y prácticas de mitigación de armónicos para mejorar la calidad del suministro eléctrico teniendo como referencia los valores de la Tabla 4.

Tabla 4 - Límites de Distorsión de Corriente basada en los estándares IEE e IEC

Ratio Isc/IL	Distorsión Armónica Total (THD) (%)	Límite Individual (%)
< 20	5.0	4.0
20 - 50	8.0	7.0
50 - 100	12.0	10.0
100 - 1000	15.0	12.0
> 1000	20.0	15.0

Fuente: Normativa IEEE Std 519-2014 para THD de corriente

La resolución ARCONEL 005/18 establece los límites permisibles de distorsión armónica en la red eléctrica ecuatoriana como lo muestra la Tabla 4. Estos límites están en línea con las recomendaciones internacionales y adaptados a las condiciones locales de operación.

Para la evaluación del uso del filtro de armónicos se ha usado la siguiente lógica para su cálculo. La Figura 5 muestra el algoritmo que se sigue teniendo en cuenta que un enfoque común para implementar un filtro de armónicos es utilizar la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para convertir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, manipular los componentes de la frecuencia, y después usar la Transformada Inversa de Fourier (IFFT) para volver al dominio del tiempo. Trabajos investigativos como el de (González Palau y otros, 2016) han implementado algoritmos para el caso del método de inyección de corriente y para el cálculo de flujo de potencia y posterior elección del filtro. Para este estudio se Algoritmo que se ha desarrollado es

específicamente para el cálculo del filtro teniendo en cuenta el trabajo mencionado como un antecedente para el desarrollo. Es así como el algoritmo de la Figura 5 proporciona una base para el cálculo de filtros de armónicos en sistemas eléctricos. Sin embargo, cada sistema es único y puede requerir ajustes específicos o consideraciones adicionales.

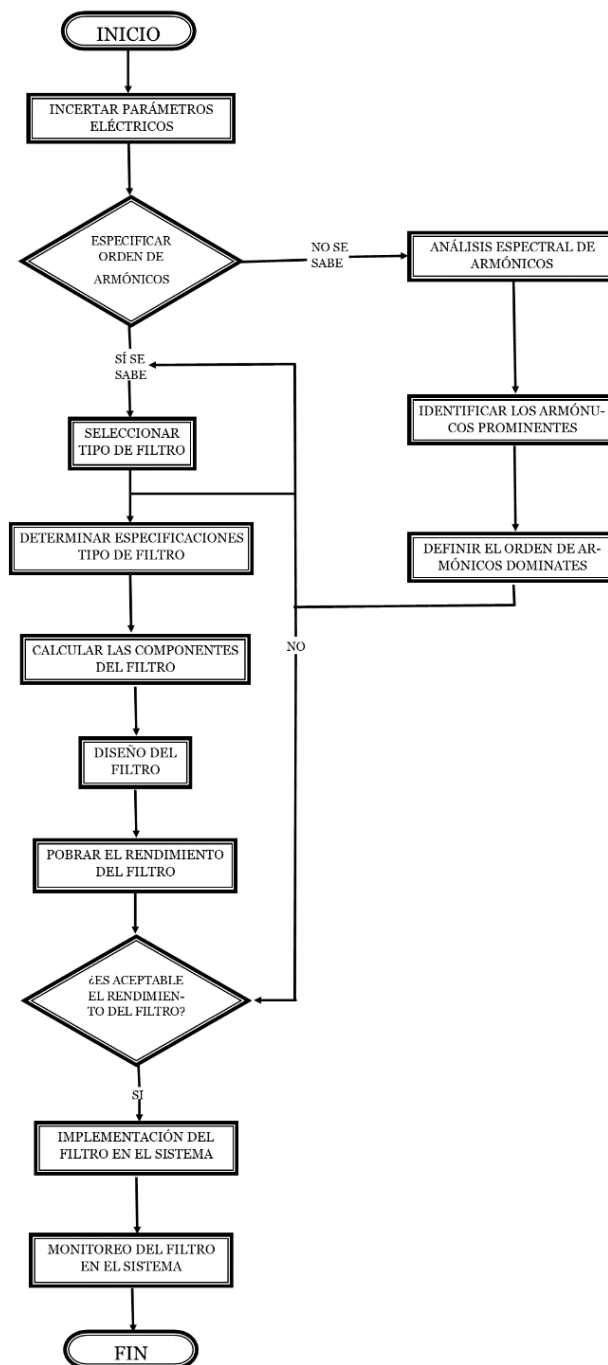


Figura 5 - Algoritmo para el cálculo del filtro
Fuente: Los Autores (Interfaz de Publisher 2019)

3.1.3 Análisis de Resultados

Para el desarrollo del estudio, se ha conectado el analizador de calidad de energía durante 7 días como lo recomienda la norma IEEE Std 1159-2019. Cabe aclarar que el inversor híbrido como tal no tiene problemas de generación de armónicos como los muestra la Tabla 5:

Tabla 5 - Datos sin carga del Analizador

Parámetros	Valor
THD de voltaje	0%
THD de corriente	0%
Voltaje de salida	120V
Corriente de salida	0A

Fuente: Los Autores (Datos de la interfaz del analizador)

De los datos expuestos en la Tabla 5 es necesario hacer la presión de que no hay presencia de contaminación armónica a la salida del inversor híbrido, el THD de voltaje y corriente es de 0%, por lo que resulta necesario continuar con la aplicación del método para los diferentes casos de tipos de carga conectados al inversor híbrido.

3.1.3.1 Carga Combinada LC

Se ha conectado al inversor híbrido una carga inductiva de 20 W, 15 W, 9 W, 45 W, 7 W] y 8 W, potencias de tecnologías capacitivas e inductivas, estas cargas son balastos, transformadores, cargadores laptops y luminarias led. Estos dispositivos funcionan a 110-120 V y 60 Hz. Del Analizador de Calidad de Energía se puede rescatar datos del consumo real de una potencia activa de 99.1 W y 93.5 VAR de potencia reactiva con un factor de potencia (FP) igual a 0.727, desfase de 43 grados, una frecuencia de 60 [Hz] y una corriente de 1.135 A. La forma de onda obtenida muestra características típicas de una carga combinada LC, con una evidente distorsión debido a los componentes inductivos y capacitivos. Estas deformaciones de onda se muestran en la Figura 6:

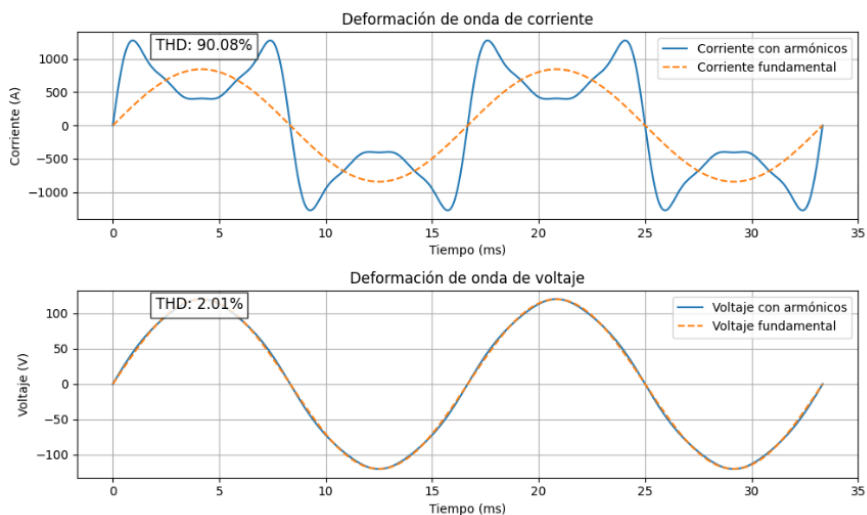


Figura 6 - Forma de onda de voltaje y corriente en cargas LC

Fuente: Los Autores (Plot de Visual Studio Code)

De los resultados presentados en la Figura 6 y al compararlo con estudios previos como los de (Smith y otros, 2017) que han reportado valores de THD similares para cargas LC, con THD de corriente en el rango de 50-80 %. Estos estudios también destacan que las cargas combinadas LC tienden a presentar una distorsión más alta en la corriente debido a la resonancia entre las componentes inductivas y capacitivas. Esos picos de onda de corriente son los que se observan en este estudio.

La distorsión armónica con el uso de cargas no lineales y dispositivos electrónicos (LC) pueden generar armónicos de amplitud considerable como los obtenidos en las mediciones y mostrados en la Figura 7 a continuación:

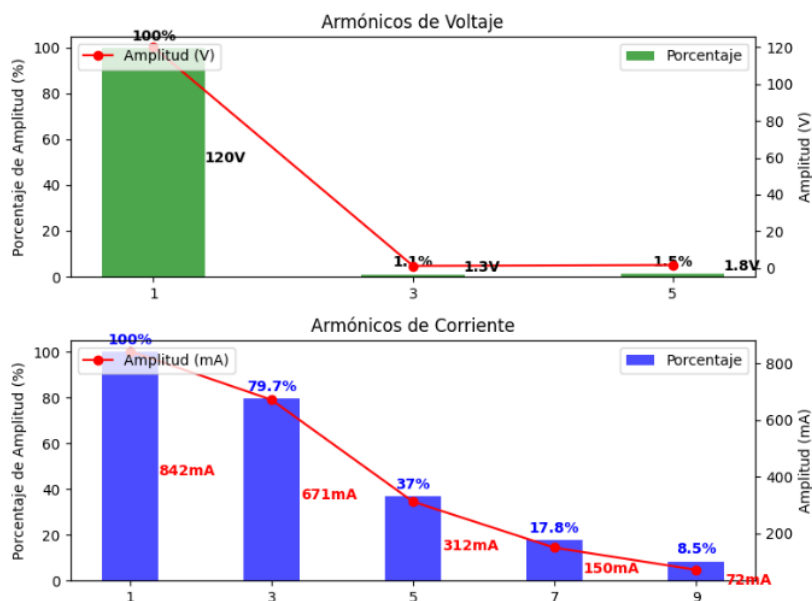


Figura 7 - Amplitud armónica en cargas LC
Fuente: Los Autores (Plot de Visual Studio Code)

Tras evaluar los resultados de la Figura 6 y Figura 7, según la normativa IEEE 519-2014, se encontró que el THD de voltaje está dentro de los límites aceptables (2.0%) según la Tabla 3, mientras que el THD de corriente presenta un valor del 90.7 %, indicando una severa distorsión armónica al comparar dicho valor con los datos de la Tabla 4. Estudios previos, como los de (Smith y otros, 2017), han documentado THD de corriente similarmente alto (50-80%) para cargas LC, resaltando las afectaciones que esto genera. Las armónicas de 3°, 5° y 7° son especialmente prominentes. En estos casos, autores como (Sharma & Patel, 2024) recomiendan el uso de filtros pasivos sintonizados a estas frecuencias para mitigar el THD de corriente.

3.1.3.2 Análisis de la “Carga Equilibrada”

De todos los dispositivos que se pueden encontrar en un sistema eléctrico residencial se ha conectado al inversor híbrido una carga combinada entre dispositivos resistivos, capacitivos e inductivos. Los datos de la carga combinada arrojan un consumo real de potencia activa de 359.4 W, potencia reactiva de 56.3 VAR, voltaje de 119.3 V, corriente de 3.049 A, FP de 0.988, un desfase de 9°, un THD de voltaje de 0.9 % y un THD de corriente de 16.2%.

La presencia de componentes reactivos (inductivos y capacitivos) junto con los resistivos, sugiere una desviación de la forma de onda sinusoidal pura, registro que se observa en la Figura 8:

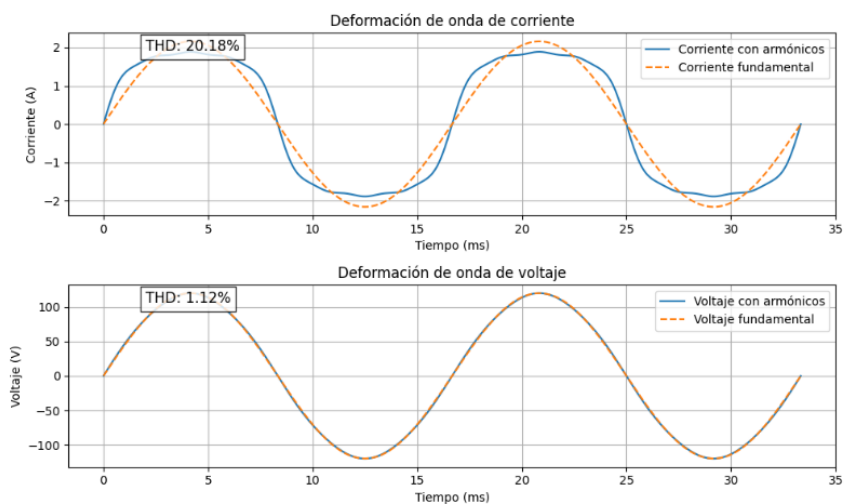


Figura 8 - Forma de onda de voltaje y corriente en carga tipo RLC

Fuente: Los Autores (Plot de Visual Studio Code)

La forma de onda generada por la carga RLC analizada exhibe características de alta calidad energética, con una distorsión mínima respecto a la onda sinusoidal ideal, como lo muestra la Figura 8. No obstante, es importante realizar un análisis más profundo de los componentes armónicos para garantizar el cumplimiento de los estándares más estrictos de calidad de energía. Aquí la carga RLC presenta un THD de voltaje muy bajo (0.9 %) y un THD de corriente moderado (16.2 %), indicando la presencia de distorsiones armónicas principalmente en la corriente. Las amplitudes de las armónicas más relevantes se presentan en la Figura 9:

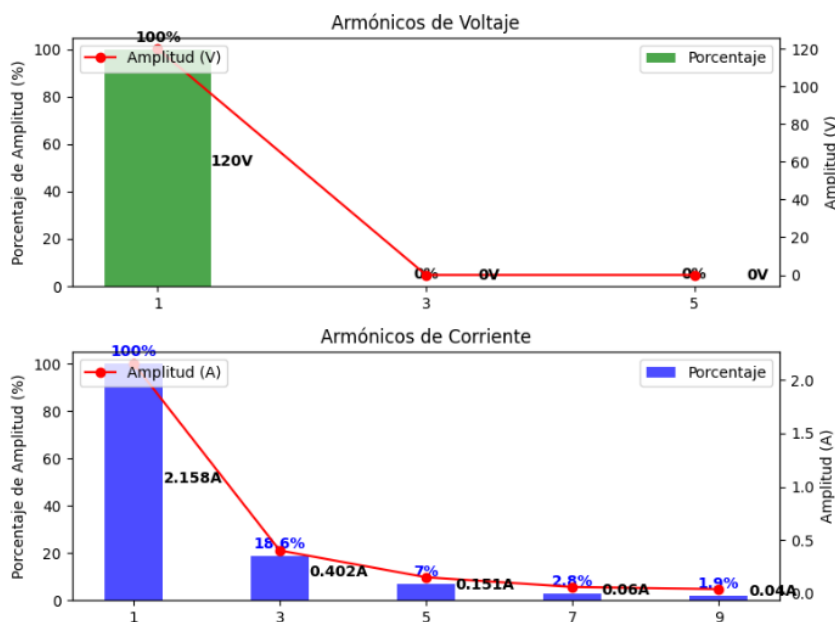


Figura 9 - Amplitud de armónicos de corriente y voltaje en cargas RLC
Fuente: Los Autores (Plot de Visual Studio Code)

En el estudio de (Ramírez y otros, 2019), se identificaron armónicas predominantes de tercer y quinto orden en cargas RLC similares, con amplitudes de 0.15 A y 0.10 A respectivamente. Aunque nuestros resultados de la Figura 9 muestran valores ligeramente inferiores, posiblemente debido a la configuración específica de la carga y su alto factor de potencia cercano a la unidad, se observó que el THD de corriente excede los límites establecidos por la normativa ecuatoriana ARCONEL 003/18, que especifica un máximo del 8% para sistemas industriales. Entonces, se recomienda conectar cargas RLC equilibradas para reducir la distorsión armónica y mejorar el factor de potencia, aunque puede requerirse complementar con filtros pasivos o activos para cumplir completamente con las normativas de calidad de energía (Ramírez y otros, 2019).

3.1.3.3 Uso de filtros de armónicos para la mitigar los armónicos

En el cálculo del filtro de armónicos se ha tomado como referencia la norma IEEE-1531-2003 que establece los siguientes principios de diseño:

- **Frecuencia de sintonía:** Se recomienda sintonizar el filtro a una frecuencia ligeramente menor que la frecuencia de la armónica objetivo (aproximadamente entre un 3% y un 10% menor) (IEEE-1531-2003, 2003).

- **Factor de calidad (Q):** Se recomienda un factor de calidad alto (generalmente entre 20 y 30) (IEEE-1531-2003, 2003).

A continuación, se presentan las expresiones utilizadas para realizar el cálculo del filtro pasivo en los siguientes pasos que se ha usado en (Velásquez Tapia & Marreno Ramírez, 2014):

- 1) Cálculo de la potencia reactiva que se necesita compensar está dado por la Ecuación 4

$$Q_{eff} = (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) * P \quad (4)$$

Dónde θ_1 = Ángulo del FP actual, θ_2 = Ángulo del FP deseado, P = Potencia activa del sistema.

- 2) Cálculo de la reactancia efectiva del filtro mediante las Ecuaciones (5) y (6) . Para este caso de estudio se ha tomado un 7%, límite basado en la norma IEEE-1531-2003:

$$X_{eff} = \frac{(V_{LN})^2}{Q_{eff}} \quad (5)$$

$$X_c = \frac{(h - (h * 0.07))^2}{(h - (h * 0.07))^2 - 1} * X_{eff} \quad (6)$$

- 3) Cálculo del capacitor con la Ecuación (7):

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} [F] \quad (7)$$

- 4) Cálculo del reactor con las Ecuación (8) y (9):

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (8)$$

$$L = \frac{X_L}{2 * \pi * f} [H] \quad (9)$$

- 5) Cálculo de la resistencia del filtro con la Ecuación (10):

$$R = \frac{X_L * (h - (h * 0,07))}{Q_f} [\Omega] \quad (10)$$

- 6) Verificación de la norma usando la siguiente Ecuación (11):

$$\%MargCorriente = \frac{I_{TOTRMS}}{I_{fund}} * 100 \leq 135\% \text{ de la } I_{fund} \quad (11)$$

La comparación de resultados con la incorporación de los filtros calculados se muestra en la Figura 10. Al realizar los cálculos para la aplicación del filtro de armónicos mediante lenguaje de programación de Python se obtiene un valor del 2mH para el inductor y 100µF para el capacitor como muestra la Figura 10. Cabe recalcar que se ha hecho un ajuste para obtener casi el mismo valor de THD de 16.2 % de corriente que el caso práctico propuesto.

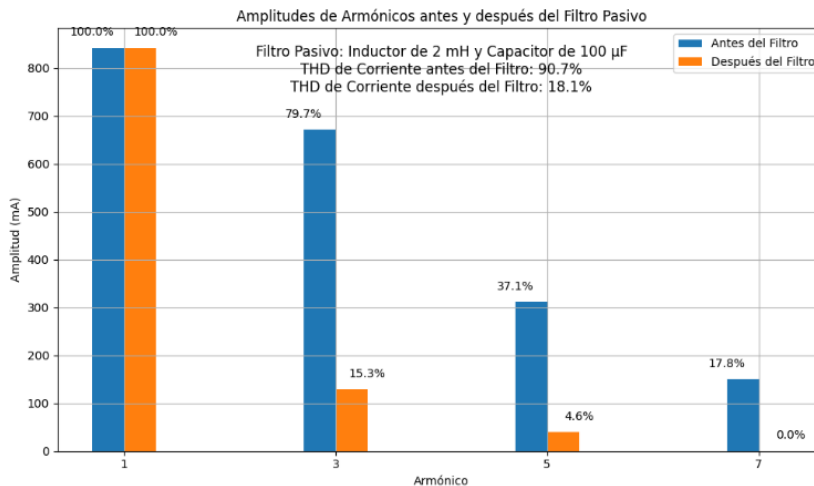


Figura 10 - Resultados de la aplicación del filtro de armónicos

Fuente: Los Autores (Plot de Visual Studio Code)

Para verificar la efectividad del filtro se procede a comparar el valor de Distorsión Armónica de Corriente usando la Tabla 4 de la norma IEEE Std 519-2014. Para calcular la corriente de cortocircuito se usa la siguiente Ecuación (12):

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{red}} \quad (12)$$

Donde I_{cc} = es la corriente de cortocircuito en amperios, V = es la tensión de alimentación entre fase y neutro en voltios, Z = es la impedancia del circuito en ohmios.

De la Tabla 6 se tiene que la relación I_{sc}/I_L se calcula con la siguiente Ecuación (13):

$$Ratio = \frac{I_{sc}}{I_L} \quad (13)$$

Al realizar los cálculos de la Ecuación (12) se obtiene un valor de 35 A y de la Ecuación (13) un valor de relación de 1.25. Al referirnos a los valores de los límites de la Tabla 4 se debe obtener un valor de THD de corriente individual de 4 %. Para el caso de estudio se logra identificar en la Figura 9 un valor de THD de corriente para el tercer armónico de 15.3 %; un valor de 4.6 %

en el tercer armónico, logrando a cumplir la normativa IEEE Std 519-2014 tan sólo el quinto armónico. Cabe aclarar que el filtro de armónicos calculado se hizo un ajuste para obtener valores similares de mitigación que la propuesta práctica. Las dos propuestas buscan ajustarse como una medida económica viable dependiendo el medio en que se pueda implementar.

Para mejor elección de la propuesta a implementarse según el medio en que se requiera su ejecución se muestra en la Tabla 6 datos de las pérdidas en los dos casos evaluados para la mejora de la calidad de energía en la red:

Tabla 6 - Potencia de Pérdidas

Pérdidas de potencia activa	Caso 1 (Carga Equilibrada)	Caso 2 (Filtro Sintonzado)
Pp	0.499 W	0.357 W

Fuente: Los Autores (Datos de la interfaz del analizador)

De la información de la Tabla 6 es menester aclarar que en los Casos 1 y 2 en presencia de cargas no lineales, se puede notar la diferencia entre las pérdidas. En el Caso 2 se ve una mayor disminución llegando a un valor del 6 % con respecto a la condición inicial del sistema sin la aplicación de mejoras. Esto se debe a que el filtro logra una mayor reducción de la distorsión armónica total. Al reducir las corrientes armónicas, se minimizan las pérdidas por calentamiento en conductores y equipos. Mejora del factor de potencia y al reducir las pérdidas, mejora el rendimiento general del sistema eléctrico como lo corrobora el estudio de (Sharma & Patel, 2024). Es necesario aclarar que al realizar el cálculo del filtro se trató de ajustar su valor lo más cercano posible a los resultados que se obtuvieron de la propuesta de “Carga Equilibrada”.

3.1.4 Discusión de resultados

Se identificaron diversas fuentes de distorsión armónica en distintas condiciones de carga. Los armónicos de orden superior, generados principalmente por dispositivos conectados al inversor. Esto coincide con estudios previos como los de (López y otros, 2021), (Petel y otros, 2014), (Pereira y otros, 2014), (García y otros, 2018), (Smith y otros, 2017) y (Ramírez y otros, 2019) que señalan a los inversores y otros dispositivos electrónicos como fuentes primarias de armónicos en sistemas de energía renovable.

La presencia de armónicos se asoció con una reducción significativa en la eficiencia del sistema eléctrico entre un 5 % a un 6 % respectivamente para los dos casos de mejoras analizados. Los experimentos mostraron que los armónicos de orden superior son prominentes bajo diferentes condiciones de carga, destacando la importancia de mitigar la contaminación armónica para optimizar el rendimiento del sistema. Se evaluó el uso de filtros específicos para cada armónico identificado, demostrando que los filtros pasivos diseñados para atenuar frecuencias específicas son efectivos para reducir la amplitud de los armónicos y mejorar la calidad de la energía suministrada.

Otras de las propuestas es la implementación de la denominada "Carga Equilibrada". Esta técnica ayuda a distribuir uniformemente las cargas, reduciendo así los efectos de los armónicos, no requiere inversión adicional, pero si está sujeta a la posibilidad de poder balancear el uso de los diferentes tipos de cargas, aspecto que no siempre puede ser factible

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El análisis de la contaminación armónica en la salida de un inversor híbrido de 3kVA reveló que las principales fuentes de distorsión armónica, se deben las variaciones en las condiciones de carga. Estas distorsiones impactan negativamente en la eficiencia del sistema y la aplicación de medidas correctivas es posible reducir sus valores entre el 5 % y 6 % en función del método aplicado.
- Las mediciones detalladas utilizando equipos de análisis de calidad de energía mostraron que los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden son los más prominentes en la salida del inversor híbrido. La magnitud de estos armónicos varía con las condiciones de carga y operación, siendo más significativa en condiciones de carga Inductivas-Capacitivas.
- La implementación de estrategias de mitigación recomendadas e implementadas por otros autores, como los filtros pasivos y el caso propuesto en este estudio, demuestra el mismo grado de efectividad del filtro pasivo para reducir considerablemente los niveles de distorsión armónica de un 79.7 % a un 16.2 % en el tercer armónico, de un 37.1 % a un 4.6 % en el quinto armónico, mejorando así la calidad de la energía suministrada por el inversor. También se ha verificado que el uso de la carga equilibrada puede ser otra vía para

resolver los niveles de contaminación en los casos que resulta posible mover en el tiempo el uso de determinadas cargas. A su vez estos resultados ofrecen una guía práctica para mejorar la eficiencia y fiabilidad de los sistemas eléctricos modernos en presencia de cargas no lineales.

4.2 Recomendaciones

- Implementar un análisis espectral detallado utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para cuantificar con precisión la magnitud de cada componente armónico.
- Realizar un estudio comparativo con inversores de diferentes topologías para establecer un benchmark de rendimiento en términos de calidad de energía.

5 REFERENCIAS

- [1] B. K. Bose, «Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. LX, nº 7, pp. 2638-2651, 2013.
- [2] S. B. Kjaer, J. K. Pederson y F. Blaabjerg, «A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. XLI, nº 5, pp. 1292-1306, 2005.
- [3] J. H. R. Enslin y P. J. M. Heskes, «Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. XIX, nº 6, pp. 1586-1593, 2004.
- [4] H. Akagi, «New trends in active filters for power conditioning,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. XXXII, nº 6, pp. 1312-1322, 1998.
- [5] J. Holtz, «High-Frequency PWM Techniques for Harmonic Reduction in Inverters,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. XL, nº 2, pp. 486-493, 2004.
- [6] M. H. J. Bollen y F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*, New Jersey: IEEE press, 2012.
- [7] Y. Zhang, Q. Wang y S. Li, «Advanced Simulation Techniques for Harmonic Analysis in Hybrid Inverter Systems,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. IX, nº 33, pp. 7845-7856, 2023.
- [8] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai y Zheng Peng, «Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. XLI, nº 4, pp. 724-738, 2002.
- [9] B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [10] M. P. Kazmierkowski y L. Malesani, «Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. XLV, nº 5, pp. 691-703, 1998.
- [11] S. Khwan-on, L. de Lillo, L. Empringham, P. Wheeler y C. Gerada, «Hybrid inverter topology for electric vehicle integrated battery chargers,» *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 531-536, 2012.
- [12] D. Hart, *Electrónica de Potencia*, Valparaíso: Prentice Hall, 2001.
- [13] S. Rivera, B. Wu, S. Kouro, H. Zhang y D. Xu, «Modeling and control of a hybrid-boosting grid-connected photovoltaic system,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. XXXII, nº 2, pp. 1599-1612, 2017.
- [14] J. Arrillaga, R. Watson y S. Chen, *Power system quality assessment*, British: John Wiley & Sons, 2000.
- [15] A. E. Emanuel, *Power definitions and the physical mechanism of power flow*, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2010.
- [16] G. Wakileh, *Power Systems Harmonics*, England: Springer, 2001.
- [17] W. Grady y S. Santoso, «Understanding power system harmonics,» *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, nº 11, pp. 8-11, 2001.

- [18] ARCERNNR, «Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,» Estado Ecuatoriano, Quito, 2020.
- [19] IEEE, «519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» *Revision of IEEE Std 519-1992*, pp. 1-29, 2014.
- [20] A. Gomez y B. Smith, «Mathematical modeling of harmonic distortion in 3kVA hybrid inverters,» *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics*, pp. 150-155, 2018.
- [21] C. Wang, X. Yang, Z. Wu, Y. Che, L. Guo, S. Zhang y Y. Liu, «Simulation of harmonic emissions from 3kVA hybrid inverters using MATLAB/Simulink,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. LXII, n° 3, pp. 1200-1210, 2015.
- [22] R. Sharma, A. Soni y S. Bhattacharya, «Análisis de características eléctricas de cargas residenciales comunes,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. XXXIII, n° 5, pp. 5568-5579, 2018.
- [23] R. Fernández, «Estudio Comparativo de THD en Sistemas Eléctricos,» *Journal of Power Quality*, vol. XXIX, n° 3, pp. 87-95, 2019.
- [24] M. Bollen y I. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [25] A. Von Jouanne y B. Banerjee, «Assessment of voltage unbalance,» *IEEE Trans. Power Del.*, vol. XVI, n° 4, pp. 782-790, 2001.
- [26] S. Rönnberg y M. Bollen, «Harmonic distortion from power electronics in public and industrial power distribution systems,» *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, pp. 1809-1814, 2000.
- [27] E. Téllez Ramírez, «Distorsión Armónica,» AUTOMATIZACION, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A., Puebla, 2010.
- [28] I. González Palau, S. Marreno Ramírez, A. Legra Lobaina, Á. León Segovia y X. Proaño Maldonado, «Modelación de Regímenes de Redes Eléctricas en Presencia de Distorsión Armónica,» *Revista Técnica Energía*, pp. 97-105, 2016.
- [29] J. Smith, P. Johnson y M. Lee, «Harmonic Analysis of Combined Inductive-Capacitive Loads,» *Journal of Electrical Engineering*, vol. XLV, n° 3, pp. 235-243, 2017.
- [30] A. Sharma y B. Patel, «Implementation of Tuned Passive Filters with Optimization Algorithms for Power Quality Improvement in Industrial Systems,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 2456-2467, 2024.
- [31] J. Ramírez, M. González y L. Torres, «Harmonic Distortion in RLC Loads: Analysis and Mitigation,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XXIX, n° 1, pp. 452-459, 2019.
- [32] IEEE-1531-2003, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,» IEEE, New York, 2003.
- [33] J. A. Velásquez Tapia y S. Marreno Ramírez, «DISEÑO DE FILTROS ARMÓNICOS IMPARES EN BAJA TENSIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» *Posgrados Universidad Técnica de Cotopaxi*, pp. 64-84, 2014.
- [34] M. López, R. García y A. Pérez, «Analysis of Incandescent Bulb Characteristics in Power Quality Measurements,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. XV, n° 2, pp. 200-210, 2021.

- [35] A. Petel, S. K. Joshi y P. R. Sharma, «Harmonic distortion analysis of LED lamps,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XXIX, n° 3, pp. 1421-1427, 2014.
- [36] G. Pereira, M. Aredes y L. F. C. Monteiro, «Harmonic Distortion Analysis of Different LED Lamps for Street Lighting,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XXIX, n° 3, pp. 1421-1427, 2014.
- [37] J. García, M. Rodríguez y L. Pérez, «Análisis de Armónicas en Cargas Inductivas,» *Revista de Ingeniería Eléctrica*, vol. XXXIV, n° 2, pp. 45-52, 2018.
- [38] IEC 61000-3-2 y IEC 61000-3-4, «"Electromagnetic compatibility (EMC),» International Electrotechnical Commission, Geneva, 2018.
- [39] G. W. Chang, C. M. Yeh y W. H. Yu, «Effects of harmonic distortion on power quality in power systems,» *IEEE Power and Energy Society*, pp. 2407-2412, 2000.
- [40] «Hybrid AC/DC power transmission for efficiency improvement and renewable energy integration in distribution systems,» *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. XXXIII, n° 4, pp. 3945-3959, 2018.
- [41] A. Ghosh y G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [42] EN 50160, «Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems,» CENELEC, Brussels, 2010.
- [43] C. J. Mozina, *Power System Instrumentation and Measurements: A Guide for Engineers*, Boca Ratón: CRC Press, 2015.
- [44] A. Moreno-Muñoz, *Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment*, London: Springer, 2007.
- [45] J. Smith, T. Brown y L. Johnson, «Behavior of Resistive Loads in Low Voltage Power Systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XX, n° 4, pp. 1000-1005, 2019.
- [46] R. Bayindir, I. Colak, G. Fulli y K. Demirtas, «Review of demand side management, smart grid and smart metering,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. XL, n° 41, pp. 1008-1014, 2015.
- [47] B. Singh, S. Arya y A. Chandra, «Implementation of single-phase enhanced phase-locked loop-based control algorithm for three-phase DSTATCOM,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. L, n° 5, pp. 3023-3033, 2014.
- [48] ARCERNNR, «Régimen Económico y Tarifario para la prestación de los servicios públicos de Energía Eléctrica y Alumbrado Público General,» ARCERNN, Quito, 2021.