



Impacto de los armónicos y perturbaciones en la calidad de la energía en instalaciones eléctricas de Compañía de Empaques: Evaluación, cumplimiento normativo y soluciones.

Laura Yuliana Ceballos Betancur

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera electricista

Modalidad de práctica

Semestre de industria

Asesores

Jaime Alejandro Valencia Velásquez, Ingeniero Electricista

Anderson Felipe Flórez Zapata, Ingeniero Electricista

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Ingeniería eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	Ceballos Betancur, 2018 [1]
Referencia	[1] L. Ceballos Betancur. “Impacto de los armónicos y perturbaciones en la calidad de la energía en instalaciones eléctricas de Compañía de Empaques: Evaluación, cumplimiento normativo y soluciones. ”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, 2025
Estilo IEEE (2020)	



(Posgrado UdeA (A-Z)), Cohorte (cohorte posgrado en numero romano).

Grupo de Investigación (Grupo de investigación UdeA (A-Z).)

(Centro de investigación UdeA (A-Z)).



(Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z))

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noé Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, quien me ha dado la fuerza, la sabiduría y las capacidades necesarias para llegar hasta aquí, porque sin Su guía este camino habría sido imposible. A mi madre, por su amor incondicional, por caminar a mi lado en cada etapa de este proceso y por ser siempre mi mayor ejemplo de entrega y fortaleza; a mi esposo, mi compañero de vida, por ser mi soporte, por su paciencia, comprensión y por creer en mí incluso cuando yo dudaba; a mi hijo, el motor que me impulsa cada día a ser mejor, a seguir adelante y a no rendirme jamás; a mi padre, por sus palabras de aliento, por recordarme siempre que soy capaz y por estar presente con su apoyo sincero; a mi hermana, por ser un pilar constante, por su cercanía, sus palabras de ánimo y por demostrarme siempre que cuento con ella; y a mi abuela, que ya no está físicamente, pero cuyo amor, apoyo y orgullo por mí me acompañarán por siempre, porque este logro también es suyo.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada momento de este camino, por darme la sabiduría y la constancia necesarias para avanzar. A mi madre, por su amor incondicional, por estar siempre a mi lado con palabras de aliento y por ser mi mayor ejemplo de dedicación; y a mi esposo, por su paciencia, apoyo inquebrantable y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Agradezco también al profesor Jaime Valencia, asesor de este trabajo de grado, por su acompañamiento durante el desarrollo del mismo. A los docentes del programa de Ingeniería Eléctrica, por compartir sus conocimientos y aportar de manera significativa a mi formación académica. A mis compañeros, por su colaboración, amistad y apoyo durante estos años, por los aprendizajes compartidos y por hacer más llevadero este proceso. Finalmente, expreso mi agradecimiento a la empresa Grupo Excala, especialmente al Departamento Eléctrico, por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas, por su confianza y por facilitar un entorno de aprendizaje que enriqueció mi proceso formativo. .

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT.	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. OBJETIVOS	14
A. Objetivo general	14
B. Objetivos específicos.	14
III. MARCO TEÓRICO	15
IV. METODOLOGÍA.	28
A. 1. Diagnóstico preliminar del sistema eléctrico	28
B. 2. Selección de puntos de medición.	28
C. 3. Revisión documental y normativa	31
D. 4. Instalación del analizador de redes y recolección de datos eléctricos.	31
E. 5. Verificación normativa y evaluación cuantitativa de efectos	34
F. 6. Propuesta de soluciones técnicas.	35
G. 7. Procesamiento y análisis de datos	35
V. RESULTADOS	37
A. 1. Autotransformador de 150 kVA – Telares	37
VI. CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS	63

LISTA DE TABLAS

Tabla I	Fecha y hora de los registros	34
Tabla II	%THD de tensión en tiempo corto y muy corto para el autotransformador de 150 kVA	40
Tabla III	THD % de tensión en el transformador de 48 kVA — Enconadora Starex 3	48
Tabla IV	Cálculo de la relación I_{sc}/I_L en el transformador de 48 kVA	49
Tabla V	Cálculo de pérdidas adicionales por armónicos en el transformador de 48 kVA	55
Tabla VI	Cálculo de pérdidas adicionales por armónicos en el autotransformador de 150 kVA	57
Tabla VII	Parámetros del filtro pasivo sintonizado al quinto armónico	60

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1	Forma de onda de corriente distorsionada típica en sistemas de energía eléctrica [[1]]	18
Fig. 2	Rectificación trifásica: (a) Puente de tiristores de 6 pulsos y (b) Corriente CA y espectro de corriente [[1]]	20
Fig. 3	Límite de distorsión armónica de voltaje. [[2]]	22
Fig. 4	Límite de distorsión armónica de corriente [[2]]	23
Fig. 5	Enconadora Starex 3. Fuente: Elaboración propia.	29
Fig. 6	Cabezales de bobinado Fuente: Elaboración propia.	29
Fig. 7	Telares circulares Fuente: Elaboración propia.	30
Fig. 8	Analizador de redes Metrel PowerQ MI 2492 Tomado de: pagina web Metrel.	32
Fig. 9	Punto de registro en la Enconadora Starex 3.	33
Fig. 10	Punto de registro en el autotransformador de 150 kVA.	33
Fig. 11	Armónicos de voltaje V1 en el autotransformador de 150kVA , medición en tiempo muy corto	38
Fig. 12	Armónicos de voltaje V2 en el autotransformador de 150kVA , medición en tiempo muy corto	38
Fig. 13	Armónicos de voltaje V3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto	38
Fig. 14	Armónicos de voltaje V1 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto	39
Fig. 15	Armónicos de voltaje V2 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto	39
Fig. 16	Armónicos de voltaje V3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto	39
Fig. 17	Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden armónico en tiempo corto para cada fase	40

Fig. 18	Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden armónico en tiempo muy corto para cada fase	40
Fig. 19	Armónicos de corriente I1 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto	42
Fig. 20	Armónicos de corriente I2 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto	42
Fig. 21	Armónicos de corriente I3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto	42
Fig. 22	Armónicos de corriente I1 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto	43
Fig. 23	Armónicos de corriente I2 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto	43
Fig. 24	Armónicos de corriente I3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto	44
Fig. 25	Porcentaje de distorsión armónica de corriente por orden armónico en tiempo muy corto	45
Fig. 26	Porcentaje de distorsión armónica de corriente por orden armónico en tiempo corto	45
Fig. 27	Armónicos de voltaje V1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto	46
Fig. 28	Armónicos de voltaje V2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto	46
Fig. 29	Armónicos de voltaje V3 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto	46
Fig. 30	Armónicos de voltaje V1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto	47
Fig. 31	Armónicos de voltaje V2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto	47

Fig. 32	Armónicos de voltaje V3 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto	47
Fig. 33	Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo muy corto para cada fase	49
Fig. 34	Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo corto para cada fase	49
Fig. 35	Armónicos de corriente I1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto	50
Fig. 36	Armónicos de corriente I2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto	50
Fig. 37	Armónicos de corriente I3 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto	51
Fig. 38	Armónicos de corriente I1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto	51
Fig. 39	Armónicos de corriente I2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto	51
Fig. 40	Armónicos de corriente I2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto	52
Fig. 41	Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo muy corto para cada fase	53
Fig. 42	Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo corto para cada fase	53
Fig. 43	Cálculo del porcentaje de pérdidas de potencia en el transformador de 48kVA según IEEE C57.110 de 2018	54
Fig. 44	Cálculo del porcentaje de pérdidas de potencia en el autotransformador de 150kVA según IEEE C57.110 de 2018	56

Siglas, acrónimos y abreviaturas

IL	Corriente de carga maxima
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
V	Voltaje
A	Amperios
PCC	Point of Common Coupling
POC	Punto de conexión
THD	Total Harmonic Distortion
TDD	Total Demand Distortion
UdeA	Universidad de Antioquia
HLF	Harmonic Loss Factor

RESUMEN

Este trabajo presenta la evaluación de la calidad de la energía eléctrica en instalaciones industriales de la Compañía de Empaques, con énfasis en la distorsión armónica y su impacto sobre los equipos eléctricos. El estudio se centró en dos transformadores que evidenciaban síntomas operativos anómalos: el transformador de 48 kVA, asociado a fallas frecuentes en variadores de velocidad, y el autotransformador de 150 kVA, que presentaba sobrecalentamiento a pesar de operar con cargas inferiores a su capacidad nominal.

Las mediciones se realizaron con un analizador de redes, siguiendo los lineamientos de la norma IEEE 519-2022, en periodos de tiempo corto y muy corto. Asimismo, se evaluaron las pérdidas adicionales por armónicos con base en la norma IEEE C57.110-2018, mediante el cálculo del Factor de Pérdida Armónica (FHL). Los resultados revelaron incumplimientos en los límites de distorsión de corriente (TDD) y pérdidas adicionales significativas en ambos transformadores.

Como propuesta de mitigación, se plantearon estrategias como la especificación de transformadores con Factor K adecuado, la selección de equipos con menor generación de armónicos y el diseño de filtros. Se desarrolló un filtro pasivo sintonizado al quinto armónico como solución técnica para el autotransformador de 150 kVA. Los hallazgos evidencian la necesidad de implementar medidas correctivas que permitan mejorar la eficiencia energética, reducir el desgaste de los equipos y garantizar el cumplimiento normativo en sistemas eléctricos industriales.

Palabras clave — Calidad de la energía, armónicos, transformadores, distorsión armónica, pérdidas adicionales, filtros pasivos, IEEE 519, Factor K, eficiencia energética

ABSTRACT

This study presents the assessment of power quality in the industrial electrical systems of Compañía de Empaques, focusing on harmonic distortion and its effects on equipment performance. The analysis targeted two transformers showing operational anomalies: a 48 kVA transformer connected to variable speed drives with frequent failures, and a 150 kVA auto-transformer that exhibited overheating under typical load conditions.

Measurements were conducted using a power quality analyzer in accordance with IEEE 519-2022, capturing short and very short time intervals. Additionally, power losses due to harmonics were estimated using the Harmonic Loss Factor (FHL) as outlined in IEEE C57.110-2018. Results showed that both transformers exceeded permissible limits for current distortion (TDD) and exhibited considerable additional power losses.

Mitigation strategies were proposed, including the use of K-rated transformers, selecting equipment with lower harmonic emission, and implementing harmonic filters. A passive filter tuned to the 5th harmonic was designed as a specific solution for the 150 kVA auto-transformer. The findings highlight the importance of harmonic mitigation to improve energy efficiency, protect electrical infrastructure, and ensure regulatory compliance in industrial power systems.

Keywords — Power quality, harmonics, transformers, harmonic distortion, additional losses, passive filters, IEEE 519, K-factor, energy efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

Toda forma de onda periódica no-sinusoidal puede representarse como la suma de ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, denominadas armónicos[[2]]. Estos armónicos pueden distorsionar la forma de onda de tensión y corriente, generando efectos adversos en los equipos y en la red eléctrica. Entre los problemas más comunes asociados a la presencia de armónicos se encuentran el sobrecalentamiento de transformadores, cables y motores, el mal funcionamiento de dispositivos electrónicos, el envejecimiento prematuro de componentes eléctricos y la activación incorrecta de protecciones eléctricas. [[3]], [[1]]

La calidad de la energía eléctrica es un factor fundamental en la eficiencia y confiabilidad de los procesos industriales. Un suministro eléctrico con perturbaciones puede generar impactos negativos en los equipos, afectando su rendimiento, reduciendo su vida útil y provocando fallos inesperados. Entre las principales perturbaciones que pueden presentarse en una red eléctrica, los armónicos son una de las más relevantes y problemáticas, especialmente en industrias que emplean equipos electrónicos sensibles, motores eléctricos y variadores de velocidad, como es el caso de la Compañía de Empaques. [[3]]

Dada esta problemática, es importante considerar también la influencia de los armónicos en las corrientes de secuencia negativa y cero, que pueden provocar pares contrarios en los motores trifásicos, sobrecalentamientos y esfuerzos mecánicos adversos. Además, en los transformadores, los armónicos aumentan las pérdidas por efecto Joule y corrientes de Foucault en los devanados, especialmente aquellos de alta frecuencia. Normas como IEEE C57.110-2018 [[4]] establecen que, para determinados niveles de distorsión, se debe aplicar un factor de reducción de capacidad de carga con base en el llamado factor de pérdida armónica (HFL). [[5]]

Por su parte, el Factor K es una medida reconocida internacionalmente que expresa la capacidad de un transformador para soportar armónicos sin sobrecalentarse. La relación entre el Factor K y la capacidad de carga es inversamente proporcional: a mayor Factor K, menor capacidad útil del transformador si este no fue diseñado para soportarlos. Esta relación puede visualizarse en curvas obtenidas de manera experimental, como Capacidad vs. Factor

K”, que permiten estimar el grado de derating necesario. [[4]]

En un entorno industrial donde gran parte de los procesos dependen del uso de motores, variadores de velocidad, sistemas de control y otros equipos electrónicos, el análisis de la calidad de la energía se vuelve esencial. La identificación y evaluación de los armónicos permiten tomar medidas correctivas oportunas para minimizar sus efectos negativos, garantizando la estabilidad del sistema eléctrico y la eficiencia operativa de la planta.

Se realizará un análisis detallado de la calidad de la energía en las subestaciones y en la red eléctrica de la Compañía de Empaques, en cumplimiento con normativas como IEEE 519 [[2]], IEC 61000 y CREG 024 de 2015 [[6]]. A través de este análisis, se establecerán procedimientos para la medición, evaluación y mitigación de los armónicos, asegurando un funcionamiento óptimo de los equipos y la continuidad de los procesos productivos de la empresa. [[7]]

Para llevar a cabo este análisis, se empleará un analizador de redes y se recolectarán medidas de las variables eléctricas en periodos de corto y muy corto tiempo como lo establece la norma IEEE 519 del 2022 [[2]], y de esta forma se tendrán datos representativos del comportamiento de la red eléctrica en distintos momentos, facilitando la identificación de anomalías y la evaluación de los armónicos presentes. La información obtenida será fundamental para la toma de decisiones y la implementación de medidas correctivas en la red eléctrica de la Compañía de Empaques. Posteriormente, con base en los resultados obtenidos, se propondrán soluciones como la instalación de filtros de armónicos, transformadores con blindaje electrostático, o ajustes en las conexiones eléctricas, con el fin de mejorar la calidad de la energía y mitigar los efectos negativos de los armónicos en los equipos y en la red.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar el impacto de los armónicos y otras perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica en las instalaciones de la Compañía de Empaques, mediante la medición, análisis y diagnóstico de la red, con el fin de proponer soluciones técnicas que garanticen el cumplimiento normativo y mejoren la eficiencia y confiabilidad del sistema eléctrico.

B. Objetivos específicos

- Medir y evaluar la calidad de la energía en distintos puntos de la red eléctrica de la empresa mediante el uso de un analizador de redes.
- Identificar y cuantificar la presencia de armónicos y otras perturbaciones eléctricas que puedan afectar el desempeño de los equipos y la estabilidad del sistema.
- Analizar el impacto de los armónicos en los equipos eléctricos, especialmente en motores, variadores de velocidad y sistemas de control.
- Proponer soluciones para la mitigación de los armónicos, incluyendo la implementación de filtros de armónicos y posibles modificaciones en las conexiones eléctricas.
- Garantizar que las acciones correctivas propuestas cumplan con las normativas establecidas, mejorando la eficiencia energética y reduciendo el impacto de las perturbaciones en los procesos productivos.

III. MARCO TEÓRICO

Voltaje

El voltaje, también conocido como tensión eléctrica, es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. Representa la fuerza que impulsa los electrones a través de un conductor y se mide en voltios (V). En sistemas eléctricos, el voltaje puede ser monofásico o trifásico, dependiendo de la topología del sistema de distribución. La tensión alterna (AC) es la forma más común en aplicaciones industriales, donde su valor varía sinusoidalmente con el tiempo. [[3]]

Corriente

La corriente eléctrica es el flujo de carga eléctrica a través de un conductor en respuesta a la existencia de un voltaje aplicado. Se mide en amperios (A) y su magnitud depende del tipo de carga conectada al sistema. En corriente alterna, al igual que el voltaje, la corriente cambia su dirección de forma periódica. La interacción entre corriente y voltaje es fundamental para la transferencia de energía en sistemas eléctricos. [[3]]

Forma de onda y corriente alterna (AC)

La forma de onda representa la variación de una magnitud eléctrica (como voltaje o corriente) respecto al tiempo. La forma de onda más común y deseada en sistemas de potencia es la onda sinusoidal, que describe cómo varía periódicamente el voltaje o la corriente en un sistema de corriente alterna (AC). [[3]], [[5]]

La corriente alterna es aquella en la que la dirección del flujo de corriente y la polaridad del voltaje cambian cíclicamente. En la mayoría de los sistemas eléctricos industriales y comerciales, esta variación se da a una frecuencia estándar de 50 Hz o 60 Hz.

Potencia eléctrica

La potencia eléctrica representa la tasa a la cual se transfiere o consume energía en un sistema. En corriente alterna, la potencia total se compone de tres componentes fundamentales [[3]]:

- **Potencia activa (P):** Es la potencia real consumida por los dispositivos eléctricos para realizar trabajo útil (como accionar un motor o iluminar una lámpara). Se mide en vatios (W) o kilovatios (kW) y se calcula como:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad (1)$$

- **Potencia reactiva (Q):** Es la potencia asociada al almacenamiento y liberación cíclica de energía en elementos inductivos o capacitivos, como motores y transformadores. No realiza trabajo útil, pero sí influye en el dimensionamiento del sistema. Se mide en voltamperios reactivos (VAR) y se calcula como:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad (2)$$

- **Potencia aparente (S):** Es la combinación vectorial de la potencia activa y reactiva. Representa la potencia total suministrada por el sistema. Se mide en voltamperios (VA) y se calcula mediante:

$$S = V \cdot I \quad (3)$$

Factor de potencia (FP)

El factor de potencia (FP) es una medida del grado de eficiencia con el que un sistema eléctrico convierte la energía eléctrica suministrada en trabajo útil. [[3]] Se define como la relación entre la potencia activa (P), que realiza trabajo, y la potencia aparente (S), que representa la combinación de potencia activa y reactiva presentes en el sistema:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (4)$$

En sistemas sinusoidales y balanceados, el factor de potencia coincide con el coseno del ángulo de fase ($\cos \phi$) entre la tensión y la corriente, y se relaciona únicamente con la

potencia reactiva:

$$FP = \cos \phi \quad (5)$$

Sin embargo, en sistemas no sinusoidales, como aquellos con presencia de armónicos, esta relación ya no es válida por sí sola. En estos casos, el FP se ve afectado también por la distorsión armónica de la corriente, y debe considerarse como el producto de dos componente:

$$FP = \cos \phi \cdot DF \quad (6)$$

Donde $\cos \phi$ es el factor de desplazamiento, asociado al ángulo entre la componente fundamental de tensión y corriente, y "DF" es el factor de distorsión, que representa el efecto de los armónicos sobre la forma de la corriente.

Sistema trifásico

Un sistema trifásico es un conjunto de tres fuentes de tensión alterna que operan a la misma frecuencia, con igual magnitud eficaz y un desfase angular constante de 120° eléctricos entre cada par de fases. Las tres señales sinusoidales están desfasadas de forma secuencial, y forman un sistema cíclicamente simétrico como se observa en la figura. [[3]][[5]], [[8]], [[9]]

Las tensiones de fase se representan como:

$$v_A(t) = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$v_B(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (8)$$

$$v_C(t) = V_m \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (9)$$

Armónicos

Los armónicos son componentes de frecuencia múltiple entera de la frecuencia fundamental de una señal periódica. En sistemas eléctricos de corriente alterna (AC), la frecuencia fundamental es generalmente de 50 o 60 Hz. Si una señal no es perfectamente sinusoidal, puede representarse matemáticamente como una suma de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, amplitudes y fases, a través de la serie de Fourier. Un armónico de orden n tiene una frecuencia igual a $n \cdot f_1$, donde f_1 es la frecuencia fundamental. [[1]], [[10]], [[11]] LA

presencia de armónicos produce distorsión de la forma de onda, generando múltiples efectos adversos sobre los equipos eléctricos.

La Figura 1, presenta un ejemplo gráfico de cómo un armónico específico contribuye a la distorsión de la forma de onda de corriente en un sistema eléctrico. En esta ilustración se comparan tres señales: la componente fundamental (60 Hz), la componente de quinto armónico (300 Hz) y la forma de onda distorsionada resultante de la suma de ambas.

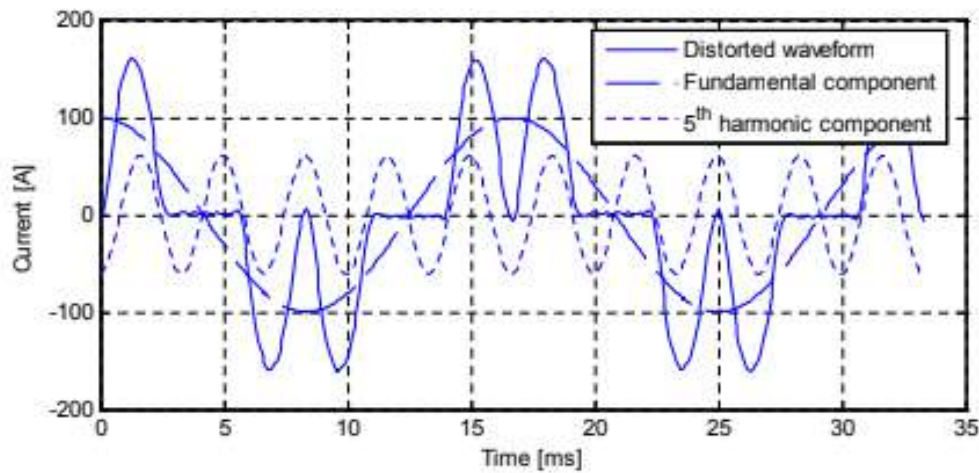


Fig. 1. Forma de onda de corriente distorsionada típica en sistemas de energía eléctrica [[1]]

THD (Total Harmonic Distortion)

Distorsión armónica total expresada como porcentaje de la frecuencia fundamental. Conceptualmente, representa el porcentaje de contenido armónico presente en una señal en comparación con su forma sinusoidal ideal. Este valor se obtiene a partir de una única medición instantánea, por lo que refleja la condición de distorsión **en el momento específico del análisis**. La THD es útil para caracterizar la forma de onda, pero puede sobreestimar la severidad de la distorsión cuando la carga operativa es baja. [[2]]

TDD (Total Demand Distortion)

Distorsión total de la demanda expresada como porcentaje de la corriente de carga de demanda máxima. La TDD relaciona el contenido armónico con la corriente de carga

máxima (IL) registrada en condiciones normales de operación. Es decir, la TDD cuantifica la distorsión en función de la capacidad de carga real del sistema, permitiendo una evaluación más representativa y consistente del impacto de los armónicos a lo largo del tiempo. [[2]]

Carga no lineal

Una carga no lineal es aquella cuyo comportamiento eléctrico no sigue la ley de Ohm de forma constante, es decir, la corriente que consume no es proporcional ni está en fase con la tensión aplicada. En estas cargas, la relación entre voltaje y corriente no es lineal, y como resultado, la corriente que absorben no tiene forma sinusoidal, incluso si la tensión que se les aplica sí lo es. [[11]], [[12]], [[13]]

Esta distorsión de la corriente da lugar a la generación de armónicos, que se propagan por el sistema eléctrico y afectan tanto a las propias cargas como a otros equipos conectados.

Desde el punto de vista de Fourier, la corriente de una carga no lineal se puede expresar como la suma de una componente fundamental [[1]], [[3]], [[14]] (misma frecuencia que la tensión) y un conjunto de componentes armónicas de mayor frecuencia:

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (10)$$

siendo:

- I_1 es la componente fundamental,
- I_n son las componentes armónicas de orden n ,
- ω es la frecuencia angular de la fundamental,
- θ_n es la fase del armónico n .

Estas cargas introducen armónicos que afectan la forma de onda de la corriente, elevan el THD, generan pérdidas adicionales, reducen el factor de potencia y pueden causar sobrecalentamientos en transformadores, conductores y motores.

La Figura 2, muestra el comportamiento típico de una carga no lineal basada en electrónica de potencia, específicamente un rectificador trifásico de 6 pulsos, el cual repre-

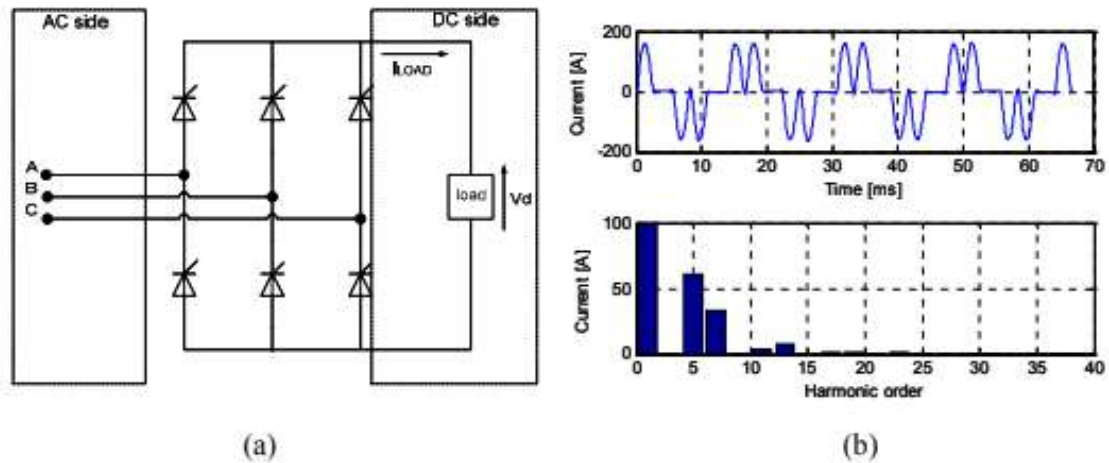


Fig. 2. Rectificación trifásica: (a) Puente de tiristores de 6 pulsos y (b) Corriente CA y espectro de corriente [[1]]

senta una de las principales fuentes de generación de armónicos en sistemas eléctricos industriales. En la parte (a) se observa el diagrama funcional de un puente rectificador trifásico no controlado, compuesto por seis diodos conectados entre el lado de corriente alterna (AC) y el lado de corriente continua (DC). Este tipo de topología es ampliamente utilizada para alimentar cargas de corriente directa a partir de una red trifásica. Sin embargo, durante el proceso de rectificación, los diodos conmutan en función de la tensión de línea, produciendo una forma de onda de corriente altamente distorsionada en el lado AC. La parte (b) de la figura presenta, en la parte superior, la forma de onda de la corriente de línea en el dominio del tiempo, y en la parte inferior, su espectro armónico correspondiente. Se evidencia claramente que la corriente no tiene forma sinusoidal y contiene múltiples componentes armónicas.

Mediciones de armónicos de tiempo muy corto

La evaluación de armónicos en intervalos de tiempo muy cortos se realiza utilizando una agregación de 15 ventanas consecutivas de 12 ciclos para sistemas de 60 Hz (o de 10 ciclos para 50 Hz), lo que corresponde aproximadamente a 3 segundos. En cada ventana se calculan los componentes individuales de frecuencia, y estos se agrupan mediante un cálculo basado en el valor cuadrático medio (rms), según la ecuación: [[2]]

$$F_{n,vs} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F_{n,i}^2} \quad (11)$$

donde:

- $F_{n,i}$ es el valor rms del armónico de orden n en la i -ésima ventana,
- el subíndice “vs” indica que corresponde a una medición de tiempo “muy corto”.

Mediciones de armónicos de corto tiempo

Las mediciones de armónicos de corto tiempo se obtienen a partir de la agregación de 200 valores consecutivos de armónicos de tiempo muy corto, cubriendo un intervalo total de aproximadamente 10 minutos. Al igual que en el caso anterior, se utiliza un cálculo de valor rms para determinar el resultado global, de acuerdo con la ecuación: [[2]]

$$F_{n,s} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F_{n,i}^2} \quad (12)$$

donde:

PCC (Point of Common Coupling)

Es el punto del sistema eléctrico donde una instalación (por ejemplo, una industria o usuario final) se conecta a la red de suministro de energía eléctrica, y donde esa conexión puede ser compartida con otras cargas o usuarios. [[2]]

Límites de distorsión armónica

La norma IEEE 519-2022 establece límites máximos permisibles de distorsión armónica para corriente y tensión, los cuales deben verificarse en el Punto Común de Conexión (PCC). Estos límites se basan en el principio de que, al controlar la inyección de corrientes armónicas por parte de los usuarios, se puede mantener la distorsión de tensión en niveles aceptables para todo el sistema. [[2]]

Los límites no aplican a equipos individuales ni a puntos internos de una instalación, donde la distorsión puede ser mayor por efectos de resonancia, diversidad de cargas o acumulación local de armónicos. El control debe enfocarse en el PCC, como frontera entre la red pública y el usuario, para garantizar la calidad global de la energía. [[2]]

- **Límites de distorsión de voltaje según IEEE 519-2022** Estos límites se expresan como porcentaje respecto a la tensión nominal y se aplican a armónicos de hasta el orden 50. Para verificar el cumplimiento, la norma considera dos criterios estadísticos: El percentil 99 diario de intervalos de 3 segundos no debe superar 1,5 veces el valor de la tabla. El percentil 95 semanal de intervalos de 10 minutos debe ser igual o menor al valor de la tabla. [[2]] La Tabla 1 (Figura 3) muestra los límites máximos permitidos tanto para armónicos individuales como para la distorsión armónica total (THD), según el nivel de tensión en el PCC. A mayor nivel de tensión, menores son los límites permitidos, debido a la sensibilidad del sistema eléctrico y su mayor alcance sobre otros usuarios conectados. [[2]]

Table 1—Voltage distortion limits

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

^aHigh-voltage systems are allowed to have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects are found to be attenuated at points in the network where future users may be connected.

Fig. 3. Límite de distorsión armónica de voltaje. [[2]]

- **Límites de distorsión de corriente según IEEE 519- 2022** La norma IEEE 519-2022 establece límites máximos para la distorsión armónica de corriente en sistemas cuya tensión nominal se encuentra entre 120V y 69kV, aplicables específicamente en el Punto Común de Conexión (PCC). Dichos límites no están destinados a evaluar cargas individuales, sino que tienen como objetivo controlar el comportamiento armónico global de la instalación

Table 2—Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

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

Fig. 4. Límite de distorsión armónica de corriente [[2]]

cuando esta inyecta distorsión hacia la red. [[2]] La evaluación de cumplimiento se basa en mediciones estadísticas, considerando tres criterios: el percentil 99 diario de intervalos de 3 segundos no debe superar el doble de los valores permitidos; el percentil 99 semanal de intervalos de 10 minutos debe ser inferior a 1,5 veces los valores base; y el percentil 95 semanal de 10 minutos debe estar dentro de los límites establecidos. Todos los valores se expresan como porcentaje de la corriente de carga máxima demandada (IL) en condiciones normales de operación.

La Tabla 2 (Figura 4) resume los límites de distorsión armónica permitidos según la relación entre la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la corriente de carga (IL). A mayor relación I_{sc}/IL , es decir, mayor robustez del sistema en el punto de conexión, se permiten valores más altos de distorsión. La tabla establece límites diferenciados para armónicos individuales (hasta el orden 50), armónicos de baja y alta frecuencia, y también especifica un límite para la distorsión total de corriente (TDD).

IEEE C57.110-2018 (Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents)

Establece los lineamientos para determinar la capacidad de carga de los transformadores en presencia de corrientes no sinusoidales generadas por cargas no lineales. [[4]]

Esta norma reconoce que las corrientes armónicas elevan significativamente las pérdidas térmicas en los transformadores, tanto en el cobre como en el núcleo, debido a fenómenos

como el efecto Joule y las corrientes de Foucault. Como consecuencia, los transformadores deben ser derateados, es decir, operar por debajo de su capacidad nominal, para evitar sobrecalentamiento y deterioro prematuro.

Para cuantificar este impacto, la norma introduce el concepto de Factor de Pérdida Armónica (Harmonic Loss Factor, HLF), que combina los efectos térmicos de los armónicos sobre los devanados. El HLF se utiliza para ajustar la capacidad de carga del transformador bajo condiciones reales de operación con contenido armónico.

FHL(Factor de pérdida armónica)

Coefficiente definido en la norma *IEEE C57.110-2018*, el cual permite cuantificar el incremento relativo de las pérdidas por corrientes de Foucault en los devanados de un transformador cuando se suministran corrientes con contenido armónico. [[4]]

Este factor se expresa como el cociente entre las pérdidas por corrientes de Foucault totales bajo condiciones armónicas (P_{EC}) y las pérdidas que existirían solo con la componente fundamental (P_{EC-O}):

$$FHL = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (13)$$

Donde:

- I_h es la corriente RMS del armónico de orden h ,
- I_1 es la corriente RMS de la componente fundamental,
- h es el número de orden armónico.

Un valor de $FHL > 1$ indica que los armónicos están provocando un incremento significativo en las pérdidas por corrientes parásitas. Por lo tanto, el FHL es un parámetro clave para determinar el *derating* térmico necesario del transformador bajo condiciones de carga no lineal.

Factor K

El **Factor K** es un índice que representa la capacidad térmica de un transformador para manejar corrientes no sinusoidales con contenido armónico. Este valor considera el aumento de las pérdidas térmicas provocadas por armónicos, especialmente las pérdidas por corrientes de Foucault y el efecto piel en los devanados. [[4]]

El cálculo del Factor K se realiza mediante la siguiente expresión:

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \cdot n^2 \quad (14)$$

Donde:

- I_n es la corriente RMS del armónico de orden n ,
- I_1 es la corriente RMS de la componente fundamental,
- n es el número de orden armónico.

Un valor alto de K indica que el transformador está expuesto a corrientes armónicas significativas, lo que puede requerir el uso de transformadores diseñados específicamente con una clasificación K -factor adecuada (por ejemplo, K-4, K-13, K-20), según la severidad de la distorsión.

Filtro de armónicos

Dispositivo utilizado en sistemas eléctricos para atenuar o eliminar componentes de frecuencia armónica generadas por cargas no lineales. Su función es mejorar la calidad de la energía eléctrica al evitar que las corrientes armónicas circulen por la red, reduciendo así distorsiones, sobrecalentamientos y pérdidas. Existen diferentes tipos de filtros, clasificados principalmente en: [[15]]

- **Filtro pasivo** Un **filtro pasivo** Se compone de elementos pasivos –resistencia (R), inductancia (L) y capacitancia (C)–, dispuestos generalmente en derivación (shunt) y sintonizados a una frecuencia armónica específica. Su función es desviar los armónicos hacia tierra o hacia un banco de absorción, impidiendo que estos circulen por el sistema. [[16]][[15]]

El filtro pasivo sintonizado más común se diseña para un armónico de orden h , utilizando la siguiente relación de resonancia entre los componentes:

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (15)$$

donde:

f_h es la frecuencia del armónico objetivo (Hz), L es la inductancia del filtro (H), C es la capacitancia del filtro (F).

Los filtros pasivos son económicos, robustos y efectivos para armónicos específicos. Sin embargo, su desempeño depende de la impedancia del sistema, y pueden ser sensibles a condiciones de resonancia. [[14]]

- **Filtro activo**

Un filtro activo es un equipo basado en electrónica de potencia que mide los armónicos presentes en el sistema y genera una corriente de compensación igual en magnitud pero de fase opuesta. Este principio de inyección activa permite cancelar dinámicamente múltiples armónicos, adaptándose a condiciones variables de carga. [[17]]

A diferencia de los filtros pasivos, el filtro activo no necesita sintonización específica y es capaz de tratar varios órdenes de armónicos simultáneamente. Su dimensionamiento se basa en la corriente armónica máxima que debe compensar:

$$I_{\text{filtro}} \geq \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (16)$$

donde:

I_{filtro} es la corriente nominal del filtro activo, I_h es la corriente RMS del armónico de orden h .

Los filtros activos ofrecen mayor flexibilidad y precisión en la mitigación armónica, pero implican un costo mayor y requieren electrónica especializada. [[13]], [[18]]

IEEE Std 1531-2020 (Guide for Application and Specification of Harmonic Filters)

Documento técnico que proporciona recomendaciones para el diseño, especificación, instalación y operación de filtros de armónicos, con énfasis en filtros pasivos de derivación (shunt) utilizados en sistemas de potencia con presencia de cargas no lineales. Esta norma

no establece límites de distorsión (como lo hace la IEEE 519), sino que actúa como una guía práctica de aplicación para asegurar que los filtros seleccionados sean adecuados para reducir los armónicos hasta niveles compatibles con las normas de calidad de energía. Incluye criterios de selección como: Identificación de órdenes armónicos predominantes, evaluación del contenido armónico esperado, métodos para calcular la impedancia del filtro, recomendaciones para evitar resonancia entre el filtro y la red. Además, la norma considera aspectos como la coordinación con sistemas de compensación de potencia reactiva, el efecto sobre el factor de potencia, la ubicación óptima del filtro y las condiciones bajo las cuales el filtro podría amplificar en lugar de mitigar los armónicos si no se diseña adecuadamente. La IEEE 1531 también establece parámetros mínimos de desempeño, durabilidad y seguridad que deben tenerse en cuenta al especificar filtros pasivos en aplicaciones industriales, comerciales o institucionales. [[15]]

IV. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y aplicado, combinando trabajo de campo, análisis de datos eléctricos y revisión normativa. El objetivo principal fue identificar la presencia de armónicos y otras perturbaciones que comprometan la calidad de la energía eléctrica en las instalaciones de la Compañía de Empaques, con especial atención a los equipos que presentan fallas o síntomas operativos que pudieran estar relacionados con estos fenómenos.

Para la recolección de datos fue indispensable el acompañamiento de personal técnico capacitado, responsable de realizar las conexiones y desconexiones seguras del analizador de redes trifásico utilizado en las mediciones. A continuación, se describen las etapas que conforman la metodología de trabajo implementada:

A. 1. Diagnóstico preliminar del sistema eléctrico

Se llevó a cabo una inspección visual y documental de las instalaciones eléctricas de la Compañía de Empaques, con el objetivo de identificar:

- Equipos sensibles a perturbaciones eléctricas, como motores trifásicos, variadores de velocidad, fuentes conmutadas, UPS y sistemas de control electrónico.
- Cargas no lineales presentes en el sistema, potenciales generadoras de armónicos.
- Cargas o equipos que presenten síntomas operativos anómalos —como sobrecalentamiento, fallos intermitentes, disparos inesperados de protecciones, daño de equipos o ruidos anormales— que puedan indicar afectaciones relacionadas con la presencia de armónicos.

B. 2. Selección de puntos de medición

Con base en el diagnóstico preliminar, se identificaron los puntos más críticos del sistema eléctrico, priorizando aquellos donde se observaron síntomas operativos anómalos o mayor susceptibilidad a perturbaciones. Esta selección se fundamentó en la inspección inicial y en la experiencia operativa del personal técnico.

Los puntos seleccionados para la medición fueron:

- **Transformador de 48 kVA (baja-baja)** que alimenta la máquina *Enconadora Starex 3* que se observa en la Fig. 5, Esta máquina es la encargada de embobinar los carretes de hilo, los cuales constituyen la materia prima utilizada en la elaboración de los sacos, cuenta con 280 cabezales de bobinado en promedio Fig. 6. La Enconadora ha presentado daños recurrentes en los variadores de velocidad, posiblemente asociados a la presencia de armónicos en la red eléctrica.



Fig. 5. Enconadora Starex 3. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 6. Cabezales de bobinado Fuente: Elaboración propia.

- **Autotransformador de 150 kVA (baja-baja)** ubicado en la subestación 6, encargado de alimentar diversas cargas, en su mayoría telares circulares Fig. 7, Estos equipos

están conformados por múltiples motores, cada uno de los cuales opera mediante un variador de velocidad. Estos variadores representan cargas no lineales que distorsionan la forma de onda de corriente y tensión, generando así armónicos eléctricos. La presencia de estos armónicos altera la calidad de la energía y puede ocasionar diversos problemas en los equipos eléctricos asociados. Uno de los efectos más comunes de esta distorsión es el sobrecalentamiento en los devanados del autotransformador que alimenta el sistema. Este comportamiento puede deberse a las pérdidas adicionales inducidas por los armónicos, las cuales incrementan la disipación de calor en el núcleo y en los conductores, afectando negativamente el rendimiento del transformador y reduciendo su vida útil.



Fig. 7. Telares circulares Fuente: Elaboración propia.

C. 3. Revisión documental y normativa

En esta etapa se llevó a cabo una revisión técnica y normativa con el fin de establecer los límites permisibles de distorsión armónica y otras perturbaciones eléctricas que puedan afectar la calidad de la energía. Esta revisión también permitió evaluar si la empresa cumple con la normativa vigente y verificar, de forma cuantitativa, los efectos observados en el sistema eléctrico que podrían estar asociados a la presencia de armónicos. Este análisis normativo fue fundamental para asegurar que el estudio realizado en la Compañía de Empaques se encuentre alineado con los criterios técnicos y regulatorios establecidos tanto a nivel nacional como internacional.

A continuación, se presentan las normas técnicas aplicadas al proyecto, estas normas han sido seleccionadas por su aplicabilidad directa al análisis de calidad de energía, equipos eléctricos, transformadores y sistemas con cargas no lineales, asegurando así el cumplimiento de criterios de seguridad, eficiencia y fiabilidad operativa.

- IEEE Std 519-2022 (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems)
- IEEE Std C57.110-2018 (Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents)
- IEEE Std 1531-2020 (Guide for Application and Specification of Harmonic Filters)

D. 4. Instalación del analizador de redes y recolección de datos eléctricos

Para el análisis de calidad de la energía, se realizaron mediciones en los puntos previamente seleccionados, utilizando un analizador de redes trifásico Metrel PowerQ MI 2492, calibrado y certificado de la Fig. 8. Este equipo permitió registrar múltiples parámetros eléctricos con alta precisión.



Fig. 8. Analizador de redes Metrel PowerQ MI 2492 Tomado de: pagina web Metrel.

Las mediciones se realizaron durante los periodos de corto y muy corto plazo, tal como lo establece la norma IEEE 519-2022, asegurando la captura de información representativa del comportamiento eléctrico en distintas condiciones operativas.

Las variables eléctricas registradas incluyeron:

- Tensión y corriente RMS por fase.
- Distorsión armónica total (THD) de corriente y tensión.
- Espectro armónico hasta el orden 50.
- Potencia activa, reactiva y aparente.
- Frecuencia del sistema.
- Desbalance de tensión y corriente entre fases.
- Factor de potencia.

Las mediciones se efectuaron durante la operación normal del sistema, con el fin de capturar comportamientos reales en condiciones típicas de carga. En algunos casos, se extendieron los tiempos de monitoreo para incluir momentos de arranque de equipos o turnos de alta demanda.

La instalación y desconexión del analizador fue realizada por personal técnico autorizado, garantizando la seguridad operativa y la fiabilidad de los datos. Toda la información

recolectada fue almacenada y posteriormente procesada para su análisis comparativo frente a los límites establecidos por la normatividad vigente.

La Fig. 9 muestra el diagrama unifilar del transformador de 48 kVA que alimenta la máquina Enconadora Starex 3, mientras que la Fig. 10 corresponde al diagrama unifilar del autotransformador de 150 kVA ubicado en la subestación 6. En ambos diagramas se indica la ubicación exacta del punto de medición, lo cual facilita la visualización de su conexión dentro del sistema eléctrico y respalda la elección técnica de dichos puntos como representativos para el análisis.

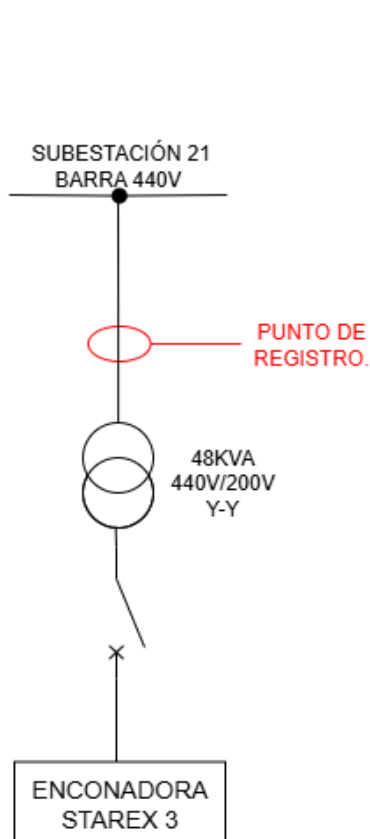


Fig. 9. Punto de registro en la Enconadora Starex 3.

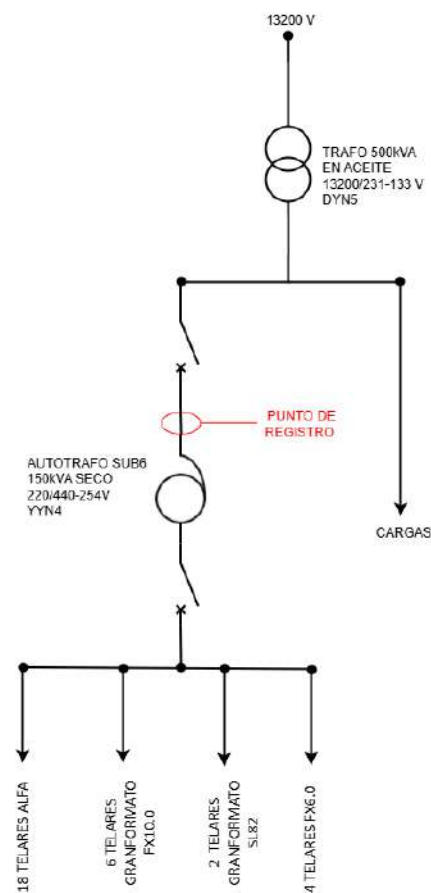


Fig. 10. Punto de registro en el autotransformador de 150 kVA.

Las fechas de inicio y finalización de la toma de registro en los dos puntos de medición se muestran en la tabla 1.

Punto de registro	Fecha y hora inicio [dd.mm.aaaa / hh.mm.ss]	Fecha y hora final [dd.mm.aaaa / hh.mm.ss]	Intervalo de tiempo de medición
Autotransformador subestación 6	28.03.2025 / 15:27:58	29.03.2025 / 15:53:01	3 Segundos
Autotransformador subestación 6	27.02.2025 / 15:20:00	06.03.2025 / 15:48:39	10 Minutos
Transformador Enconadora Starex 3	08.02.2025 / 12:46:58	09.02.2025 / 13:26:04	3 Segundos
Transformador Enconadora Starex 3	31.01.2025 / 10:07:58	07.02.2025 / 14:08:10	10 Minutos

TABLA I
FECHA Y HORA DE LOS REGISTROS

E. 5. Verificación normativa y evaluación cuantitativa de efectos

Una vez obtenidos los registros eléctricos de los puntos monitoreados, se realizó una comparación detallada entre los valores medidos y los límites establecidos por las normas técnicas aplicables, especialmente IEEE 519-2022 y IEEE C57.110-2018.

El análisis se enfocó en determinar si la red eléctrica de la Compañía de Empaques cumple con los niveles permitidos de distorsión armónica total (THD) y de componentes individuales por orden de armónico, tanto en tensión como en corriente. Además, se verificaron condiciones de desbalance de fases, factor de potencia y frecuencia del sistema.

Adicionalmente, se realizó una evaluación cuantitativa de los efectos que los niveles de distorsión registrados pueden generar sobre algunos elementos del sistema eléctrico. Particularmente, se calculó el Factor K para los transformadores involucrados, con base en la metodología propuesta por la norma IEEE C57.110-2018, con el fin de estimar la reducción de su capacidad de carga y las pérdidas térmicas adicionales asociadas a la circulación de armónicos.

Este proceso permitió establecer, de manera objetiva y técnica, si el sistema eléctrico monitoreado cumple con las exigencias normativas vigentes y cuáles son los efectos eléctricos cuantificables que deben ser tenidos en cuenta para la posterior formulación de soluciones correctivas.

F. 6. Propuesta de soluciones técnicas

Con base en los resultados obtenidos durante el proceso de evaluación, en esta etapa se plantearon soluciones orientadas a mejorar la calidad de la energía eléctrica en los puntos críticos identificados. Estas propuestas fueron formuladas teniendo en cuenta los criterios técnicos establecidos por las normas consultadas y las condiciones reales de operación en la Compañía de Empaques.

Particularmente, la selección de soluciones como el uso de filtros de armónicos y otros mecanismos de compensación se realizó con base en las recomendaciones de las normas IEEE 519-2022, IEEE 1531-2020, IEC 61642, IEEE C57.110-2018 y en los lineamientos técnicos del libro *Modeling, Measurement and Mitigation of Power System Harmonics* de Alexandre Nassif.

La formulación de estas medidas consideró aspectos técnicos, económicos y de viabilidad operativa, con el fin de ofrecer alternativas adecuadas a las necesidades específicas del sistema eléctrico evaluado. Las soluciones propuestas constituyen un insumo clave para la toma de decisiones orientadas al cumplimiento normativo, la mejora en la confiabilidad del sistema y la mitigación de los efectos negativos asociados a la presencia de armónicos.

G. 7. Procesamiento y análisis de datos

Una vez recolectados los datos mediante el analizador de redes Metrel PowerQ MI 2492, se procedió con su exportación y procesamiento utilizando la herramienta Microsoft Excel. A partir de los archivos generados, se organizaron y depuraron las variables eléctricas más relevantes para el estudio, como los niveles de THD, espectros armónicos por orden, tensiones, corrientes, factor de potencia y frecuencias.

Con base en estos datos, se elaboraron tablas y gráficos comparativos que facilitaron la visualización del comportamiento eléctrico en cada punto de medición. Asimismo, se aplicaron fórmulas definidas por la norma IEEE C57.110-2018 para el cálculo del Factor K, con el fin de cuantificar los efectos térmicos asociados a la presencia de armónicos en los transformadores evaluados.

Este procesamiento de la información fue clave para sustentar la verificación del cumplimiento normativo y para fundamentar técnicamente la propuesta de medidas correctivas desarrolladas en las etapas siguientes.

V. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas en los puntos críticos previamente identificados, utilizando el analizador de redes *Metrel PowerQ MI 2492*. El objetivo principal fue evaluar la calidad de la energía eléctrica con énfasis en la presencia de armónicos, conforme a los lineamientos de la norma **IEEE 519-2022**.

Los puntos de medición analizados fueron:

- El transformador de 48 kVA que alimenta la máquina Enconadora Starex 3.
- El autotransformador de 150 kVA ubicado en la subestación 6.

La evaluación se llevó a cabo bajo dos ventanas de tiempo: el análisis en muy corto tiempo se realizó durante 24 horas con registros cada 3 segundos, y el análisis en corto tiempo se extendió a lo largo de 7 días, con intervalos de integración de 10 minutos. Este enfoque permitió obtener datos representativos del comportamiento eléctrico tanto en condiciones transitorias como en operación continua.

A. 1. Autotransformador de 150 kVA – Telares

En las Figuras 11, 12 y 13 se presentan los gráficos de barra correspondientes al análisis espectral de la tensión $V1$, $V2$ y $V3$ respectivamente medidos en el tiempo muy corto, donde se muestra el porcentaje de contenido armónico para cada orden individual, medido en cada una de las fases en configuración línea-neutro. Estos gráficos permiten identificar con precisión los órdenes armónicos predominantes y evaluar su contribución al nivel total de distorsión de la señal.

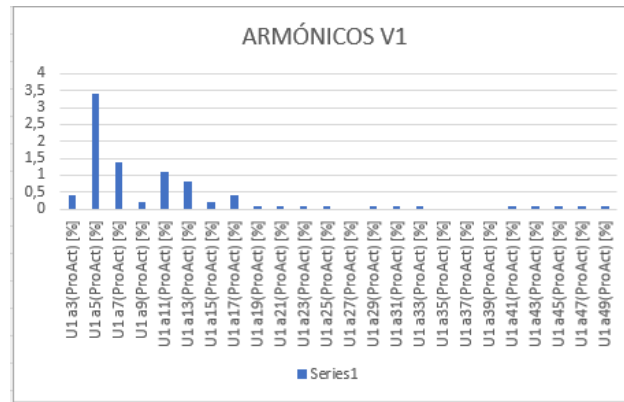


Fig. 11. Armónicos de voltaje V1 en el autotransformador de 150kVA , medición en tiempo muy corto

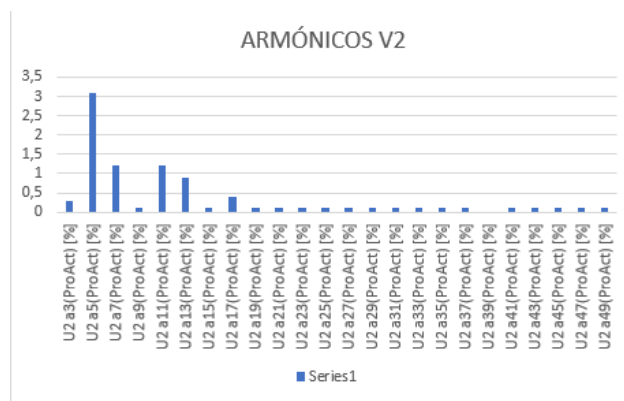


Fig. 12. Armónicos de voltaje V2 en el autotransformador de 150kVA , medición en tiempo muy corto

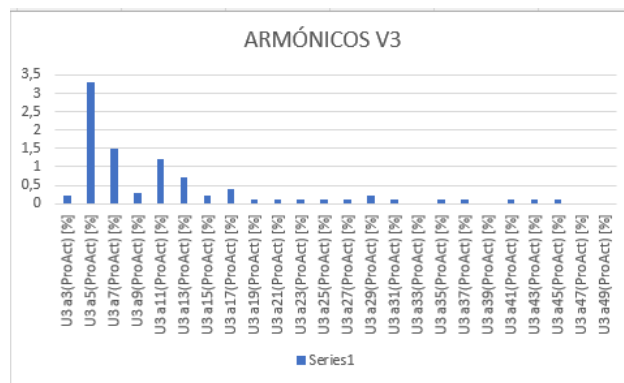


Fig. 13. Armónicos de voltaje V3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto

En las figuras 14 , 15 y 16 se presenta el gráfico de barras de las mediciones en el tiempo corto de los armónicos de voltaje línea neutro $V1$, $V2$ y $V3$ respectivamente.

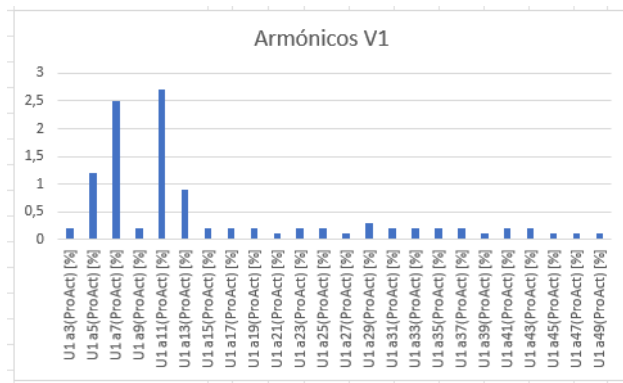


Fig. 14. Armónicos de voltaje V1 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto

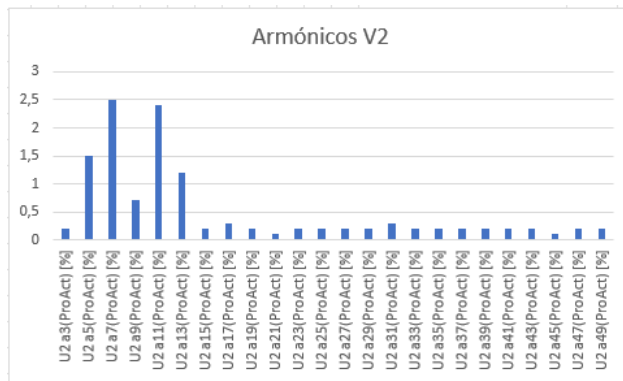


Fig. 15. Armónicos de voltaje V2 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto

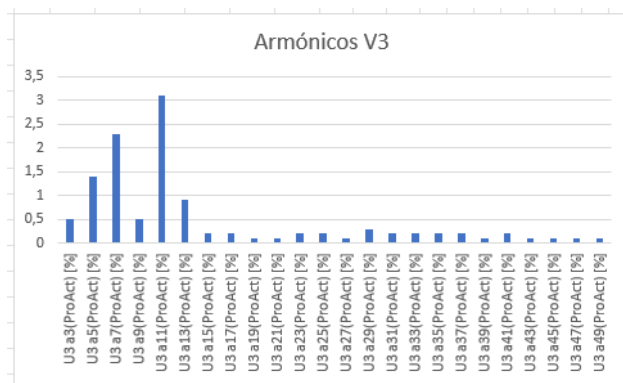


Fig. 16. Armónicos de voltaje V3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto

El porcentaje de THD medido tanto en el tiempo corto como en el tiempo muy corto se presenta en la Tabla III, Se observa que en el régimen de tiempo corto los valores de THD

superan el límite del 8% establecido por la norma IEEE 519-2022 para sistemas de baja tensión. Esta condición evidencia la necesidad de implementar medidas correctivas orientadas a reducir los niveles de distorsión armónica, con el objetivo de preservar la calidad del suministro eléctrico y prevenir posibles afectaciones en los equipos conectados. No obstante, como se muestra en las Figuras 17 y 18, al evaluar los límites individuales por cada orden armónico, se observa que ninguno de los armónicos presentes supera el 5%, valor máximo permitido por la norma para armónicos individuales. Esto sugiere que el incumplimiento del THD total está relacionado con la acumulación de múltiples armónicos de baja magnitud, más que con la presencia de armónicos dominantes de alta intensidad.

TABLA II
%THD DE TENSIÓN EN TIEMPO CORTO Y MUY CORTO PARA EL AUTOTRANSFORMADOR DE 150 KVA

	Tiempo corto (%)	Tiempo muy corto (%)
THD % V1	10.7	3.7
THD % V2	9.5	3.8
THD % V3	10.0	3.9

LÍMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE TIEMPO CORTO																								
LÍMITE	5																							
Grado de armonico [%]	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°	33°	35°	37°	39°	41°	43°	45°	47°	49°
L1	0,40	3,40	1,40	0,20	1,10	0,80	0,20	0,40	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
L2	0,30	3,10	1,20	0,10	1,20	0,90	0,10	0,40	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
L3	0,20	3,30	1,50	0,30	1,20	0,70	0,20	0,40	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10	0,00	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00

Fig. 17. Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden armónico en tiempo corto para cada fase

LÍMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE TIEMPO MUY CORTO																								
LÍMITE	5																							
Grado de armonico [%]	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°	33°	35°	37°	39°	41°	43°	45°	47°	49°
L1	0	1,2	2,5	0,2	2,6	0,9	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L2	0	1,4	2,5	0,6	2,4	1,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L3	1	1,4	2,2	0,5	3	0,9	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 18. Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden armónico en tiempo muy corto para cada fase

A continuación, se presentan los gráficos de barra correspondientes al contenido armónico de corriente, medido en las tres fases del autotransformador de 150kVA que alimenta los telares. Los datos fueron obtenidos en dos ventanas de análisis: tiempo muy corto (3s durante 24 horas) Figura 19, 20 y 21, y tiempo corto (10min durante 7 días) Figura 22, 23 y 24, conforme a la norma IEEE 519-2022. Cada gráfico muestra el porcentaje de corriente asociado a cada orden armónico, permitiendo visualizar claramente los armónicos predominantes en cada fase.

Determinación del cociente I_{sc}/I_L para aplicación de límites IEEE 519-2022 Para aplicar correctamente los límites de distorsión armónica de corriente establecidos por la norma IEEE 519-2022, es necesario calcular la relación entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto de conexión común (PCC) y la corriente máxima de carga medida durante las mediciones:

$$I_{sc} = 6560,80 \text{ A} \quad I_L = 328,04 \text{ A}$$

Por tanto, el cociente es:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{6560,80}{328,04} \approx 20$$

Este resultado ubica el sistema dentro de la categoría $I_{sc}/I_L < 20$, para la cual la IEEE 519-2022 establece límites más estrictos de distorsión armónica. En este caso, la distorsión armónica total de demanda (TDD) no debe exceder el **5 %**, y los armónicos individuales deben mantenerse por debajo de los porcentajes correspondientes especificados en la Tabla 2 (Figura 4) de dicha norma.

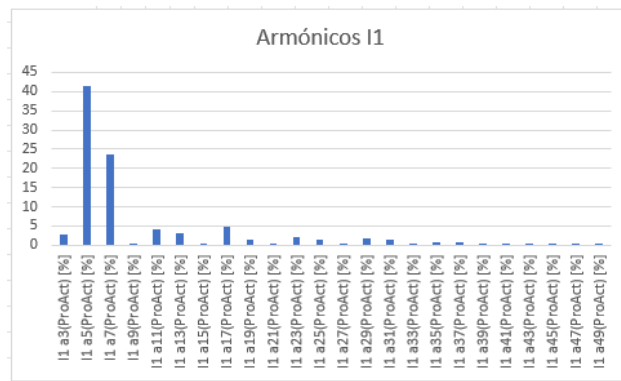


Fig. 19. Armónicos de corriente I1 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto

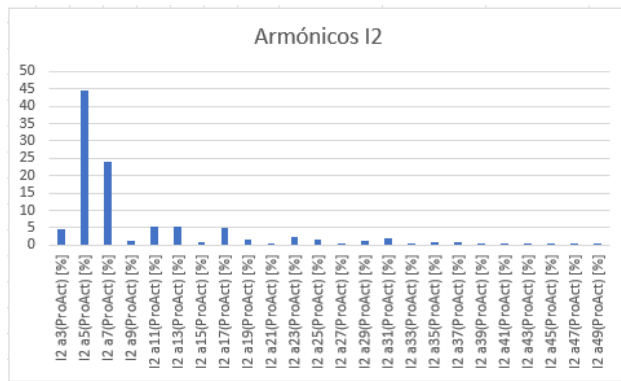


Fig. 20. Armónicos de corriente I2 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto

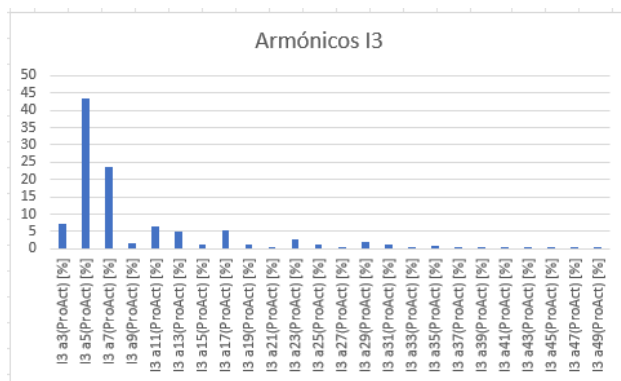


Fig. 21. Armónicos de corriente I3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo muy corto

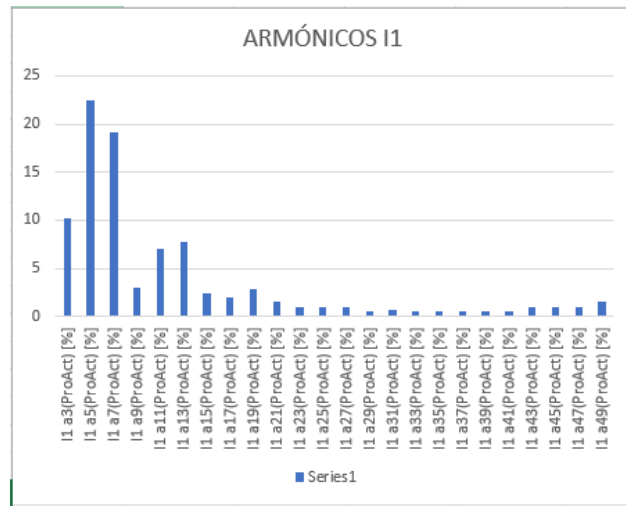


Fig. 22. Armónicos de corriente I1 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto

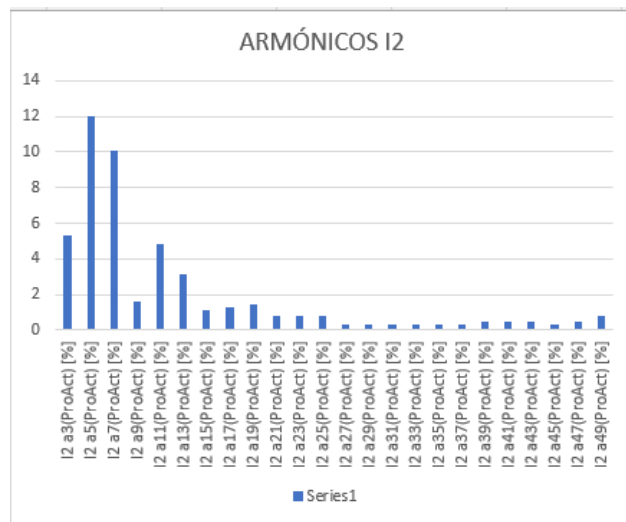


Fig. 23. Armónicos de corriente I2 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto

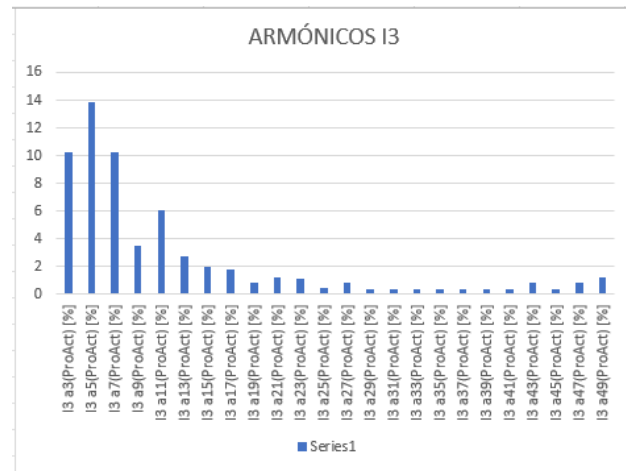


Fig. 24. Armónicos de corriente I3 en el autotransformador de 150kVA, medición en tiempo corto

En la figura se presentan los porcentaje de distorsión armónica de corriente por orden armónico en tiempo muy corto (Figura 25) y tiempo corto (Figura 26) para cada fase. Los resultados obtenidos para el autotransformador de 150 kVA evidencian niveles elevados de distorsión armónica de corriente tanto en el análisis de tiempo muy corto (3 segundos durante 24 horas) como en el análisis de tiempo corto (10 minutos durante 7 días). Según la norma **IEEE 519-2022** y dado que la relación $I_{sc}/I_L = 20$, se deben aplicar los límites más exigentes: un **TDD máximo del 5 %** y valores específicos para cada orden armónico individual.

Durante el análisis de tiempo muy corto, los valores de TDD registrados fueron de 37 % en L1, 39 % en L2 y 39 % en L3, superando ampliamente el límite normativo. Además, se evidenciaron múltiples incumplimientos en armónicos individuales, especialmente en los de orden 5, 7, 9 y 11, asociados comúnmente a cargas no lineales como variadores de velocidad. Este comportamiento indica la presencia de distorsiones significativas en periodos breves, probablemente relacionadas con picos de conmutación o arranques de equipos electrónicos.

En el análisis de tiempo corto, aunque se observó una reducción en los valores de TDD, estos continuaron superando el umbral permitido, alcanzando 13,41 % en L1, 10,42 % en L2 y 11,89 % en L3. En este caso, los armónicos de orden 5 y 7 también dominaron el espectro de distorsión, y aunque la mayoría de los armónicos de orden superior permanecieron dentro de

los límites establecidos, su acumulación contribuyó al exceso en el valor total de distorsión.

Estos resultados reflejan una condición sostenida de distorsión armónica que compromete la calidad de la energía eléctrica en este punto del sistema. La severidad del fenómeno y el incumplimiento continuo de los límites normativos evidencian la necesidad de implementar soluciones técnicas de mitigación, tales como filtros de armónicos pasivos o activos, ajustes en la configuración de cargas, o la utilización de transformadores con mayor capacidad de soportar componentes armónicas.

LÍMITES DE DISTORSION DE CORRIENTES TIEMPO MUY CORTO																									
Limite	7			3,5			2,5			1					0,5					8					
Grado de armonico [%]	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°	33°	35°	37°	39°	41°	43°	45°	47°	49°	TDD
L1	3	41	23	1	3,9	3	0,5	4,8	1,4	0,2	2,2	1,4	0,3	1,7	1,5	0,2	0,8	0,9	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	37
L2	5	44	24	1	5	5,4	0,8	4,8	1,6	0,2	2,3	1,7	0,3	1,4	1,8	0,4	0,7	0,9	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	39
L3	7	43	23	2	5,9	4,7	1,3	5,3	1	0,4	2,8	1,1	0,5	2,1	1,3	0,4	0,8	0,50	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	39

Fig. 25. Porcentaje de distorsión armónica de corriente por orden armónico en tiempo muy corto

LÍMITES DE DISTORSION DE CORRIENTES TIEMPO CORTO																									
Limite	7			3,5			2,5			1					0,5					8					
Grado de armonico [%]	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°	33°	35°	37°	39°	41°	43°	45°	47°	49°	TDD
L1	10	22,5	19,1	3	7	7,8	2,4	2	2,9	1,5	1	1	1	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1,5	13,41
L2	5,3	12	10,1	1,5	4,8	3,1	1,1	1,3	1,4	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,8	10,42
L3	10	13,9	10,2	3,5	6,1	2,7	2	1,8	0,8	1,2	1,1	0,5	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,4	0,8	1,2	11,89

Fig. 26. Porcentaje de distorsión armónica de corriente por orden armónico en tiempo corto

A continuación se presentan los datos, gráficos y cálculos necesarios para analizar la distorsión armónica de tensión en el transformador de 48kVA que alimenta la enconadora Starex 3. Este análisis se realizó conforme a los lineamientos de la norma IEEE 519-2022, considerando dos ventanas de tiempo: muy corto (3 segundos) y corto (10 minutos).

En las Figuras 27, 28 y 29 se muestran los diagramas de barra correspondientes al contenido armónico de tensión para cada fase durante el régimen de tiempo muy corto. Por su parte, las Figuras 30, 31 y 32 presentan los resultados obtenidos durante el tiempo corto.

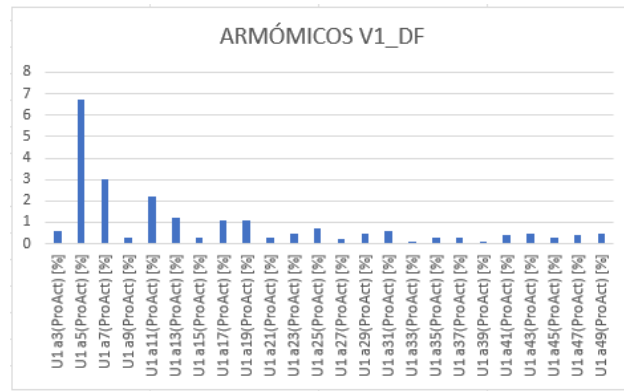


Fig. 27. Armónicos de voltaje V1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto

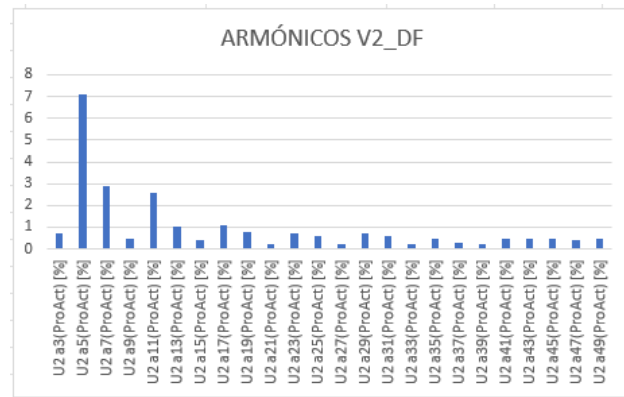


Fig. 28. Armónicos de voltaje V2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto

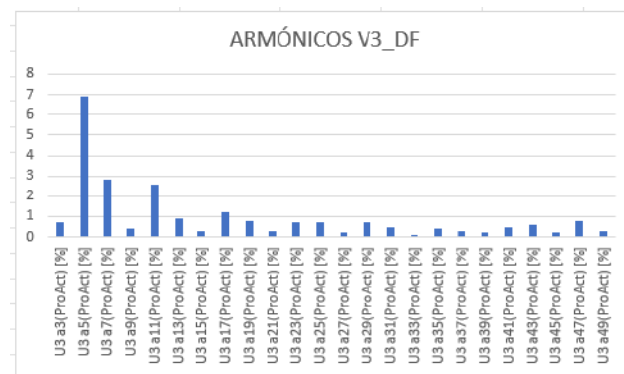


Fig. 29. Armónicos de voltaje V3 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto

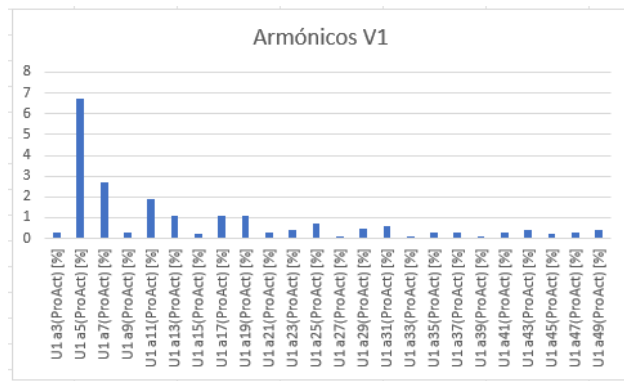


Fig. 30. Armónicos de voltaje V1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto

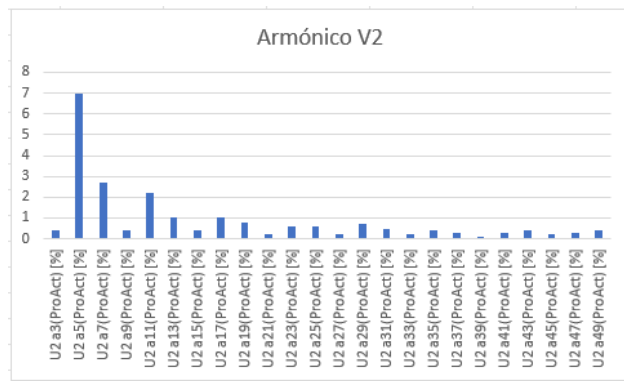


Fig. 31. Armónicos de voltaje V2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto

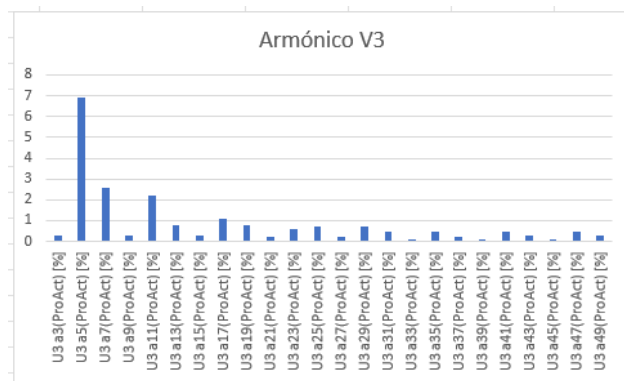


Fig. 32. Armónicos de voltaje V3 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto

El porcentaje de distorsión armónica total de tensión (THD %) medido en el transformador de 48 kVA que alimenta la enconadora *Starex 3*, fue registrado en dos intervalos de tiempo definidos por la norma IEEE 519-2022: tiempo muy corto (3 segundos) y tiempo corto (10 minutos). La Tabla III presenta los valores obtenidos para cada una de las tres fases. [[2]]

TABLA III
THD % DE TENSIÓN EN EL TRANSFORMADOR DE 48 KVA — ENCONADORA STAREX 3

Magnitud	Tiempo muy corto	Tiempo corto
THD % V1	7.4	7.6
THD % V2	7.7	7.9
THD % V3	7.5	7.7

Aunque los valores de THD se mantienen dentro del límite máximo del 8 % establecido para sistemas de baja tensión por la IEEE 519-2022, estos se aproximan de forma significativa al umbral permitido. Esta condición sugiere la necesidad de implementar medidas preventivas que aseguren la estabilidad del sistema y eviten el deterioro progresivo de los equipos sensibles conectados.

Para profundizar en el análisis, se evaluaron los niveles de distorsión armónica por orden individual en cada fase, los cuales se presentan en las Figuras 33 y 34. La primera corresponde a los datos registrados en tiempo muy corto y la segunda en tiempo corto. En el primer caso, se verifica que ninguno de los armónicos individuales supera el valor del 5 % permitido por la norma, lo que indica que el valor total de THD elevado no se debe a un único armónico dominante, sino a la suma de varios componentes de baja magnitud. En el segundo caso se evidencia un incremento en el porcentaje de armónicos en el grado 5, lo que sugiere estar generado por las cargas no lineales como los variadores de velocidad. También indica que el valor total de THD elevado no se debe a un único armónico dominante, sino a la suma de varios componentes de baja magnitud. [[2]]

LÍMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE TIEMPO MUY CORTO																								
LÍMITE	7,5																							
Grado de armonico [%]	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°	33°	35°	37°	39°	41°	43°	45°	47°	49°
L1	0,6	6,7	3	0,3	2,2	1,2	0,3	1,1	1,1	0,3	0,5	0,7	0,2	0,5	0,6	0,1	0,3	0,3	0,1	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5
L2	0,7	7,1	2,9	0,5	2,6	1	0,4	1,1	0,8	0,2	0,7	0,6	0,2	0,7	0,6	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5
L3	0,7	6,9	2,8	0,4	2,6	0,9	0,3	1,2	0,8	0,3	0,7	0,7	0,2	0,7	0,5	0,1	0,4	0,3	0,2	0,5	0,6	0,2	0,8	0,3

Fig. 33. Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo muy corto para cada fase

LÍMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE TIEMPO CORTO																								
LÍMITE	5																							
Grado de armonico [%]	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°	33°	35°	37°	39°	41°	43°	45°	47°	49°
L1	0,3	6,7	2,7	0,3	1,9	1,1	0,2	1,1	1,1	0,3	0,4	0,7	0,1	0,5	0,6	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
L2	0,4	7	2,7	0,4	2,2	1	0,4	1	0,8	0,2	0,6	0,6	0,2	0,7	0,5	0,2	0,4	0,3	0,1	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
L3	0,3	6,9	2,6	0,3	2,2	0,8	0,3	1,1	0,8	0,2	0,6	0,7	0,2	0,7	0,5	0,1	0,5	0,2	0,1	0,5	0,3	0,1	0,5	0,3

Fig. 34. Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo corto para cada fase

A continuación se presentan los gráficos de barras correspondientes a los armónicos de corriente medidos en el transformador de 48 kVA que alimenta la enconadora Starex 3. Las Figuras 35, 36 y 37 muestran los resultados obtenidos en el régimen de tiempo corto, mientras que las Figuras 38, 39 y 40 presentan los valores registrados en el régimen de tiempo muy corto.

Para evaluar el cumplimiento de los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022, se calcula la relación entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto de medición (I_{sc}) y la corriente de carga máxima demandada (I_L), tal como se muestra a continuación:

TABLA IV
CÁLCULO DE LA RELACIÓN I_{sc}/I_L EN EL TRANSFORMADOR DE 48 KVA

Parámetro	Valor
Potencia nominal	48 000 VA
Tensión nominal	220 V
Corriente de carga I_L	125,97 A
Impedancia ($Z\%$)	4 %
Corriente de cortocircuito I_{sc}	3149,18 A
Relación I_{sc}/I_L	25

De acuerdo con el valor de $\frac{I_{sc}}{I_L} = 25$, la instalación se encuentra dentro del rango de 20–50 definido por la norma, por lo que deben aplicarse los límites de distorsión armónica de corriente correspondientes a ese grupo en las Tablas de la IEEE 519-2022. Estos límites se usarán para verificar el cumplimiento normativo de los resultados obtenidos en las mediciones.

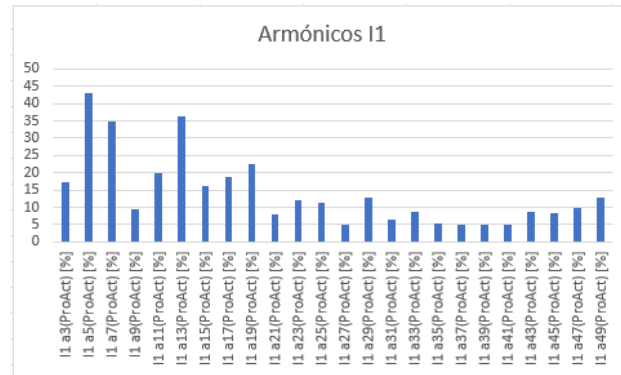


Fig. 35. Armónicos de corriente I1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto

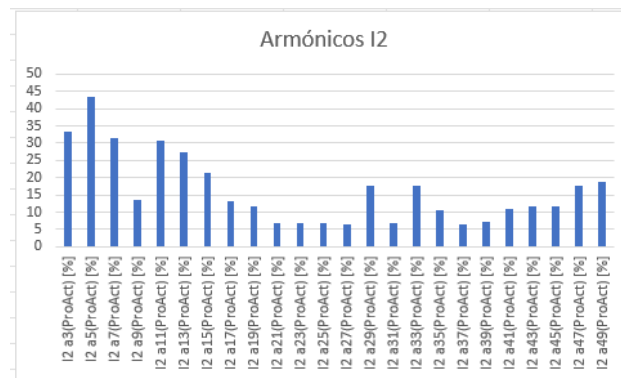


Fig. 36. Armónicos de corriente I2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto

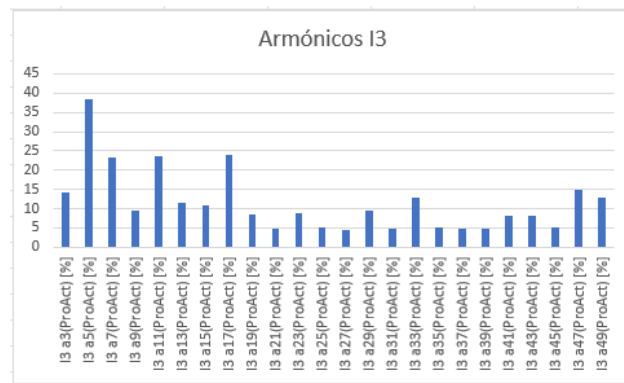


Fig. 37. Armónicos de corriente I3 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo corto

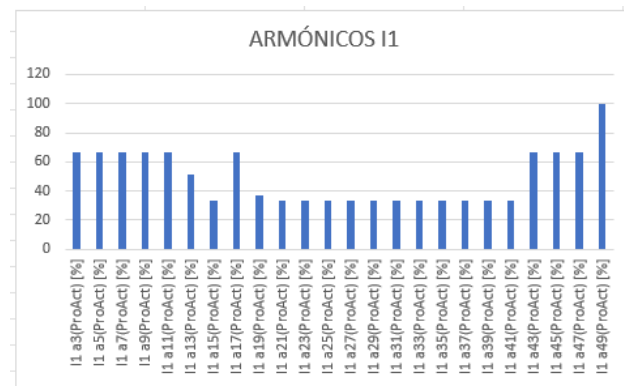


Fig. 38. Armónicos de corriente I1 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto

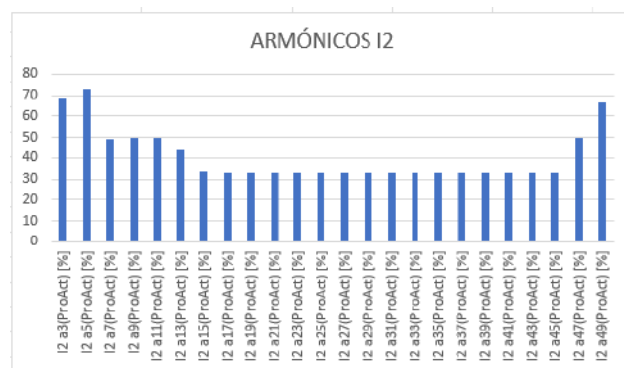


Fig. 39. Armónicos de corriente I2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto

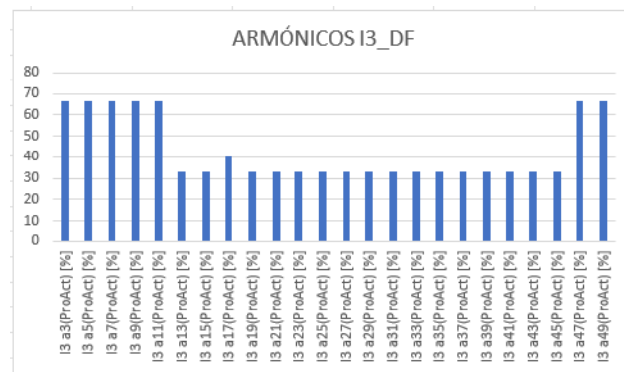


Fig. 40. Armónicos de corriente I2 en el transformador de 48kVA - Enconadora Starex 3, medición en tiempo muy corto

La Figura 41 y 42 presenta los niveles de distorsión armónica de corriente por orden armónico en cada fase del transformador de 48 kVA, durante el régimen de tiempo muy corto y tiempo corto respectivamente. Los resultados se comparan con los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022, considerando que la relación I_{sc}/I_L calculada previamente es igual a 25, por lo tanto, se aplica el conjunto de límites correspondiente al rango 20–50.

Al analizar los datos, se observa que múltiples componentes armónicos individuales superan ampliamente los valores permitidos. En particular, el 5^o armónico alcanza valores entre 40 % y 44 % para las tres fases (L1, L2 y L3), superando por más de seis veces el límite máximo de 7 %. De igual forma, el 7^o armónico se encuentra por encima del umbral en las tres fases, con porcentajes entre 23 % y 23.6 %.

El contenido armónico total de corriente (TDD) también excede significativamente el valor límite de 8 %. Se registran valores de 40.19 %, 46.41 % y 39.68 % para L1, L2 y L3 respectivamente. Estos niveles indican un grave incumplimiento normativo y sugieren una distorsión severa en la forma de onda de corriente, atribuida principalmente a la operación de cargas no lineales como variadores de velocidad.

Este escenario representa un riesgo para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y puede traducirse en sobrecalentamientos, pérdidas adicionales y deterioro de los equipos. Por lo tanto, resulta indispensable la implementación de medidas de mitigación, tales como filtros pasivos o activos, para reducir el contenido armónico y restablecer la calidad del su-

ministro eléctrico.

Limite	LÍMITES DE DISTORSION DE CORRIENTES TIEMPO CORTO																								
	7			3,5			2,5			1			0,5			8									
Grado de armónico [%]	3*	5*	7*	9*	11*	13*	15*	17*	19*	21*	23*	25*	27*	29*	31*	33*	35*	37*	39*	41*	43*	45*	47*	49*	TDD
L1	2,6	46,975	23,4	0,5	3,875	3	0,5	4,8	1,4	0,2	2,2	1,4	0,3	1,7	1,5	0,2	0,8	0,9	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	46,19
L2	4,5	44,2	23,6	1	5	5,4	0,8	4,8	1,6	0,2	2,3	1,7	0,3	1,4	1,8	0,4	0,7	0,9	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	45,41
L3	7	49,175	23,2	1,6	5,9	4,675	1,2	5,3	1	0,4	2,8	1,1	0,5	2,1	1,3	0,4	0,8	0,50	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	39,68

Fig. 41. Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo muy corto para cada fase

Limite	LÍMITES DE DISTORSION DE CORRIENTES TIEMPO MUY CORTO																									
	14			7			5			2			1			16										
Grado de armónico [%]	3*	5*	7*	9*	11*	13*	15*	17*	19*	21*	23*	25*	27*	29*	31*	33*	35*	37*	39*	41*	43*	45*	47*	49*	TDD	
L1	67	66,7	66,7	67	66,7	31,8	33	67	37	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	67	100
L2	67	72,85	45,4	34	50	43,75	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	67
L3	67	66,7	66,7	67	66,7	33,3	33	40	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	67	

Fig. 42. Porcentaje de distorsión armónica de tensión por orden de armónicos en tiempo corto para cada fase

Análisis de pérdida de potencia según la norma IEEE C57.110-2018

La norma IEEE C57.110-2018 establece una metodología para evaluar las pérdidas adicionales en transformadores alimentando cargas no lineales, mediante el cálculo del *Factor de Pérdida Armónica* (Harmonic Loss Factor, HLF). Este factor permite estimar las pérdidas adicionales ocasionadas por la presencia de armónicos en la corriente, las cuales se suman a las pérdidas convencionales del transformador operando con carga lineal.

Para cada uno de los puntos de medición seleccionados en este estudio, se realizó el cálculo del FHL con base en los contenidos armónicos medidos y se estimó la pérdida de potencia adicional utilizando la siguiente expresión:

$$P_{NL} = P_L \cdot FHL \tag{17}$$

donde P_{NL} representa las pérdidas adicionales debidas a armónicos, P_L es la pérdida del devanado bajo corriente fundamental, y FHL es el factor calculado en función del espectro de corriente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada transformador evaluado:

- Transformador de 48 kVA (Enconadora Starex 3) TRANSFORMADOR 48KVA

TRANSFORMADOR 48KVA				
h	ih/l	(ih/l)²	h²	(ih/l)²*h²
1	1	1	1	1
3	0,026	0,000676	9	0,006084
5	0,40975	0,16789506	25	4,19737656
7	0,234	0,054756	49	2,683044
9	0,005	0,000025	81	0,002025
11	0,03875	0,00150156	121	0,18168906
13	0,03	0,0009	169	0,1521
15	0,005	0,000025	225	0,005625
17	0,048	0,002304	289	0,665856
19	0,014	0,000196	361	0,070756
21	0,002	0,000004	441	0,001764
23	0,022	0,000484	529	0,256036
25	0,014	0,000196	625	0,1225
27	0,003	0,000009	729	0,006561
29	0,017	0,000289	841	0,243049
31	0,015	0,000225	961	0,216225
33	0,002	0,000004	1089	0,004356
35	0,008	0,000064	1225	0,0784
37	0,009	0,000081	1369	0,110889
39	0,002	0,000004	1521	0,006084
41	0,002	0,000004	1681	0,006724
43	0,003	0,000009	1849	0,016641
45	0,001	0,000001	2025	0,002025
47	0,001	0,000001	2209	0,002209
49	0,001	0,000001	2401	0,002401
		1,22965463		10,0404196

Fig. 43. Cálculo del porcentaje de pérdidas de potencia en el transformador de 48kVA según IEEE C57.110 de 2018

TABLA V
CÁLCULO DE PÉRDIDAS ADICIONALES POR ARMÓNICOS EN EL TRANSFORMADOR DE
48 KVA

Parámetro	Valor
Potencia nominal del transformador	48 kVA
Tensión nominal	220 V
Corriente base I_{base}	125,97 A
Corriente máxima real I_{max}	94,74 A
Carga aprovechable real	75 %
Pérdida base estimada P_L	2,4 pu
Factor de pérdida armónica (FHL)	8,17
Pérdida adicional estimada P_{NL}	19,61 pu (equivalente a 19,61 kW)

- Autotransformador de 150 kVA (Subestación 6)

AUTOTRANSFORMADOR 150KVA				
h	ih/I	(ih/I)²	h²	(ih/I)²*h²
1	1	1	1	1
3	0,44	0,1936	9	1,7424
5	0,24	0,0576	25	1,44
7	0,01	0,0001	49	0,0049
9	0,05	0,0025	81	0,2025
11	0,054	0,002916	121	0,352836
13	0,008	0,000064	169	0,010816
15	0,048	0,002304	225	0,5184
17	0,016	0,000256	289	0,073984
19	0,002	0,000004	361	0,001444
21	0,023	0,000529	441	0,233289
23	0,017	0,000289	529	0,152881
25	0,003	0,000009	625	0,005625
27	0,014	0,000196	729	0,142884
29	0,018	0,000324	841	0,272484
31	0,004	0,000016	961	0,015376
33	0,007	0,000049	1089	0,053361
35	0,003	0,000009	1225	0,011025
37	0,003	0,000009	1369	0,012321
39	0,003	0,000009	1521	0,013689
41	0,001	0,000001	1681	0,001681
43	0,01	0,0001	1849	0,1849
45	0,001	0,000001	2025	0,002025
47	0,001	0,000001	2209	0,002209
49	0,001	0,000001	2401	0,002401
		1,260887		6,453431

Fig. 44. Cálculo del porcentaje de perdidas de potencia en el autotransformador de 150kVA según IEEE

TABLA VI
CÁLCULO DE PÉRDIDAS ADICIONALES POR ARMÓNICOS EN EL AUTOTRANSFORMADOR DE
150 KVA

Parámetro	Valor
Potencia nominal del transformador	150 kVA
Tensión nominal	220 V
Corriente base I_{base}	393,65 A
Corriente máxima real I_{max}	327,90 A
Carga aprovechable real	83 %
Pérdida base estimada P_L	2,0 pu
Factor de pérdida armónica (FHL)	5,12
Pérdida adicional estimada P_{NL}	10,24 pu (equivalente a 10,24 kW)

A partir de los resultados obtenidos para el transformador de 48kVA y el autotransformador de 150kVA, se evidencia que las pérdidas adicionales por efecto de los armónicos superan ampliamente las pérdidas resistivas asociadas al régimen de operación con corriente fundamental. En el caso del transformador de 48kVA, las pérdidas inducidas por armónicos se estimaron en aproximadamente 19,61kW, mientras que para el autotransformador de 150kVA alcanzaron los 10,24kW.

Estas cifras representan una afectación energética considerable, especialmente si se extrapolan a periodos prolongados de operación. Además de las implicaciones técnicas, este fenómeno se traduce directamente en pérdidas económicas relevantes para la empresa, derivadas del sobreconsumo de energía, reducción de la eficiencia operativa y potencial sobrecalentamiento de los equipos eléctricos.

Por tanto, mitigar la presencia de armónicos no solo es una medida necesaria para cumplir con los estándares normativos, sino también una acción estratégica para preservar la vida útil de los transformadores, reducir costos operativos y mejorar la calidad del suministro eléctrico en la planta.

Propuesta de soluciones para la mitigación de armónicos: Como resultado del análisis realizado, se identificaron niveles significativos de distorsión armónica y pérdidas adicionales de potencia tanto en el transformador de 48kVA como en el autotransformador de 150kVA. Ante esta situación, es fundamental implementar soluciones técnicas orientadas a mitigar el impacto de los armónicos sobre los equipos eléctricos y el sistema en general.

Una de las alternativas consiste en la sustitución de los transformadores existentes por equipos diseñados con un Factor K adecuado. Este valor indica la capacidad del transformador para soportar corrientes distorsionadas sin generar sobrecalentamiento, y su elección debe considerar el espectro armónico presente en la carga. La especificación de transformadores con Factor K desde la etapa de adquisición permite prevenir el deterioro prematuro y mejorar la confiabilidad del sistema.

Otra medida preventiva consiste en seleccionar, desde el proceso de compra, equipos eléctricos que generen menor contenido armónico, es decir, que integren tecnologías más limpias desde el punto de vista de calidad de energía, como variadores de velocidad con filtros integrados o rectificadores de 12 o más pulsos.

En cuanto a soluciones de mitigación activa, una opción efectiva pero costosa son los filtros activos de armónicos, que tienen la capacidad de compensar dinámicamente cualquier orden armónico presente. Sin embargo, su implementación en una empresa del tamaño de Compañía de Empaques implicaría una inversión significativa, ya que sería necesario instalar un filtro activo por cada transformador o grupo de cargas críticas. [[19]], [[20]]

Finalmente, una opción más accesible desde el punto de vista económico es el diseño e implementación de filtros pasivos de armónicos. Estos se diseñan específicamente para neutralizar uno o varios órdenes armónicos definidos y, aunque requieren un diseño detallado y cuidadoso, representan una solución efectiva si se aplican correctamente. La etapa de diseño debe incluir simulaciones y análisis en el dominio de la frecuencia para garantizar su efectividad sin comprometer la estabilidad del sistema. [[21]], [[22]], [[23]]

A continuación, se presentan los cálculos realizados para el diseño de un filtro pasivo sintonizado al quinto armónico, el cual fue propuesto como solución específica para el autotransformador de 150kVA, donde se evidenció una fuerte presencia de dicho armónico.

Diseño de filtro pasivo para el quinto armónico Como parte de las estrategias de mitigación propuestas, se realizó el diseño de un filtro pasivo sintonizado al quinto armónico, con base en los lineamientos establecidos por la norma IEEE Std 1531. Este filtro se diseñó específicamente para el autotransformador de 150 kVA, donde se evidenció una fuerte presencia del armónico de orden 5 en el espectro de corriente.

Datos considerados para el diseño:

- Potencia aparente demandada promedio: $S = 120 \text{ kVA}$
- Potencia reactiva demandada promedio: $Q = 60 \text{ kVAR}$
- Frecuencia del sistema: $f = 60 \text{ Hz}$
- Nivel de tensión secundario: $V = 220 \text{ V (L-L)}$

Se decidió compensar el 50 % de la potencia reactiva promedio, lo que determina la potencia del filtro como:

$$Q_f = 0,5 \cdot Q = 0,5 \cdot 60 \text{ kVAR} = 30 \text{ kVAR}$$

El filtro se sintonizó al quinto armónico con una frecuencia ligeramente inferior a la armónica nominal, tal como lo recomienda la norma:

$$f_r = 0,95 \cdot 5 \cdot 60 \text{ Hz} = 285 \text{ Hz}$$

Cálculo de la capacitancia del filtro:

La potencia reactiva del banco de capacitores está dada por:

$$Q_c = V^2 \cdot 2\pi f C \Rightarrow C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2}$$

Reemplazando los valores:

$$C = \frac{30 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 60 \cdot (220)^2} \approx 1,64 \times 10^{-3} \text{ F} = 1640 \mu\text{F}$$

Cálculo de la inductancia del filtro:

Para asegurar la sintonía a $f_r = 285 \text{ Hz}$, se aplica:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot C}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 285)^2 \cdot 1,64 \times 10^{-3}} \approx 0,193 \text{ mH}$$

Resumen de parámetros del filtro diseñado:

TABLA VII

PARÁMETROS DEL FILTRO PASIVO SINTONIZADO AL QUINTO ARMÓNICO

Parámetro	Valor
Potencia del filtro Q_f	30 kVAR
Frecuencia de sintonía f_r	285 Hz
Capacitancia total C	1640 μ F
Inductancia L	0,193 mH

Este diseño preliminar debe complementarse con simulaciones en el dominio de la frecuencia y análisis armónico en software especializado, con el fin de validar su efectividad bajo las condiciones reales de carga de la planta. La correcta sintonización del filtro garantiza la atenuación del armónico objetivo sin comprometer la estabilidad del sistema eléctrico.

VI. CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió evaluar la calidad de la energía eléctrica en puntos estratégicos de la red interna de la Compañía de Empaques, a partir del estudio detallado de dos transformadores que presentaban indicios de afectación por distorsión armónica. La selección de estos transformadores se sustentó en síntomas operativos relevantes: en el caso del transformador de 48 kVA, se observaron daños frecuentes en los variadores de velocidad de la máquina Enconadora Starex 3; mientras que el autotransformador de 150 kVA mostró signos de sobrecalentamiento durante su operación, pese a encontrarse por debajo del 85 % de carga.

Las mediciones realizadas con base en los tiempos definidos por la norma IEEE 519-2022 (tiempo corto y muy corto) confirmaron la presencia significativa de armónicos, tanto en tensión como en corriente, con predominancia de los armónicos de orden 5 y 7. En el transformador de 48 kVA, el contenido total de armónicos de corriente (TDD) superó ampliamente los límites permitidos para su rango de cortocircuito relativo, mientras que el THD de tensión se aproximó peligrosamente al valor límite del 8 %. Situaciones similares, aunque con menor severidad, se evidenciaron en el autotransformador de 150 kVA.

A través de la aplicación de la norma IEEE C57.110-2018, fue posible cuantificar las pérdidas adicionales de potencia atribuibles al efecto de los armónicos en el devanado de los transformadores. El cálculo del Factor de Pérdida Armónica (FHL) permitió estimar pérdidas del orden de 19,6 kW para el transformador de 48 kVA y 10,2 kW para el autotransformador de 150 kVA, cifras que superan ampliamente las pérdidas asociadas a operación con carga lineal. Este resultado pone en evidencia el impacto energético y económico que generan los armónicos en una red industrial sin tratamiento adecuado.

El estudio también permitió identificar soluciones viables desde el punto de vista técnico y económico. Se destaca la importancia de especificar transformadores con un Factor K adecuado desde la etapa de adquisición, así como la necesidad de evaluar tecnologías de carga que presenten menor generación armónica. Si bien los filtros activos representan una solución eficaz frente a cualquier distorsión, su alto costo limita su aplicación a nivel general

en instalaciones industriales grandes. En contraste, los filtros pasivos sintonizados permiten mitigar armónicos específicos con mayor eficiencia económica, siempre que su diseño sea cuidadoso y validado mediante simulaciones.

Como ejemplo de aplicación práctica, se desarrolló un filtro pasivo sintonizado al quinto armónico, dimensionado para el autotransformador de 150 kVA con base en la potencia reactiva de carga promedio. Este diseño representa una medida concreta y replicable, alineada con las condiciones reales de operación y con los requerimientos normativos vigentes.

Los hallazgos obtenidos refuerzan la necesidad de implementar un enfoque sistemático para el monitoreo, evaluación y mitigación de la distorsión armónica en sistemas eléctricos industriales. El control de los armónicos no solo permite cumplir con la normativa, sino que también representa una estrategia eficaz para mejorar la confiabilidad, prolongar la vida útil de los equipos y optimizar el desempeño energético de las instalaciones.

REFERENCIAS

- [1] A. Nassif, “Modeling, measurement and mitigation of power system harmonics,” tech. rep., 2009.
- [2] IEEE, *519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE, 2022.
- [3] Chapman, “MÁquinas elÉctricas,” tech. rep., 2012.
- [4] IEEE, *IEEE Std C57.110 -2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008): IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE, 2018.
- [5] Alexander, C. K, Sadiku, and M. N, “Fundamentos de circuitos elÉctricos, 5ta. edición,” tech. rep., 2013.
- [6] C. de regulación de energía y gas, “Creg024-2015,” 2015.
- [7] C. técnico AEN/CTN 203 Equipamiento Eléctrico y Sistemas Automáticos para la Industria, “Une-en 61642 - redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo,” tech. rep., 9 2000.
- [8] I. I. C. de Normas Técnicas y Certificación), *Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 Segunda actualización*. 2020.
- [9] R. Mienski, R. Pawelek, and I. Wasiak, “Examination of power quality in industry,” tech. rep., 1998.
- [10] M. D. M. Y. ENERGÍA, “Reglamento técnico de instalaciones elÉctricas-retie - libro 3 instalaciones objeto del retie,” tech. rep., REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS-RETIE, 4 2024.
- [11] ABB, “«corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones elÉctricas». cuaderno de aplicaciones técnicas,” 2013.

-
- [12] M. Ali, F. S. Al-Ismail, M. M. Gulzar, and M. Khalid, “A review on harmonic elimination and mitigation techniques in power converter based systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 234, p. 110573, 9 2024.
- [13] J. Kilter, J. Meyer, S. Elphick, and J. V. Milanović, *Guidelines for Power Quality Monitoring – Results from CIGRE/CIREN JWG C4.112*. IEEE, 2014.
- [14] G. Zhang, R. Wang, Y. Wang, H. Yu, W. Wei, M. Wei, and Z. Liu, “High precision real-time simulation method of harmonic power flow in urban rail flexible traction power supply system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 236, p. 110920, 11 2024.
- [15] IEEE, *1531-2020 - IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters*. IEEE, 2020.
- [16] R. A. Susilo, F. S. Tolanda, A. Hidayat, P. Handriano, V. Amalia, and B. I. Basari, “Evaluation of electrical harmonics in building installations,” *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, pp. 129–137, 8 2024.
- [17] H. Eroğlu, E. Cuce, P. M. Cuce, F. Gul, and A. Iskenderoğlu, “Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, p. 101566, 12 2021.
- [18] L. Motta and N. Faúndes, *Active / Passive Harmonic Filters: Applications, Challenges & Trends*. IEEE, 2016.
- [19] J. Yu, J. Li, C. Liang, C. Gong, B. Zhu, and Q. Tang, “A harmonic analysis method for power systems based on double frequency-shift filtering,” *Measurement*, vol. 249, p. 117030, 5 2025.
- [20] Q. Tang, J. Huang, B. Zhu, J. Yu, C. Liang, and J. Li, “Time-varying harmonic analysis method based on adaptive frequency-shift filtering for power systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 238, p. 111177, 1 2025.

- [21] S. N. Victorovna and A. S. University, *The Integrated Assessment of Power Losses in Power Supply Systems Caused by Poor Power Quality*. I E E E, 2009.
- [22] A. S. Semenov, “Analyzing impacts of higher harmonics on electricity quality parameters at mining facilities,” in *Proceedings - 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2024*, pp. 321–325, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024.
- [23] G. Tabita and P. U. Reddy, “Design of interline hybrid continuous trans-impedance turns ratio controlled tuning power filter: New approach to suppress harmonics in energy system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 238, p. 111107, 1 2025.