

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

DETERMINACIÓN DEL FACTOR K EN TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN EN EL CIRCUITO EXTENSO DEL ALIMENTADOR “EL
CHOTA” DEL ÁREA DE CONCESIÓN EMELNORTE S.A.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero (a) Eléctrico (a)
--

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR (A):

Lenin David Picuasi Yacelga

DIRECTOR (A):

Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc.

Ibarra - Ecuador (2026)



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004331151		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Picuasi Yacelga Lenin David		
DIRECCIÓN:	Calle Chorlaví 1-27 y Av. Fray Vacas Galindo		
EMAIL:	ldpicuasiy@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	065017368	TELÉFONO MÓVIL:	0991340601

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Determinación del factor k en transformadores de distribución en el circuito extenso del alimentador "El Chota" del área de concesión EMELNORTE S.A.
AUTOR (ES):	Picuasi Yacelga Lenin David
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	15/02/2026
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Ramiro Vásquez MSc. Ing. Olger Arellano MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de febrero de 2026.

EL AUTOR:

Nombre: Lenin David Picuasi Yacelga



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Olger Giberto Arellano Bastidas en calidad de director del señor estudiante Picuasi Yacelga Lenin David certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “Determinación del Factor K en transformadores de distribución en el circuito extenso del alimentador “El Chota” del área de concesión EMELNORTE S.A.”

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mi familia, que, gracias a su apoyo y sostén han sabido guiarme de la manera correcta para que todo esto fuera posible.

A mi madre, Margarita Yacelga, que ha sido y es la persona más fuerte que conozco y que gracias a su amor, cariño, paciencia y su entrega a sus hijos, nos ha encaminado a ser mejores personas y mejores profesionales. No me alcanzará la vida para retribuir todo ese amor y ese cariño que ha sabido darnos.

A mi padre, Carlos Picuasi, quien, a pesar de estar en un mejor lugar, nunca se ha ido de mí, pues fue quien me enseñó el verdadero significado de la responsabilidad. Sus enseñanzas, sus valores y su gusto por la música viven en cada uno de sus hijos.

A mis hermanos, Ing. Eduardo Picuasi, quien trazó un camino que pude seguir con mayor claridad y que en muchas ocasiones fue mi maestro. Gracias por sus enseñanzas y su paciencia. Andrea Picuasi, con quien juntos hemos aprendido de generosidad y de crecer como personas. Paúl Picuasi, quien ha sabido ser un compañero y un cómplice en momentos en donde más necesitaba su compañía. A todos, gracias por hacer más llevadero cada desafío.

A mis tías, Gloria Yacelga y Amanda Yacelga, personas quienes han sabido hacer llegar su cariño y su presencia cuando la familia más lo ha necesitado. Siempre estaré agradecido por ese amor que han sabido transmitirnos.

A mis primos, amigos y a todas las personas que aportaron con un consejo, una palabra de aliento o simplemente escuchando, les expreso mi gratitud y aprecio.



AGRADECIMIENTOS

Extiendo mis más sinceros agradecimientos a toda mi familia, ya que cada uno ha jugado un papel importante para que este trabajo sea posible. El apoyo incondicional que he recibido de parte de mi madre y mis hermanos me ha enseñado que todo es posible si se lo hace con trabajo y dedicación y que este es un claro ejemplo de todo lo que puedo ser capaz de conseguir en la vida. Gracias por estar para mí cuando más lo necesité.

A mi tutor, Ing. Olger Arellano MSc. quien gracias a su experiencia y su sabiduría, ha sabido guiarme y aconsejarme para que este trabajo tenga la calidad y relevancia esperadas. Su conocimiento, su dedicación a los estudiantes, su forma de enseñar y de ser un maestro, son dignos de admiración.

A mi asesor, Ing. Ramiro Vásquez MSc. le extiendo mis agradecimientos por cada enseñanza, consejo y observación crítica que ha sabido impartirme para que este trabajo sea desarrollado de la mejor manera posible.



INDICE DE CONTENIDOS

Contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO I	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1 Problema de investigación	3
1.1.1 Problemática a investigar.	3
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General.	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Alcance y delimitación	4
1.4 Justificación	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes	6
2.1.1 Origen y desarrollo del factor K	6
2.1.2 Crecimiento de cargas no lineales	7
2.1.3 Normas internacionales sobre el factor K	8
2.1.4 Impacto económico de la implementación del factor K	8
2.2 Bases teóricas	9
2.2.1 Sistema de distribución eléctrica	9
2.2.2 Red de distribución de energía eléctrica	9
2.2.3 Corrientes armónicas	11
2.2.4 Carga No Lineal	11
2.2.5 Transformadores	11
2.2.6 Transformadores de distribución	12
2.2.7 Efectos de las Armónicas en Transformadores	12
2.2.8 Normativas y Estándares	13
2.2.9 Impactos de las corrientes armónicas en transformadores:	13
2.2.10 Pérdidas en transformadores debido a armónicos	14
2.2.11 De-rating en transformadores:	14



2.2.12	Corrientes de Foucault o de Eddy	14
2.2.13	Factor K:.....	15
2.2.14	Clasificación de transformadores según Factor K.....	15
2.2.15	Relación entre el Factor K y la capacidad del transformador	16
2.2.16	Aplicaciones del Factor K y el Análisis Armónico	16
2.2.17	Importancia de los Filtros Armónicos.....	17
2.2.18	Corrientes Armónicas y su Impacto en los Sistemas Eléctricos.....	17
2.2.19	Caso de estudio: Reducción del Factor K en transformadores mediante filtros armónicos.....	19
2.2.20	Caso de Estudio: Impacto de los Armónicos de Alta Frecuencia en Transformadores de Distribución.....	22
CAPÍTULO III		26
MATERIALES Y MÉTODOS.....		26
3.1	Metodología	26
3.1.1	Enfoque o paradigma:.....	26
3.1.2	Tipo de investigación:.....	28
3.2	Procedimiento Integral.....	28
3.3	Materiales, equipos y software.....	30
3.3.1	Regulación IEEE 57.110 - 2018	30
3.3.2	Regulación IEEE Std 519-2014	30
3.3.3	Regulación Nacional ARCONEL 009/24.....	30
3.3.4	Clasificación del Factor K para transformadores de distribución	31
3.4	Análisis de datos armónicos	31
3.4.1	Limitaciones en el análisis de armónicos de corriente y criterios de confiabilidad	32
3.4.2	Procesamiento de datos.....	34
3.4.3	Influencia del tercer armónico de voltaje en transformadores de distribución: observaciones y tendencias	37
3.4.4	Evaluación temporal de distorsión armónica	40
3.4.5	Análisis general del comportamiento del THD V y V h3	43
3.4.6	Alta presencia de incumplimiento del.....	43
3.4.7	Tendencia descendente del THD V con el aumento de la potencia.....	43
3.4.8	Valores elevados y constantes del 3er armónico (V h3)	44
3.4.9	Distancia a la subestación no es determinante directa	44
3.4.10	Influencia del número de clientes es limitada	44



3.4.11	Relación entre distorsión armónica y características del transformador ..	44
3.5	Ecuación para el cálculo del Factor K	47
CAPITULO IV		48
RESULTADOS Y ANÁLISIS		48
4.1	Procedimiento matemático del cálculo del Factor K	48
4.1.1	Cálculo del Factor K	50
4.1.2	Diferencias entre líneas y neutro	54
4.1.3	Relación entre potencia nominal y Factor K	54
4.1.4	Transformadores con Factor $K \approx 1$	55
4.1.5	Casos críticos o frontera	55
4.2	Análisis comparativo entre la potencia activa máxima y la potencia asociada al Factor K máximo	56
4.2.1	Casos especiales: potencia activa nula y Factor K elevado	57
4.2.2	Implicaciones técnicas de los resultados	59
4.3	Selección del Factor K por nivel de potencia	60
4.3.1	Análisis del criterio adoptado	61
4.4	Interpretación de resultados	62
4.4.1	Observaciones técnicas derivadas del análisis	63
Conclusiones		66
Recomendaciones		67



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de distribución típico.[9].....	11
Figura 2: Tendencia armónica del THD V	36
Figura 3: Tendencia armónica del V h3.....	36



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de resultados de la reducción del Factor K en transformadores mediante filtros armónicos [5]	21
Tabla 2: Resultados del Impacto de los Armónicos de Alta Frecuencia en Transformadores de Distribución [4]	23
Tabla 3: Tabla resumen de Equipos y Materiales para el desarrollo del presente estudio	30
Tabla 4: Clasificación del Factor K para transformadores de distribución [16]	31
Tabla 5: Análisis de carga en los transformadores.....	33
Tabla 6: Tabla de incumplimiento del 3er armónico de voltaje con relación a la distancia de la subestación al transformador.....	37
Tabla 7: Resumen del comportamiento del HD V y el V h3	41
Tabla 8: Matriz de operación de variables	47
Tabla 9: Cálculo del Factor K en los transformadores de distribución del área de concesión...	52
Tabla 10: Relación entre la potencia máxima y la potencia en el intervalo del Factor K máximo.	56
Tabla 11: Ajuste del valor de Factor K para cada transformador según su nivel de potencia ...	60



RESUMEN

El presente estudio tuvo como finalidad determinar el Factor K de transformadores de distribución del circuito extenso del alimentador “El Chota”, en el área de concesión de EMELNORTE S.A., mediante el análisis de registros históricos de calidad de energía y del comportamiento de corrientes armónicas bajo condiciones de carga. Para ello, se realizó la depuración y procesamiento de datos en hojas de cálculo, diferenciando el análisis de armónicos de voltaje —empleados como indicadores de perturbación en la calidad del suministro— y los armónicos de corriente —utilizados específicamente para el cálculo del Factor K debido a su impacto térmico sobre el transformador—. El cálculo del Factor K por intervalos permitió identificar escenarios representativos de mayor severidad armónica, evidenciando una mayor contaminación relativa en transformadores de 10 kVA y 15 kVA; sin embargo, se adoptó un criterio conservador de clasificación por nivel de potencia aplicable a cada grupo de transformadores. Asimismo, el análisis demostró que el Factor K no depende directamente de la magnitud de la carga sino del tipo de cargas no lineales presentes, confirmando que el estrés térmico inducido por armónicos puede manifestarse incluso en condiciones de baja demanda. En conjunto, la metodología aplicada permitió caracterizar de forma coherente el comportamiento armónico del sistema y establecer criterios técnicos para la evaluación térmica y operativa de transformadores de distribución en sistemas de bajo voltaje.

Palabras clave:

Transformadores, armónicos, distribución, Factor-K, distorsión.



ABSTRACT

This study aimed to determine the K-Factor of distribution transformers located in the extended circuit of the “El Chota” feeder within the EMELNORTE S.A. concession area, through the analysis of historical power quality records and the behavior of harmonic currents under real operating conditions. A structured process of data filtering and processing was conducted using spreadsheet tools, differentiating the analysis of voltage harmonics—treated as indicators of power quality disturbance—from current harmonics, which were specifically used for K-Factor calculation due to their thermal impact on transformers. Interval-based K-Factor calculations enabled the identification of representative scenarios of higher harmonic severity, revealing relatively greater harmonic contamination in 10 kVA and 15 kVA transformers; however, a conservative classification criterion by power rating was adopted and applied uniformly within each transformer group. The analysis further demonstrated that the K-Factor is not directly dependent on load magnitude but rather on the type of nonlinear loads connected, confirming that harmonic-induced thermal stress may occur even under low demand conditions. Overall, the applied methodology provided a coherent characterization of harmonic behavior in the system and established technical criteria for evaluating the thermal and operational performance of distribution transformers in low-voltage networks.

Keywords:

Transformers, harmonics, distribution, K-Factor, distortion.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema

Determinación del factor k en transformadores de distribución en el circuito extenso del alimentador “El Chota” del área de concesión EMELNORTE S.A.

El problema

1.1 Problema de investigación.

La problemática que fundamenta este estudio será presentada a continuación, constituyendo la base para el desarrollo de la presente investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

Los transformadores de distribución ubicados en el circuito extenso del alimentador El Chota del área de concesión de EMELNORTE S.A. operan en un entorno donde la creciente penetración de cargas no lineales introduce corrientes armónicas que alteran las condiciones eléctricas normales de funcionamiento. Estas corrientes, al circular por los devanados, pueden incrementar las pérdidas térmicas internas y generar un impacto térmico adicional que no es evidente mediante indicadores tradicionales de carga. Si bien los efectos armónicos han sido ampliamente documentados, en el contexto local no se dispone de una caracterización sistemática que permita cuantificar su impacto térmico a través del Factor K , particularmente en transformadores de distribución sometidos a condiciones bajo carga.

La ausencia de este análisis limita la evaluación objetiva del comportamiento de los equipos frente a cargas armónicas y dificulta la identificación de escenarios de potencial estrés térmico. En consecuencia, surge la necesidad de determinar el Factor K a partir de datos reales del sistema, con el fin de comprender la influencia de las corrientes armónicas en el desempeño operativo de los transformadores y aportar criterios técnicos que permitan interpretar su comportamiento bajo condiciones no ideales.



1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es el valor del Factor K en los transformadores de distribución del alimentador “El Chota” del área de concesión de EMELNORTE S.A., y cómo influye este valor en la protección y el desempeño de los equipos ante los efectos de las corrientes armónicas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General.

Determinar el Factor K para transformadores de distribución en el circuito extenso del alimentador “El Chota” en el área de concesión EMELNORTE S.A. mediante el análisis de datos históricos y de los efectos de las corrientes armónicas, para la protección de estos equipos en condiciones reales de operación.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- a) Describir los principios teóricos y estudios sobre el Factor K en transformadores de distribución.
- b) Caracterizar las corrientes armónicas presentes en el área de estudio, así como sus efectos en el rendimiento de los transformadores.
- c) Determinar el valor del Factor K de los transformadores de distribución en el circuito extenso del alimentador “El Chota”, mediante el análisis de datos y resultados obtenidos.

1.3 Alcance y delimitación

El presente estudio se enfoca en la determinación del Factor K en transformadores de distribución del circuito extenso del alimentador El Chota, perteneciente al área de concesión de EMELNORTE S.A., considerando distintos niveles de potencia nominal. El análisis se basa en la caracterización de las corrientes armónicas medidas en condiciones bajo carga y en la evaluación de su impacto térmico sobre los transformadores, conforme a los principios establecidos en la norma IEEE C57.110.

La investigación se desarrolla a partir del análisis cuantitativo de datos históricos obtenidos mediante analizadores de calidad de energía, sin incluir el diseño ni la implementación de soluciones de mitigación armónica, tales como filtros activos o



pasivos. El estudio se limita a la evaluación del efecto térmico de los armónicos de corriente mediante el cálculo del Factor K, bajo criterios de confiabilidad asociados al nivel de carga del transformador.

Los resultados obtenidos permiten establecer valores representativos de Factor K por nivel de potencia, orientados a apoyar la selección, protección y gestión técnica de transformadores de distribución que operan en sistemas de bajo voltaje con presencia de cargas no lineales, sin pretender generalizar los resultados a otros circuitos fuera del área de estudio.

1.4 Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de comprender y cuantificar el impacto de las corrientes armónicas en el comportamiento térmico de transformadores de distribución dentro del área de concesión de EMELNORTE S.A. El incremento de cargas no lineales en redes de bajo voltaje introduce condiciones operativas que no siempre son evidentes mediante indicadores tradicionales de carga, lo que hace indispensable el uso del Factor K como herramienta especializada para evaluar pérdidas adicionales y estrés térmico.

Este estudio aporta una caracterización técnica basada en datos reales que permite relacionar la distorsión armónica con efectos operativos medibles, fortaleciendo los criterios de análisis, selección y gestión de transformadores. De esta manera, la investigación responde a una problemática concreta del sistema de distribución, generando información reutilizable que contribuye a una evaluación más objetiva del desempeño de los equipos bajo condiciones armónicas reales.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En los últimos años, el panorama de la distribución de energía ha cambiado drásticamente con la proliferación de dispositivos electrónicos, tales como computadoras personales, equipos de telecomunicaciones, iluminación LED y electrodomésticos con fuentes de alimentación conmutadas. Estos dispositivos, a diferencia de las cargas lineales tradicionales (como motores o resistencias), generan corrientes no sinusoidales que contienen componentes armónicos. La presencia de armónicos altera la calidad de la onda de corriente y contribuye a un aumento de las pérdidas en los transformadores de distribución, tanto en los devanados como en el núcleo. Las corrientes armónicas generan campos magnéticos fluctuantes que inducen corrientes de Foucault (o corrientes parásitas) en el núcleo, lo que se traduce en un calentamiento excesivo del mismo. Este fenómeno no solo reduce la eficiencia del transformador, sino que también acelera su envejecimiento térmico y reduce su vida útil. [1]

Para abordar este problema, se implementa el Factor K, una clasificación que identifica la capacidad de los transformadores de soportar cargas armónicas sin superar los límites de temperatura que causarían daños. Transformadores con un Factor K bajo están diseñados para aplicaciones con cargas predominantemente lineales, mientras que aquellos con un Factor K más elevado se utilizan en instalaciones donde predominan las cargas no lineales. El conocimiento de la influencia de los armónicos es crucial para la correcta selección de transformadores en redes eléctricas modernas, donde la presencia de estas cargas es cada vez más común debido a la digitalización y electrificación masiva de los sistemas. [2]

2.1.1 Origen y desarrollo del factor K

El concepto de Factor K fue introducido como un recurso técnico en la década de los 80 y 90, en respuesta a la creciente preocupación por el impacto de las cargas no lineales sobre los transformadores de distribución. Las corrientes armónicas generadas por cargas



electrónicas distorsionan la onda de corriente y causan un aumento de las pérdidas resistivas, ya que las corrientes armónicas de alta frecuencia concentran el flujo de corriente cerca de la superficie de los conductores, un fenómeno conocido como efecto piel. Este aumento de las pérdidas también genera un mayor calentamiento en los devanados y, por ende, un riesgo de degradación térmica acelerada de los aislamientos. [3]

La necesidad de normativas y directrices específicas para mitigar estos efectos llevó a la publicación de estándares como el IEEE C57.110, que establece prácticas recomendadas para evaluar la capacidad de los transformadores bajo condiciones de carga no sinusoidal. A través del factor K, los ingenieros pueden seleccionar transformadores adecuados para entornos con cargas electrónicas dominantes, asegurando un rendimiento confiable y seguro. Un transformador con un factor K elevado está diseñado con mayores márgenes de seguridad térmica y es capaz de manejar corrientes armónicas sin comprometer su integridad. Estas mejoras estructurales pueden incluir un aumento en el tamaño del núcleo, el uso de materiales con mejores propiedades térmicas, y un diseño optimizado para reducir las corrientes parásitas. El factor K se ha consolidado como una herramienta clave en la planificación de redes de distribución, especialmente en un contexto donde el uso de equipos electrónicos continuará aumentando exponencialmente en los próximos años. [1]

2.1.2 Crecimiento de cargas no lineales

El incremento en el uso de dispositivos electrónicos y equipos industriales con componentes electrónicos ha transformado la naturaleza de las cargas conectadas a la red eléctrica. Estos dispositivos, como motores de velocidad variable, fuentes de alimentación conmutadas y sistemas de iluminación LED, crean cargas no lineales que generan armónicos, es decir, variaciones en la corriente eléctrica a múltiplos de la frecuencia fundamental de la red (generalmente 60 Hz o 50 Hz). Este tipo de distorsión altera la corriente y, por tanto, también afecta la tensión a lo largo del sistema eléctrico, causando sobrecalentamiento y pérdidas adicionales en los transformadores que no están diseñados para estas condiciones. [4]



La IEEE, en el informe sobre Power Delivery (2020), advierte que, debido a las pérdidas adicionales inducidas por armónicos, el sobrecalentamiento no solo disminuye la vida útil de los transformadores, sino que también puede producir fallas tempranas y caídas de voltaje, especialmente en sistemas de distribución que operan cerca de su capacidad. En países como Estados Unidos y algunos de Europa, la industria ha adoptado el uso de transformadores con factor K para manejar estas cargas de manera eficiente, prolongando la vida útil de los transformadores en entornos de alta demanda armónica y mitigando problemas de estabilidad en el sistema eléctrico. [5]

2.1.3 Normas internacionales sobre el factor K

En el ámbito de la ingeniería eléctrica, diversas normas y estándares han sido desarrollados para guiar el diseño y la evaluación de transformadores capaces de soportar las cargas armónicas generadas por cargas no lineales. La norma IEEE C57.110, por ejemplo, proporciona directrices específicas sobre cómo calcular el factor K para diferentes tipos de transformadores según el nivel de distorsión armónica esperada. Este cálculo toma en cuenta la magnitud y el orden de los armónicos presentes en la carga para definir un valor que pueda soportar los niveles de temperatura inducidos por estas distorsiones. Por su parte, la IEC 60076-19 también emite pautas para el diseño y pruebas de transformadores adaptados a entornos con alta presencia de armónicos. [6]

Estas normativas ayudan a las empresas eléctricas y fabricantes de transformadores a entender y cuantificar la resistencia térmica necesaria para manejar cargas no lineales. La adopción de estas normas en países desarrollados ha demostrado que el uso adecuado del Factor K permite una distribución de la carga más efectiva y una reducción en los costos de mantenimiento y operación, pues los transformadores presentan menor riesgo de sobrecalentamiento y mantienen un rendimiento estable, incluso en condiciones adversas.[7]

2.1.4 Impacto económico de la implementación del factor K

Los transformadores diseñados para manejar altos niveles de cargas no lineales pueden representar una inversión inicial mayor; sin embargo, estudios en instalaciones industriales de Norteamérica y Europa muestran que estos dispositivos generan ahorros



significativos a largo plazo. Según datos del Journal of Power Electronics (2021), empresas industriales y comerciales en estos mercados han reducido costos de mantenimiento y extendido la vida útil de sus transformadores mediante el uso de transformadores con Factor K elevado.

En sistemas de distribución, estos beneficios económicos se extienden no solo a los costos directos de los transformadores, sino también a la mejora de la calidad del servicio. La reducción de fallas en los transformadores significa menos interrupciones del suministro eléctrico, un factor crítico para la satisfacción del cliente en empresas distribuidoras. Al reducir los costos operativos y evitar reemplazos prematuros, los transformadores con factor K contribuyen a la rentabilidad de las empresas eléctricas, demostrando que su implementación es una inversión viable en sistemas con alta demanda de carga no lineal.[8]

2.2 Bases teóricas

A continuación, se presentarán definiciones y conceptos clave relacionados directamente con el tema de investigación. Estos conceptos permitirán comprender de manera más clara y fundamentada lo que se está presentado acerca del Factor K, los fenómenos asociados a las corrientes armónicas, así como la importancia de evaluar y mitigar sus efectos en los sistemas eléctricos de potencia.

2.2.1 Sistema de distribución eléctrica

Un sistema de distribución de energía eléctrica es un conjunto de equipos diseñados para proporcionar energía de manera segura y confiable a diversas cargas en diferentes niveles de voltaje y ubicaciones.[9]

2.2.2 Red de distribución de energía eléctrica

La red de distribución de energía eléctrica es una parte fundamental del sistema eléctrico, gestionada por las compañías distribuidoras, y se encarga de llevar la energía desde las subestaciones de transporte hasta los consumidores finales. Este proceso se divide en dos etapas:



2.2.2.1 Red de reparto:

Parte desde las subestaciones de transformación y distribuye la energía a través de anillos que rodean los grandes centros de consumo. En esta etapa, los voltajes oscilan entre 25 kV y 132 kV. Los anillos incluyen estaciones transformadoras que reducen el voltaje del nivel de reparto al de medio voltaje para su distribución.[9]

2.2.2.2 Red de distribución en medio y bajo voltaje:

Con voltajes de funcionamiento en los 13,8 kV, esta red conecta las estaciones transformadoras de distribución con los centros de transformación. Estos centros son los encargados de reducir el voltaje a 120/240V si es monofásico y 127/220V si es trifásico; voltajes adecuados para los consumidores finales.

Las líneas de distribución suelen operarse de forma radial, lo que significa que no forman mallas, a diferencia de las redes de transporte y reparto. En caso de averías, los dispositivos de protección en el inicio de cada red detectan la falla y abren los interruptores para aislar el problema y evitar daños mayores.

La red de distribución es la parte del sistema eléctrico que conecta las subestaciones con los consumidores finales mediante cables aéreos o subterráneos y centros de transformación. [10]

Es responsabilidad de las compañías distribuidoras de electricidad y se encarga de entregar la energía a hogares, industrias y otros usuarios.

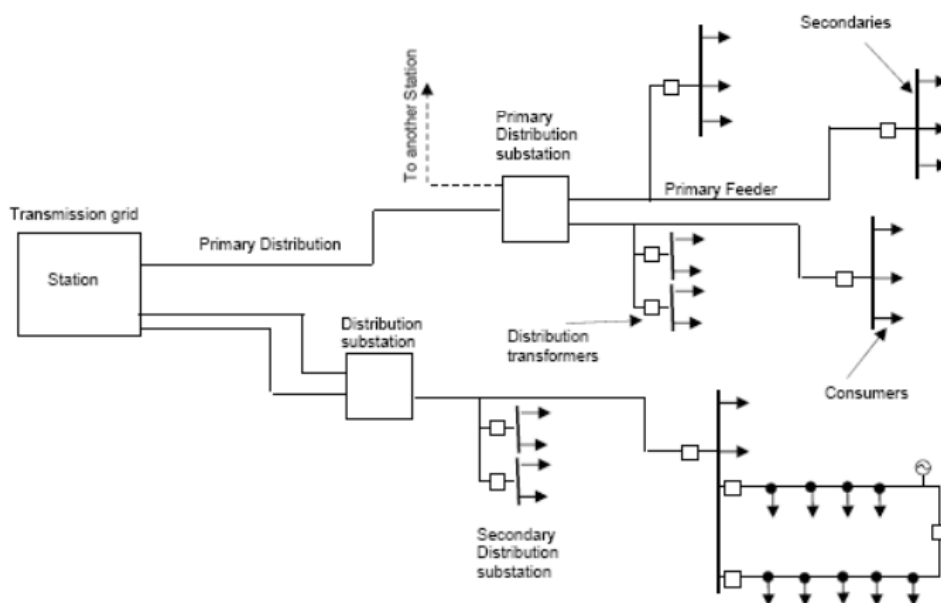


Figura 1: Sistema de distribución típico.[9]

2.2.3 Corrientes armónicas

Las corrientes armónicas son componentes de la corriente eléctrica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (50 Hz o 60 Hz). Estas corrientes son generadas por cargas no lineales, como hornos de arco, variadores de velocidad, fuentes de alimentación conmutadas y sistemas UPS.[5]

2.2.4 Carga No Lineal

Se refiere a cualquier carga que distorsiona la forma de onda de corriente al no presentar una relación lineal entre el voltaje aplicado y la corriente que consume.

2.2.5 Transformadores

Los transformadores son dispositivos esenciales en la distribución y aprovechamiento de la energía eléctrica. Su función principal es modificar el voltaje de la corriente alterna sin alterar su potencia. Están compuestos por varios elementos clave.

- **Núcleo:** Encierra el flujo magnético generado por las bobinas, reduciendo las pérdidas por corrientes de Foucault. Su diseño puede variar según el tipo de transformador (acorazado, toroidal, etc.) y, en casos especiales, puede prescindir de núcleo metálico.



- **Bobinas:** Enrolladas alrededor del núcleo, transforman el voltaje según la cantidad de espiras. Un transformador incluye al menos dos bobinas, primaria y secundaria, y su relación de espiras determina el cambio de voltaje. En transformadores trifásicos, hay tres bobinas por devanado.
- **Aislantes:** Separan el núcleo y las bobinas, protegiendo las diferentes tensiones entre elementos. En alta tensión, se usan materiales como papel impregnado en aceite mineral o capas de laca.

Los transformadores pueden incluir otros componentes adicionales, como tableros de control, relés de protección o depósitos de expansión en los modelos de baño de aceite.

En la teoría, existe un transformador llamado ideal, que es un modelo teórico sin pérdidas energéticas, imposible de construir debido a fenómenos como las corrientes de Foucault, que generan pérdidas por calor. Sin embargo, este concepto es útil para entender el comportamiento de transformadores reales.[9]

En la práctica, los transformadores se utilizan para transportar energía eléctrica eficientemente, reduciendo pérdidas en largas distancias mediante tensiones altas y ajustando el voltaje cerca de los puntos de consumo. En el ámbito doméstico, los transformadores reducen el voltaje de la red eléctrica para adaptarlo a los requerimientos de diversos electrodomésticos y dispositivos.[11]

2.2.6 Transformadores de distribución

Un transformador de distribución es aquel cuya potencia máxima es de 500 kVA y su voltaje nominal no supera los 23.000 V. Estos equipos se emplean principalmente para abastecer electricidad en bloques residenciales, comercios, almacenes y áreas rurales. Su selección depende del consumo eléctrico esperado y las características de la red de medio voltaje.[9]

2.2.7 Efectos de las Armónicas en Transformadores

Existen algunos efectos que se producen en los transformadores debido a cargas armónicas:



- **Calentamiento:** Las armónicas pueden causar un aumento en las pérdidas del núcleo y del cobre, lo que incrementa la temperatura del transformador.
- **Durabilidad:** La presencia de armónicas puede reducir la vida útil del transformador debido al estrés térmico y eléctrico adicional, degradando sus materiales aislantes, lo que puede llegar a producir cortocircuitos indeseados.

2.2.8 Normativas y Estándares

Es importante mencionar las normativas que regulan la calidad de la energía y los límites de distorsión armónica, como la IEEE 519 o la IEEE Std. C7.110, que establece directrices para la gestión de armónicas en sistemas eléctricos.[6]

2.2.9 Impactos de las corrientes armónicas en transformadores:

Las corrientes armónicas, generadas principalmente por cargas no lineales, tienen un impacto significativo en las pérdidas de los transformadores de distribución. Estas pérdidas se clasifican en pérdidas en carga y pérdidas en vacío. Las primeras incluyen las pérdidas resistivas y las pérdidas por corrientes de Eddy, mientras que las segundas están asociadas al comportamiento del núcleo magnético del transformador.[4]

Los armónicos incrementan las pérdidas por corrientes de Eddy de manera proporcional al cuadrado del orden del armónico y a la intensidad de la corriente. Esto se traduce en un sobrecalentamiento de los devanados y del núcleo, reduciendo así la eficiencia y vida útil del transformador. Adicionalmente, los voltajes armónicos contribuyen a las pérdidas en vacío, aumentando las pérdidas totales del transformador.

De manera general, las corrientes armónicas en los transformadores ocasionan los siguientes efectos:

- Incremento en las pérdidas por corrientes de Eddy y otras pérdidas extrañas.
- Calentamiento excesivo en los devanados y núcleos del transformador.
- El fenómeno conocido como de rating, hace que el transformador no pueda operar a su capacidad nominal sin exceder los límites de temperatura permisibles. El cálculo del factor K ayuda a ajustar el diseño del transformador



para soportar mejor estas condiciones, garantizando un rendimiento óptimo y prolongando su vida útil.

- Aumento en la distorsión armónica total (THD), lo que afecta la calidad de energía.

2.2.10 Pérdidas en transformadores debido a armónicos

Las armónicas generan pérdidas adicionales en los transformadores que pueden clasificarse en:

- **Pérdidas por corrientes de Eddy (PEC):** Aumentan con el cuadrado del orden armónico y afectan principalmente los devanados del transformador.
- **Otras pérdidas extrañas (POSL):** Afectan el núcleo del transformador y otros componentes.
- **Factor de pérdida armónica (FHL):** Es una medida que relaciona las pérdidas adicionales debido a los armónicos con las condiciones de carga nominal. Ayuda a evaluar el impacto de los armónicos en la eficiencia del transformador.

2.2.11 De-rating en transformadores:

Es la reducción de la capacidad operativa de un transformador debido a las pérdidas adicionales causadas por armónicos. [12]

2.2.12 Corrientes de Foucault o de Eddy

Las corrientes de Foucault, conocidas en la literatura anglosajona como *Eddy currents*, son corrientes inducidas en materiales conductores con cierta conductividad (σ) debido a la presencia de un flujo de campo magnético que varía con el tiempo.

Según la ley de Inducción de Faraday-Lenz, un flujo magnético variable genera un campo eléctrico (E), el cual, mediante la relación $J = \sigma E$, produce una distribución de corrientes J dentro del conductor. Estas corrientes inducidas son lo que se denomina corrientes de Foucault.



Aunque en muchos casos estas corrientes tienen efectos indeseables, como las pérdidas energéticas por efecto Joule en transformadores y motores, también poseen aplicaciones útiles. Por ejemplo, son fundamentales en tecnologías como los detectores de metales, los frenos magnéticos empleados en vehículos, o en mecanismos de estabilización para balanzas de alta precisión. [13]

2.2.13 Factor K:

El Factor K es una medida utilizada para evaluar el impacto de las corrientes armónicas en los transformadores. Representa la proporción entre las pérdidas adicionales generadas por las corrientes armónicas y las pérdidas por corrientes de Foucault en condiciones de carga no lineal. El cálculo del Factor K incluye los armónicos presentes en el sistema, ponderados según su orden y amplitud.[2], [12], [13]

El Factor K se utiliza para clasificar transformadores según su capacidad para manejar cargas no lineales. Por ejemplo, transformadores con K-4, K-13 o K-20 están diseñados para soportar niveles específicos de distorsión armónica sin sobrecalentarse.

El cálculo del Factor K es esencial para garantizar el buen funcionamiento de los transformadores de distribución en un entorno con cargas no lineales. La correcta evaluación y gestión de las armónicas contribuyen a mejorar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de los equipos.[12]

2.2.14 Clasificación de transformadores según Factor K

Los transformadores se clasifican según su capacidad para manejar cargas armónicas:[5]

- **K-1:** Para cargas lineales.
- **K-4:** Para cargas moderadas no lineales (iluminación, sistemas UPS filtrados).
- **K-13:** Para equipos de telecomunicaciones y computadoras.
- **K-20 o superiores:** Para cargas industriales críticas con altos niveles de armónicos, como variadores de velocidad y equipos médicos.



2.2.15 Relación entre el Factor K y la capacidad del transformador

Un incremento en el Factor K indica una mayor capacidad del transformador para soportar las pérdidas generadas por las corrientes armónicas, pero también refleja que está expuesto a un entorno con alta distorsión armónica. Esto puede reducir su capacidad operativa efectiva debido al aumento de pérdidas por calentamiento en el núcleo y los devanados. Por ejemplo, sistemas eléctricos sin filtros armónicos suelen presentar factores K más altos, lo que resulta en una disminución de la capacidad nominal del transformador (de rating).[8]

El diseño de transformadores para redes con alta distorsión armónica debe considerar un factor K adecuado. Esto implica optimizar características como la laminación del núcleo, para reducir las pérdidas por corrientes de Foucault, y el diseño de los devanados, para minimizar las pérdidas resistivas y térmicas. Los transformadores diseñados con un factor K más alto están mejor preparados para operar en sistemas con altas corrientes armónicas, garantizando su estabilidad, eficiencia y prolongando su vida útil en condiciones reales de operación.[13]

2.2.16 Aplicaciones del Factor K y el Análisis Armónico

El Factor K es una herramienta clave para evaluar la capacidad de un transformador de soportar las condiciones generadas por las corrientes armónicas. Este parámetro se calcula considerando la contribución de cada armónico presente en el sistema y su impacto en las pérdidas totales.[5]

Los Transformadores diseñados con un Factor K específico pueden operar de manera eficiente bajo condiciones de distorsión armónica, mitigando los riesgos de sobrecalentamiento y degradación prematura.

La identificación y cuantificación de los armónicos, junto con la estimación precisa del Factor K, tienen implicaciones directas en:

- El diseño de filtros armónicos para mitigar sus efectos.
- La optimización del diseño y operación de transformadores de distribución.



- El cumplimiento de normativas internacionales de calidad de energía, como la **IEEE C57.110**. [6]

2.2.17 Importancia de los Filtros Armónicos

El uso de filtros armónicos puede reducir significativamente el Factor K y, con ello, mejorar la eficiencia del transformador y disminuir el riesgo de sobrecalentamiento. En un caso de estudio que se detalla más adelante, el Factor K se redujo en un 34.32% al usar filtros armónicos. [13]

El uso de filtros armónicos, como los filtros pasivos, ha demostrado ser una estrategia eficaz para reducir las pérdidas adicionales causadas por armónicos. Estos dispositivos limitan la magnitud de los armónicos de mayor orden, disminuyendo el impacto en los transformadores. Los estudios de caso muestran que los filtros pueden reducir significativamente las pérdidas por efecto Joule y mejorar la capacidad operativa de los equipos eléctricos. [5]

2.2.18 Corrientes Armónicas y su Impacto en los Sistemas Eléctricos

El análisis de las corrientes armónicas en los sistemas eléctricos ha cobrado gran relevancia debido al aumento de dispositivos electrónicos y cargas no lineales en las redes de distribución modernas. Estas corrientes, introducen distorsiones en la forma de onda de la corriente y el voltaje, lo que provoca problemas significativos en la operación de los equipos eléctricos. Entre las principales consecuencias destacan las pérdidas adicionales por efecto Joule, el sobrecalentamiento de transformadores y una reducción en la eficiencia operativa del sistema eléctrico. [4]

En este contexto, el Factor K es una herramienta fundamental para evaluar la capacidad de los transformadores de distribución de soportar las condiciones generadas por corrientes armónicas. Este parámetro se calcula considerando los armónicos presentes en el sistema y su impacto en las pérdidas internas del transformador. Transformadores con un Factor K adecuado pueden operar de manera más eficiente y segura en presencia de cargas no lineales, reduciendo los efectos negativos de estas distorsiones. [2], [4]



2.2.18.1 Diferencias entre sistemas con y sin armónicos:

En sistemas eléctricos ideales, las formas de onda de voltaje y corriente son perfectamente sinusoidales. Sin embargo, en presencia de armónicos generados por cargas no lineales, estas formas de onda se distorsionan, lo que impacta el rendimiento de los transformadores.[5]

La distorsión armónica afecta tanto el diseño como la operación de los equipos eléctricos, incrementando las pérdidas totales y reduciendo la eficiencia del sistema.[5]

Según un caso de estudio, la impedancia armónica permite caracterizar el comportamiento de las fuentes armónicas y los componentes del sistema eléctrico en puntos críticos, como el punto de acoplamiento común (PCC). La impedancia armónica de un sistema eléctrico varía según la frecuencia de los armónicos presentes. Esta variación debe analizarse cuidadosamente para determinar las condiciones reales de operación y minimizar los impactos negativos en los transformadores.[14]

Existen dos enfoques principales para estimar la impedancia armónica:

1. **Métodos invasivos:** Requieren la inyección de perturbaciones controladas en la red para medir las respuestas del sistema. Aunque efectivos, estos métodos pueden interferir con la operación normal de la red.
2. **Métodos no invasivos:** Utilizan mediciones existentes de corriente y voltaje para calcular la impedancia sin afectar el sistema. Este enfoque es especialmente útil en redes de distribución sensibles a variaciones operativas.

El modelo tradicional de Norton se utiliza frecuentemente para representar la interacción entre las fuentes armónicas y la impedancia del sistema. Sin embargo, este modelo tiene limitaciones cuando no se dispone de información completa de los fasores de corriente y voltaje, como los ángulos de fase.

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado modelos mejorados que incorporan el análisis de la potencia compleja armónica y la impedancia. Estos modelos permiten estimar las contribuciones armónicas con mayor precisión y sin necesidad de información



completa de los fasores, ampliando su aplicabilidad en sistemas con alta distorsión armónica. La implementación de estos métodos en conjunto con algoritmos como el Análisis de Componentes Independientes (ICA) facilita la identificación de las fuentes dominantes de armónicos y su impacto en los equipos eléctricos.[14]

Es la oposición que presenta un sistema eléctrico al paso de corrientes de una frecuencia específica. Varía con la frecuencia y afecta directamente la amplitud de los armónicos en el sistema.[14]

2.2.19 Caso de estudio: Reducción del Factor K en transformadores mediante filtros armónicos

El estudio analizado evalúa el impacto del Factor K en la capacidad operativa de los transformadores de distribución y cómo la implementación de filtros armónicos puede mejorar su desempeño. Se centra en una instalación industrial donde se identificó una alta distorsión armónica debido a la presencia de cargas no lineales, lo que generaba sobrecalentamiento y reducción de la eficiencia en los transformadores. [5]

Como se menciona en el párrafo anterior, el estudio se llevó a cabo en una instalación industrial donde se identificó una alta presencia de armónicos en el sistema eléctrico, debido al uso de cargas no lineales, como variadores de velocidad, fuentes conmutadas y rectificadores. Esta distorsión generaba un estrés térmico considerable en los transformadores, reduciendo su capacidad operativa efectiva.

Las mediciones iniciales realizadas en la instalación evidenciaron:

- Un Factor K de 5.44 (según la clasificación del Factor K en transformadores, las cargas no lineales en este caso se debían a iluminación o sistemas UPS filtrados), lo que indicaba una carga con alto contenido armónico, afectando las pérdidas internas del transformador.
- Una distorsión armónica total de corriente (THD) del 42.93%, valor significativamente alto que impactaba la estabilidad del sistema eléctrico.
- Reducción de la capacidad nominal del transformador (de-rating), lo que limitaba su rendimiento y obligaba a operar a una carga inferior a su capacidad diseñada.



- Evidencias de sobrecalentamiento en los devanados y en el núcleo, confirmadas mediante mediciones térmicas en operación.

El estudio se basó en un enfoque experimental combinado con técnicas de simulación y medición en campo. Se llevaron a cabo las siguientes etapas:

2.2.19.1 Mediciones en el transformador:

Se utilizaron analizadores de calidad de energía para registrar las formas de onda de corriente y voltaje en el sistema para luego realizar un análisis espectral mediante la transformada de Fourier para identificar los armónicos dominantes en la señal y se calcularon los parámetros clave, como el THD de corriente y voltaje, así como la distribución de armónicos por orden de frecuencia.

2.2.19.2 Evaluación del impacto del Factor K:

Se determinaron las pérdidas adicionales generadas por los armónicos utilizando modelos matemáticos basados en normas como la IEEE C57.110. Luego se realizó un estudio térmico para evaluar el aumento de temperatura en los devanados y el núcleo del transformador.[13]

2.2.19.3 Implementación del filtro armónico:

Se diseñó e instaló un filtro armónico pasivo, configurado para atenuar los armónicos de mayor orden detectados en el análisis espectral y se seleccionó un filtro sintonizado de tipo LC, optimizado para reducir los armónicos más críticos identificados en la instalación.[13]

2.2.19.4 Mediciones posteriores y evaluación de resultados:

Se realizaron mediciones nuevamente bajo las mismas condiciones operativas para comparar los efectos de la implementación del filtro y finalmente se analizaron las nuevas formas de onda de corriente y voltaje, así como el comportamiento térmico del transformador.



Los resultados demostraron una mejora significativa en el desempeño del transformador tras la implementación del filtro armónico, tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 1: Tabla de resultados de la reducción del Factor K en transformadores mediante filtros armónicos [5]

Parámetro	Antes de filtro	Después del filtro	Reducción (%)
Factor K	5.44	1.20	34.32
TDH de corriente	42.93%	2.47%	94.24%
Temperatura del transformador	Alta (sobrecalentamiento)	Dentro de límites seguros	-

La tabla [1] permite entender que la reducción del factor K de 5.44 a 1.20 permitió que el transformador operara sin restricciones de carga, eliminando la necesidad de aplicar de rating. Así mismo, el THD de corriente disminuyó del 42.93% al 2.47%, reduciendo el impacto negativo de las cargas no lineales sobre el transformador por lo que se eliminó el sobrecalentamiento en los devanados y el núcleo, permitiendo una operación más eficiente y prolongando la vida útil del equipo. Finalmente, la implementación del filtro demostró que un adecuado diseño de mitigación de armónicos puede mejorar significativamente la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico sin necesidad de sobredimensionar los transformadores.

El caso de estudio valida la efectividad del uso de filtros armónicos pasivos como una solución viable para mitigar los efectos de los armónicos en transformadores de distribución. La reducción del Factor K y de la distorsión armónica total permitió mejorar la eficiencia del sistema, eliminar pérdidas innecesarias y optimizar la capacidad operativa del transformador.[5]

Este análisis resalta la importancia de realizar mediciones periódicas de calidad de energía, aplicar estrategias adecuadas de mitigación de armónicos y seleccionar transformadores con Factor K adecuado para entornos con cargas no lineales.



2.2.20 Caso de Estudio: Impacto de los Armónicos de Alta Frecuencia en Transformadores de Distribución

Este caso de estudio evalúa el impacto de los armónicos en el rango de 0 a 9 kHz en la operación de transformadores, determinando cómo estos armónicos afectan la temperatura, las pérdidas por corrientes de Eddy y la capacidad operativa del equipo.[4] Las mediciones realizadas en sistemas con inversores conectados a la red revelaron que los armónicos de alta frecuencia afectan significativamente el desempeño de los transformadores, aumentando el Factor K y acelerando su deterioro. Las condiciones iniciales identificadas fueron:

- Presencia de armónicos superiores a 2 kHz, los cuales no son considerados en los cálculos tradicionales del Factor K.
- Aumento del 33% en pérdidas por corrientes de Eddy, lo que genera sobrecalentamiento en los devanados y el núcleo del transformador.
- Reducción del 22% en la vida útil del transformador, atribuida al estrés térmico acumulado debido a los armónicos de alta frecuencia.
- Incremento del Factor K, lo que indica que el transformador está operando bajo condiciones de carga no ideales, con mayores pérdidas energéticas y menor eficiencia.

El estudio combinó mediciones en campo, simulación por software y modelos matemáticos para evaluar el impacto de los armónicos de alta frecuencia en los transformadores.

Así mismo, se usaron analizadores de calidad de energía con capacidad de medición hasta 9 kHz para registrar corrientes y voltajes en los puntos de acoplamiento común (PCC). Luego, se aplicó la Transformada de Fourier para descomponer las señales y cuantificar la contribución de cada armónico y se calculó la THD (Distorsión Armónica Total) extendida, considerando armónicos de mayor orden.[4]

En el cálculo del Factor K “extendido” se utilizó un método mejorado de cálculo del Factor K que integra armónicos superiores a los 50 primeros órdenes tradicionales.



Además, se comparó el Factor K tradicional con el Factor K extendido, revelando diferencias significativas en entornos con armónicos de alta frecuencia.

Finalmente, realizaron una evaluación de impacto en pérdidas del transformador por lo que se analizaron las pérdidas por corrientes de Eddy y por efecto Joule antes y después de considerar los armónicos de alta frecuencia. Se realizaron simulaciones térmicas para evaluar el aumento de temperatura en los devanados del transformador.

En la tabla [2], se logra apreciar una pequeña comparación al antes y después del análisis de armónicos de alta frecuencia.

Tabla 2: Resultados del Impacto de los Armónicos de Alta Frecuencia en Transformadores de Distribución [4]

Parámetro	Antes de Considerar Armónicos de Alta Frecuencia	Después de Considerar Armónicos de Alta Frecuencia	Cambio (%)
Factor K	4.8	6.2	+29.16%
THD de Corriente	19.7%	32.4%	+64.46%
Pérdidas por Corrientes de Eddy	Base	+33%	
Reducción de Vida Útil	Base	-22%	

Según esta tabla, el Factor K aumentó de 4.8 a 6.2, indicando que la presencia de armónicos de alta frecuencia genera condiciones más adversas para el transformador de lo que predicen los cálculos tradicionales. El THD de corriente incrementó en más de un 60%, lo que evidencia la necesidad de considerar armónicos de alta frecuencia en el análisis de calidad de energía.

Las pérdidas por corrientes de Eddy aumentaron un 33%, confirmando que los armónicos de alta frecuencia generan efectos acumulativos sobre la temperatura del transformador y se llegó a la conclusión de que la vida útil del transformador se redujo en un 22%, demostrando que el estrés térmico inducido por estos armónicos acelera su deterioro.



Este caso de estudio demuestra que el Factor K “tradicional” subestima el impacto de los armónicos de alta frecuencia en transformadores de distribución. La introducción de un Factor K extendido, que considere armónicos superiores a los 50 primeros órdenes, permitiría una mejor clasificación y selección de transformadores para operar en entornos con alta presencia de inversores y convertidores electrónicos de potencia.[4]

Asimismo, los resultados resaltan la necesidad de actualizar las normativas de calidad de energía para incluir mediciones de armónicos más allá del rango estándar, permitiendo diseñar estrategias de mitigación más efectivas y prolongar la vida útil de los transformadores en redes con generación distribuida.[4]

El análisis de los casos de estudio sobre el Factor K en transformadores de distribución revela que la presencia de armónicos en la red tiene un impacto significativo en la eficiencia y vida útil de estos equipos. En el primer estudio, se evidenció que un alto Factor K, producto de cargas no lineales como variadores de velocidad y fuentes conmutadas, provoca sobrecalentamiento y reducción de la capacidad operativa del transformador (de rating). La implementación de filtros armónicos pasivos permitió reducir el Factor K de 5.44 a 1.20, eliminando restricciones de carga y mejorando la estabilidad del sistema eléctrico. Además, la distorsión armónica total (THD) disminuyó en un 94.24%, lo que optimizó el desempeño térmico del transformador y prolongó su vida útil.[5]

Por otro lado, el segundo caso de estudio analizó el impacto de los armónicos de alta frecuencia (0-9 kHz), generados principalmente por inversores conectados a la red. Se encontró que estos armónicos no suelen ser considerados en el cálculo tradicional del Factor K, lo que lleva a subestimar las pérdidas térmicas en el transformador. Como resultado, se observó un incremento del Factor K de 4.8 a 6.2, un aumento del 33% en las pérdidas por corrientes de Eddy y una reducción del 22% en la vida útil del transformador. Estos hallazgos indican que el análisis convencional del Factor K podría no ser suficiente para evaluar transformadores expuestos a armónicos de alta frecuencia.[4]

Ambos estudios coinciden en que los armónicos aumentan el Factor K y reducen la capacidad operativa de los transformadores, pero también demuestran que la correcta selección de transformadores y la aplicación de estrategias de mitigación pueden optimizar su desempeño. La implementación de filtros armónicos es una solución efectiva



en casos donde predominan armónicos de baja frecuencia, mientras que el uso de un Factor K extendido podría ser necesario para evaluar con mayor precisión el impacto de armónicos de alta frecuencia.[2], [4]



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Seguidamente, se expone la descripción técnica del circuito X7 perteneciente a la subestación “El Chota”, dentro del área de concesión de la empresa EMELNORTE S.A., lugar donde se lleva a cabo el presente estudio. A continuación, se detalla la metodología empleada para la investigación y el desarrollo del análisis del Factor K en transformadores de distribución, incluyendo la descripción de los materiales utilizados, tanto en campo como en gabinete. Asimismo, se mencionan los equipos de medición y los softwares especializados empleados, la información técnica proporcionada por EMELNORTE S.A., y las ecuaciones matemáticas necesarias para la caracterización eléctrica y térmica en presencia de armónicos de los transformadores. Todo esto con el fin de establecer parámetros que permitan evaluar la adecuación de los transformadores existentes frente a las condiciones reales de operación del sistema.

3.1 Metodología

3.1.1 Enfoque o paradigma:

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos relacionados con la carga armónica y térmica en transformadores de distribución. Este paradigma permite una evaluación objetiva del comportamiento eléctrico y térmico mediante el uso de fórmulas, toma de datos por parte de EMELNORTE S.A. y modelación.

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizarán métodos tanto teóricos como aplicados, basados en análisis cuantitativo y mediciones en campo (mediciones entregadas por EMELNORTE), de acuerdo con la siguiente estructura:

3.1.1.1 Método documental:

Se recurrió a una revisión bibliográfica exhaustiva de fuentes primarias como artículos científicos, tesis académicas, normas internacionales y libros especializados en calidad de energía, transformadores y armónicos. En particular, se consultaron documentos como la norma IEEE C57.110, que establece los lineamientos para calcular el Factor K en



transformadores expuestos a corrientes armónicas, así como estudios aplicados en sistemas de distribución eléctrica con presencia significativa de cargas no lineales.[6] Los artículos analizados permitieron conocer de forma técnica los efectos de los armónicos en el calentamiento, las pérdidas internas y la reducción de vida útil de los transformadores de distribución, además de validar el uso del THD y del modelo extendido del Factor K como herramientas diagnósticas. Esta revisión documental sentó las bases teóricas y técnicas para el diseño metodológico y la interpretación de resultados del presente estudio

3.1.1.2 Método cuantitativo aplicado:

La investigación adopta un enfoque cuantitativo aplicado, debido a que se basa en la recolección, procesamiento y análisis de datos numéricos reales obtenidos de registros armónicos en la red eléctrica. A partir de archivos proporcionados por EMELNORTE, se analizaron corrientes armónicas hasta el orden 50, usando herramientas como Excel, para analizar indicadores como la distorsión armónica total (THD) y el Factor K de cada transformador evaluado.

El análisis cuantitativo permitió establecer valores exactos de impacto térmico y distorsión eléctrica, contribuyendo a una caracterización precisa de los fenómenos armónicos y su relación con el rendimiento de los transformadores de distribución. Este enfoque facilita la identificación de transformadores más afectados, proponiendo criterios objetivos para su dimensionamiento o sustitución.

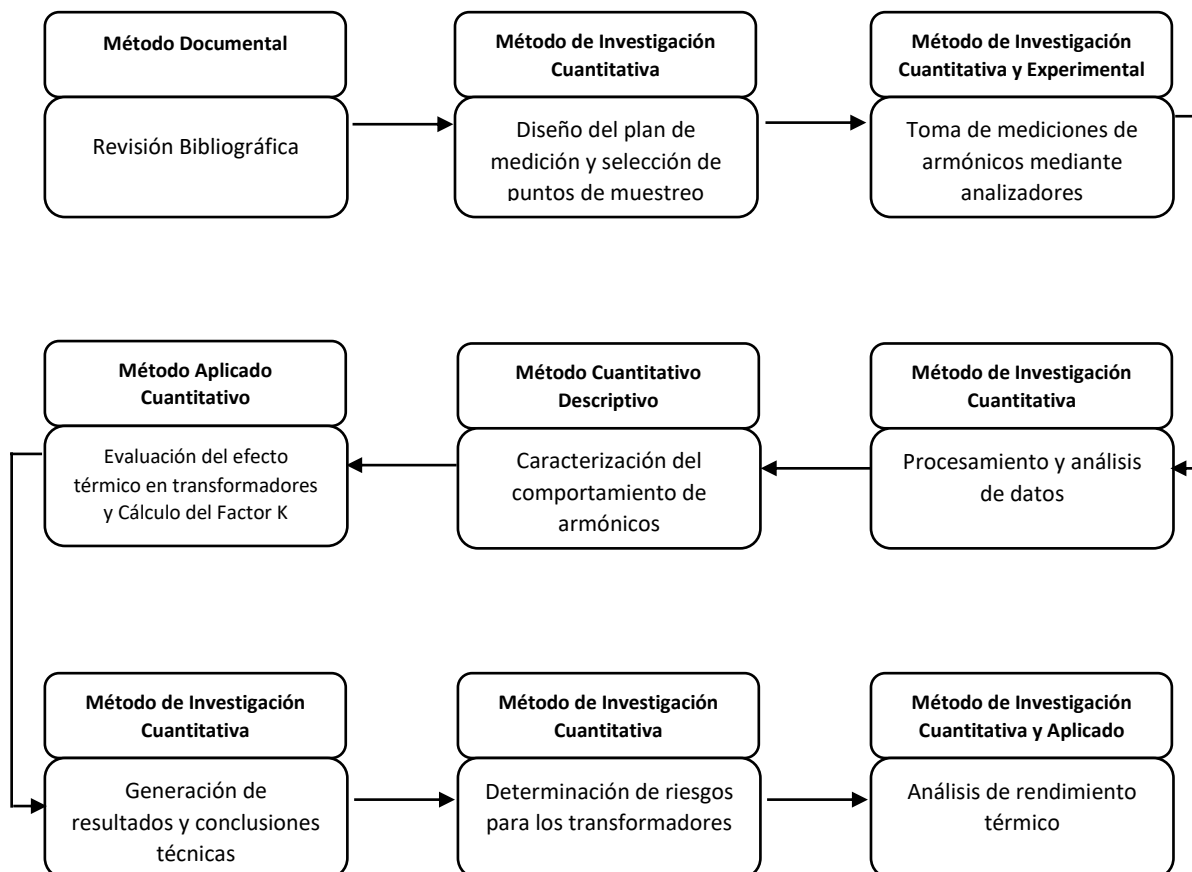
3.1.1.3 Método de simulación:

Se consideró el uso de simulaciones como complemento para validar los datos obtenidos en campo y modelar el comportamiento del sistema eléctrico ante distintos niveles de carga armónica. Con ayuda de software especializado como MATLAB, Excel y herramientas como CYME (opcionalmente), se construyeron modelos teóricos que permitieron simular escenarios con y sin distorsión armónica, y verificar cómo estas condiciones afectan el calentamiento y la eficiencia del transformador.



3.1.2 Tipo de investigación:

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca ofrecer una solución técnica concreta a una problemática existente en la operación de transformadores expuestos a corrientes armónicas. Además, se considera un estudio descriptivo y no experimental, pues no se manipulan variables, sino que se observan, analizan y procesan datos reales obtenidos directamente del circuito X7 de la subestación “El Chota”.



3.2 Procedimiento Integral

Para el desarrollo de este trabajo de investigación sobre la determinación del Factor K en transformadores de distribución del circuito X7, perteneciente al área de concesión de EMELNORTE S.A., se planteó un procedimiento técnico y metodológico sistemático, fundamentado en la recopilación, verificación, procesamiento y análisis de datos relacionados con la calidad de energía y las corrientes armónicas.



En primer lugar, se solicitó a EMELNORTE S.A. el acceso a la información técnica y registros de medición de calidad de energía en transformadores monofásicos y trifásicos del circuito en estudio, priorizando aquellos alimentadores con cargas predominantemente no lineales. Esta información incluyó el tipo de transformador, su nivel de potencia nominal, ubicación, historial de carga, y especialmente los datos de contenido armónico hasta el orden 50. Los archivos analizados fueron obtenidos desde equipos de medición instalados en puntos clave de la red, en formato Excel, con la colaboración del Departamento de Calidad de Energía de EMELNORTE.

Posteriormente, se procedió a la verificación técnica y estructuración de la base de datos armónicos. Se organizó la información en función de cada transformador evaluado, considerando la magnitud de las corrientes armónicas por orden, su distorsión total (THD), y el comportamiento de carga. Esta información fue interpretada a través del cálculo del Factor K, utilizando la fórmula establecida por la norma IEEE C57.110, que pondera los efectos térmicos de cada armónico en relación con su orden y magnitud. Para garantizar la precisión, el cálculo del Factor K se ejecutó desde el orden 1 hasta el 50, lo que permitió identificar no solo el nivel de distorsión, sino también la severidad del impacto sobre la integridad de los transformadores.[6]

A partir de los análisis, se evaluaron los efectos derivados de la presencia de armónicos, tales como el sobrecalentamiento del núcleo y los devanados, las pérdidas adicionales por corrientes de Eddy, y el desgaste físico progresivo de los materiales dieléctricos. Esta evaluación se realizó diferenciando los transformadores según su potencia nominal, permitiendo así determinar cuáles equipos tienen mayor vulnerabilidad frente a distintos niveles de contaminación armónica.

Finalmente, como parte del procedimiento integral, se elaborará un criterio técnico que permita clasificar los transformadores evaluados en función de su tolerancia a la distorsión armónica, identificando aquellos que podrían ser objeto de estudios posteriores de redimensionamiento. De este modo, la metodología propuesta no solo permite calcular el Factor K, sino también establecer parámetros de acción para mejorar la eficiencia operativa de la red de distribución.



3.3 Materiales, equipos y software

Para el desarrollo de este estudio se utilizarán normativas técnicas, herramientas digitales, equipos de medición especializados y software de análisis, expuestos en la tabla [3] a continuación:

Tabla 3: Tabla resumen de Equipos y Materiales para el desarrollo del presente estudio

Materiales de Campo	Materiales de Laboratorio	Equipos	Software
Fichas técnicas de transformadores	Normas IEEE / IEC	Analizador de calidad de energía Fluke 1748	Microsoft Excel
Registros horarios del sistema de medición	Artículos técnicos	Computadora portátil	Energy Analyze
Datos de consumo eléctrico del circuito X7	Manuales de cálculo	Computadora portátil	PQ Log

3.3.1 Regulación IEEE 57.110 - 2018

Base metodológica para el cálculo del Factor K en transformadores de distribución sometidos a corrientes armónicas. Esta norma proporciona la fórmula oficial para la determinación del factor K y clasifica el tipo de carga según el impacto térmico de los armónicos.[6]

3.3.2 Regulación IEEE Std 519-2014

Utilizada para la evaluación de los niveles de distorsión armónica, establece límites admisibles de THD para evaluar la calidad de energía en sistemas eléctricos, determinando si los valores medidos se encuentran dentro de los rangos permitidos para operación eficiente y segura de los transformadores de distribución y del sistema eléctrico en general.[3]

3.3.3 Regulación Nacional ARCONEL 009/24

Utilizada como documento de referencia para establecer los límites máximos permisibles de distorsión armónica de voltaje y armónicos individuales en transformadores de distribución. Esta regulación rige el cumplimiento técnico exigido a las empresas distribuidoras de electricidad en el Ecuador, incluyendo a EMELNORTE S.A., área de estudio de esta investigación.[15]



3.3.4 Clasificación del Factor K para transformadores de distribución

Tabla 4: Clasificación del Factor K para transformadores de distribución [16]

Tipo de carga	Factor K	Cantidad de carga
Lámparas incandescentes (sin dimmers de estado sólido), calefactores eléctricos resistivos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).	K – 1	Carga casi lineal
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado sólido	K – 4	Baja distorsión
	K – 9	Media distorsión
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada	K – 13	Alta distorsión
Servidores de computadores, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multi conductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores en equipos de inspección o prueba o para líneas de producción.	K – 20	Muy alta distorsión
Conectores multi conductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multi conductor para circuitos comerciales en oficinas, pequeños servidores.	K – 30	Distorsión extrema - carga no lineal
Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.	K – 40	

3.4 Análisis de datos armónicos

A continuación, se presenta un proceso detallado de evaluación y depuración de datos provenientes del sistema de medición instalado por EMELNORTE S.A. en el circuito X7 de la subestación “El Chota”.

En esta etapa se trabajó con los registros obtenidos mediante el analizador de redes Fluke 1748, los cuales incluyen series temporales de parámetros eléctricos armónicos durante una semana continua de medición, con una resolución de 10 minutos por registro, sumando un total de 1008 muestras por transformador.



Dado que el sistema bajo análisis opera en niveles de bajo voltaje (120 – 127 V) y que en algunos transformadores se identificaron niveles de carga muy bajos, se opta por tener en consideración ciertos límites en el análisis de armónicos de corriente ($THD I$) y armónicos individuales de corriente (I_h), ya que estos podrían inducir a errores o falsas interpretaciones.

Este análisis contempla también, la evaluación de niveles de distorsión armónica total de voltaje ($THD V$), el cumplimiento de límites normativos establecidos por la IEEE Std 519-2014 y la Resolución ARCONEL 009/24, la identificación de armónicos individuales de voltaje (V_h) que superan los valores permitidos, y la evaluación de tendencias horarias que permiten relacionar los picos de distorsión con el comportamiento típico de la demanda residencial o curva de demanda. Asimismo, se analiza el impacto de estos armónicos sobre el rendimiento de los transformadores y su capacidad operativa, como parte del proceso que conducirá al cálculo del Factor K.

3.4.1 Limitaciones en el análisis de armónicos de corriente y criterios de confiabilidad

En estudios de calidad de energía en sistemas de bajo voltaje, el análisis de los armónicos de corriente presenta particularidades que pueden derivar en falsos positivos, especialmente cuando los transformadores operan con corrientes fundamentales bajas. Esto ocurre porque el cálculo del $THD I$ y de los armónicos individuales I_h dependen directamente del valor de la corriente fundamental; por tanto, cuando esta es muy reducida, el $THD I$ tiende a incrementarse artificialmente sin representar realmente una distorsión importante en el sistema. [1]

Con el fin de garantizar la validez técnica del análisis, se evaluó el factor de carga o cargabilidad de todos los transformadores en estudio. Para ello, se utilizó como referencia el 10 % de la corriente nominal (I_{nom}) de acuerdo con prácticas recomendadas por IEEE Std 519-2014 y criterios ampliamente aceptados en análisis de armónicos en bajo voltaje. Este umbral permite identificar cuándo las mediciones de $THD I$ e I_h pueden considerarse confiables y cuándo pueden estar afectadas por corrientes fundamentales demasiado pequeñas. [1]



Se construyó la tabla [5] (factor de carga) donde se determina, para cada transformador, el porcentaje de tiempo en que la corriente fundamental superó dicho umbral. A partir de esta evaluación se identificó que:

- La mayoría de los transformadores presentan un factor de carga superior al 50 %, lo cual implica que sus armónicos de corriente sí son técnicamente confiables para el análisis.
- Un grupo reducido de transformadores mostró niveles de carga muy bajos, por lo que su *THD I* refleja valores altos pero no físicamente representativos. Estos casos fueron clasificados como no aptos para el estudio de armónicos de corriente.
- Cinco transformadores fueron catalogados como casos frontera, ya que si bien superan el umbral mínimo en ciertos intervalos, presentan comportamientos variables entre fases. Estos casos no fueron descartados, pero deben interpretarse con cautela.
- El neutro, al ser un sistema monofásico de fase partida, mostró corrientes significativas en varios transformadores, confirmando la presencia de desequilibrios y retorno de armónicos impares, fenómeno normal en bajo voltaje y relevante para el cálculo del Factor K.

Tabla 5: Análisis de carga en los transformadores

Transformador	Nivel de Potencia	Corriente nominal (A)	Límite (10% CN)	Factor de Carga >10% I-nom	Incumplimiento THD I		
					L1	L2	N
15155	5 Kva	20,83	2,08	100,00%	88,59%	99,60%	16,96%
15622	5kVA	20,83	2,08	3,08%	1,29%	0,60%	2,28%
15563	5kVA	20,83	2,08	76,09%	85,22%	91,87%	59,03%
14875	5kVA	20,83	2,08	8,13%	4,17%	0,10%	4,17%
14701	7,5kVA	31,25	3,13	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
15763	10kVA	41,67	4,17	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
15139	10kVA	41,67	4,17	15,67%	100,00%	86,21%	67,76%
15509	10kVA	41,67	4,17	8,63%	2,38%	2,58%	3,67%
14858	10kVA	41,67	4,17	100,00%	94,44%	99,80%	99,60%
14704	10kVA	41,67	4,17	16,37%	2,98%	6,85%	2,88%
15187	10kVA	41,67	4,17	79,96%	99,40%	65,28%	0,00%
15214	10kVA	41,67	4,17	71,43%	99,70%	89,78%	0,00%
15218	10kVA	41,67	4,17	67,76%	98,71%	99,21%	99,80%



15239	10kVA	41,67	4,17	89,19%	100,00%	100,00%	10,32%
15366	10kVA	41,67	4,17	99,90%	100,00%	99,90%	98,21%
15851	10kVA	41,67	4,17	100,00%	99,11%	98,91%	91,37%
15626	10kVA	41,67	4,17	2,98%	0,00%	7,74%	35,22%
15608	15kVA	62,5	6,25	100,00%	99,90%	100,00%	99,40%
15766	15kVA	62,5	6,25	57,24%	52,58%	52,98%	0,00%
15580	15kVA	62,5	6,25	58,43%	50,00%	54,17%	16,27%
15191	15kVA	62,5	6,25	49,11%	100,00%	100,00%	99,11%
14954	15kVA	62,5	6,25	100,00%	99,71%	100,00%	0,00%
14997	15kVA	62,5	6,25	0,00%	0,10%	0,00%	11,01%
15833	15kVA	62,5	6,25	94,44%	94,05%	93,65%	46,83%
15100	15kVA	62,5	6,25	100,00%	99,90%	99,60%	99,90%
15465	15kVA	62,5	6,25	97,92%	96,92%	96,53%	4,56%
15791	15kVA	62,5	6,25	0,00%	0,00%	0,00%	25,30%
15211	15kVA	62,5	6,25	0,00%	99,80%	99,70%	99,90%
15524	15kVA	62,5	6,25	65,67%	99,01%	96,92%	94,74%
15377	15kVA	62,5	6,25	100,00%	100,00%	99,40%	100,00%
15057	15kVA	62,5	6,25	96,23%	95,93%	0,00%	97,52%
15051	25kVA	104,17	10,42	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
15326	25kVA	104,17	10,42	100,00%	100,00%	95,83%	6,55%
14823	37,5kVA	156,25	15,63	100,00%	99,21%	100,00%	99,80%
15050	37,5kVA	156,25	15,63	0,00%	0,00%	0,00%	98,51%
14857	37,5kVA	156,25	15,63	13,39%	0,00%	99,50%	84,23%

3.4.2 Procesamiento de datos

Como se menciona en anteriores puntos, el procesamiento de datos se llevó a cabo mediante la sistematización de la información obtenida a partir de los registros de los analizadores de red Fluke 1748 instalados en distintos transformadores del circuito X7 de la subestación “El Chota”, perteneciente a EMELNORTE S.A. La información analizada corresponde a mediciones en intervalos de 10 minutos durante al menos una semana continua por transformador, lo que resultó en aproximadamente 1008 datos por variable medida ($THD I$, $THD V$, armónicos individuales, etc.) por transformador.

Cabe destacar que, por criterios de confiabilidad asociados a la medición del $THD I$ y de los armónicos individuales de corriente (I_h) en sistemas de bajo voltaje, estos parámetros no serán analizados de la misma manera ni se interpretarán con el mismo nivel de profundidad que los armónicos de voltaje, por lo expuesto con anterioridad ya que el tratamiento diferenciado de los armónicos de corriente respecto a los de voltaje



contribuye al cumplimiento del segundo objetivo específico, puesto que permite presentar al lector la naturaleza distinta de cada fenómeno: mientras los armónicos de voltaje se analizan como indicadores de la calidad de energía del sistema, los armónicos de corriente se enfocan en su impacto físico directo sobre el transformador, particularmente en términos de impacto térmico. Esta distinción fortalece la caracterización integral del comportamiento armónico desde una perspectiva tanto operativa como física.[17]

Con el fin de evitar conclusiones erróneas o el uso inadecuado de información que no refleje fielmente el comportamiento eléctrico de los transformadores estudiados, los armónicos de corriente únicamente son utilizados para el cálculo del Factor K (con sus respectivos parámetros y limitadores), indicador directamente relacionado con el impacto térmico que dichos armónicos producen en los devanados del transformador. Este tratamiento metodológico garantiza que los datos armónicos se empleen solo en aquellos análisis en los que su interpretación es físicamente válida, manteniendo la rigurosidad técnica del estudio y evitando resultados que puedan comprometer la objetividad de la investigación.[8]

Inicialmente, se procedió con la organización y limpieza de los archivos Excel, descartando columnas innecesarias y estructurando los datos armónicos de voltaje por fases y por orden armónico. Posteriormente, se aplicaron filtros y funciones condicionales para detectar valores atípicos, y se establecieron los umbrales de análisis conforme a la normativa ARCONEL 009/24, que define el cumplimiento de la calidad del producto eléctrico cuando el 95% o más de los valores medidos se mantienen por debajo de los límites establecidos.

Se agruparon los valores de $THD V$ y armónicos individuales de voltaje según franjas horarias, para identificar patrones temporales de distorsión. Esto permitió observar que, en la mayoría de los transformadores, existe una franja horaria entre las 18h00 y las 06h00, donde los niveles de distorsión armónica tienden a incrementarse de forma notable con un comportamiento crítico entre las 18h00 y las 00h00, tal como como se puede observar en la figura [2]. Este comportamiento se relaciona con el aumento de carga residencial que es proporcional a la demanda del sistema y a su vez, al uso de dispositivos



con componentes no lineales, que tienden a generar armónicos de bajo orden, especialmente el tercer armónico de voltaje, el cual se identificó como el principal contribuyente a la contaminación armónica en el sistema.

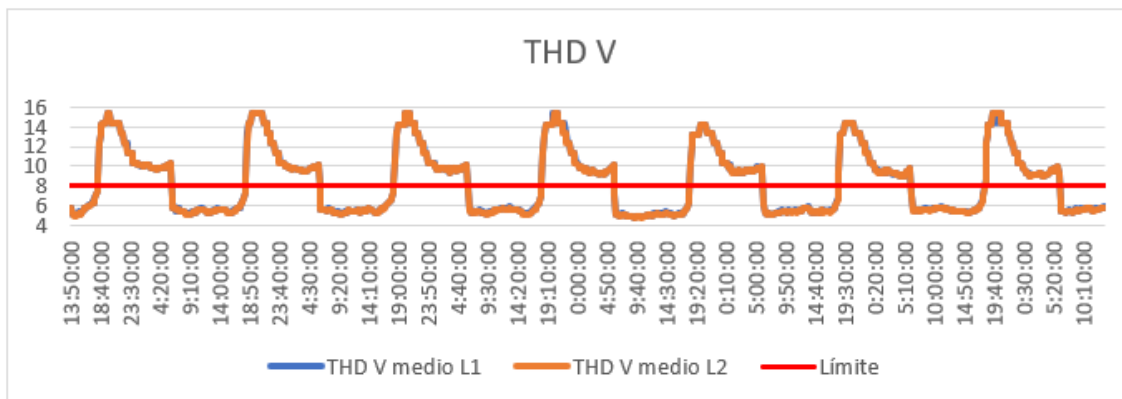


Figura 2: Tendencia armónica del THD V

Durante el análisis se observó que la tendencia de generación del tercer armónico de voltaje se mantiene en la mayoría de los transformadores independientemente de su distancia con respecto a la subestación según la figura [3], lo que indica que la principal causa no es la ubicación física, sino el comportamiento de carga, tipo de carga instalada, y en menor medida, la capacidad del transformador, en otras palabras, la problemática es intrínseca a la red.

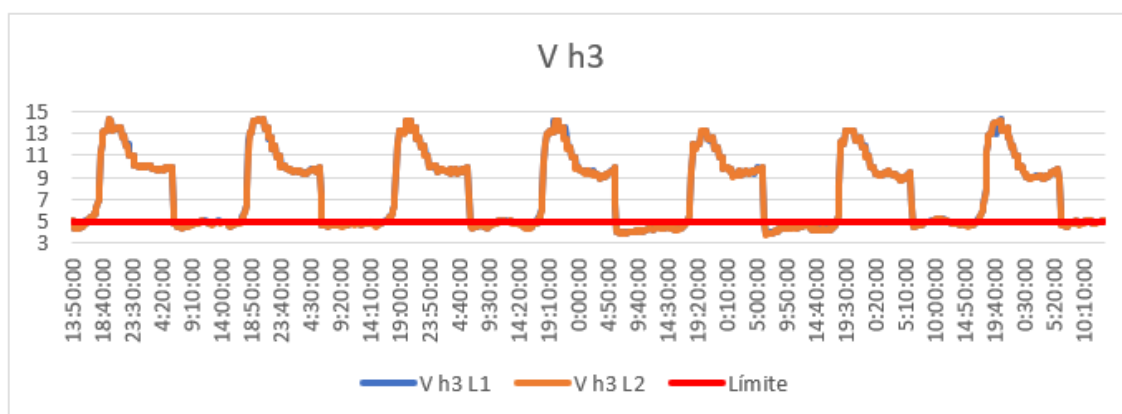


Figura 3: Tendencia armónica del V h3



3.4.3 Influencia del tercer armónico de voltaje en transformadores de distribución: observaciones y tendencias

Durante el análisis de los transformadores de distribución evaluados, se identificó que el tercer armónico de voltaje presenta un comportamiento particularmente significativo en términos de distorsión. A diferencia de los armónicos de orden superior, que se verificaron estén dentro de los límites permitidos por las normativas vigentes, el armónico 3 mostró un nivel de incidencia más elevado en varios transformadores, incluso superando los umbrales establecidos en algunos casos. Esto coincide con observaciones previas que señalan al tercer armónico como uno de los más persistentes y contaminantes en redes de bajo voltaje.

Inicialmente se planteó que factores como la distancia entre el transformador y la subestación podrían tener una relación directa con la magnitud de la distorsión. Sin embargo, al analizar los datos se evidenció que la distancia no es necesariamente determinante tal como se puede observar en la tabla [6], ya que transformadores ubicados a diferentes distancias presentan niveles de tercer armónico similares. En contraste, se observó una correlación más clara con la potencia nominal de los transformadores: aquellos con mayor capacidad (por ejemplo, 25 kVA) tendieron a ser menos susceptibles a niveles elevados de distorsión armónica total, en comparación con transformadores de menor potencia (como los de 5 o 10 kVA), lo que sugiere una mayor robustez ante cargas no lineales.

Tabla 6: Tabla de incumplimiento del 3er armónico de voltaje con relación a la distancia de la subestación al transformador

Transformador	Potencia	L1	L2	Distancia del transformador a la subestación en km
15622	5kVA	56,35%	56,15%	1,42
15580	15kVA	0,00%	0,00%	1,79
14954	15kVA	0,00%	0,00%	2,44
15326	25kVA	26,49%	25,79%	3,69
14997	15kVA	0,00%	0,00%	3,83
15851	10kVA	0,00%	0,00%	3,95
15465	15kVA	10,52%	7,34%	4,84
15626	10kVA	0,00%	0,00%	5,97
15524	15kVA	8,43%	8,23%	7,01



14823	37,5kVA	0,00%	0,00%	8,74
15833	15kVA	0,00%	0,00%	8,87
14857	37,5kVA	0,00%	0,00%	9,31
14858	10kVA	0,00%	0,00%	10,30
14701	7,5kVA	0,00%	0,00%	10,49
15051	25kVA	50,20%	50,20%	10,79
15050	37,5kVA	50,69%	50,60%	10,79
15608	15kVA	54,76%	54,86%	10,81
15057	15kVA	50,30%	49,80%	11,16
15377	15kVA	53,87%	52,68%	11,44
14704	10kVA	0,00%	0,00%	12,19
15366	10kVA	52,48%	51,79%	12,90
14875	5kVA	0,00%	0,00%	14,11
15763	10kVA	59,82%	59,42%	15,19
15100	15kVA	52,88%	52,38%	15,37
15766	15kVA	61,81%	61,31%	15,90
15139	10kVA	62,50%	62,40%	16,40
15791	15kVA	55,65%	55,16%	17,00
15563	5kVA	52,48%	52,48%	17,10
15187	10kVA	56,15%	55,06%	17,15
15191	15kVA	53,57%	55,06%	17,18
15155	5kVA	53,17%	53,37%	20,91
15211	15kVA	52,98%	53,17%	24,17
15218	10kVA	55,85%	57,14%	24,73
15239	10kVA	53,27%	53,27%	24,94
15214	10kVA	53,87%	52,68%	24,95
15509	10kVA	59,52%	57,94%	25,08

El armónico 3 es particularmente problemático debido a que en sistemas trifásicos sus componentes o fases se suman directamente en el conductor neutro, lo que puede generar corrientes elevadas y sobrecalentamiento en este. Además, al ser un armónico de orden bajo, no se atenúa fácilmente en el sistema, a diferencia de los armónicos de orden superior.

Por otro lado, armónicos como el 5.º, 7.º, 9.º y superiores, aunque están presentes, tienden a mantener valores considerablemente más bajos, generalmente dentro de los límites normativos establecidos por regulaciones como la IEEE Std 519-2014 o la Regulación ARCONEL 009/24. Esto se debe a la impedancia del sistema, la acción de filtrado natural



de transformadores y cableado, y al hecho de que muchas cargas modernas incluyen mecanismos de atenuación parcial de armónicos.

Este comportamiento justifica que, en el análisis de distorsión armónica individual de voltaje, se preste especial atención al armónico 3, no solo por ser el más representativo en cuanto a nivel de distorsión, sino también por su efecto acumulativo y térmico sobre el sistema y los transformadores de distribución. La caracterización detallada de este armónico permitirá identificar equipos más vulnerables y zonas con mayor exposición a distorsión, ayudando a plantear estrategias de mitigación más efectivas.

Asimismo, el número de clientes asociados o el Factor de Carga del transformador no mostró una influencia significativa sobre el comportamiento del armónico 3. Transformadores con cargas muy dispares, desde uno hasta más de cincuenta usuarios conectados, mantuvieron un patrón de distorsión similar, lo que sugiere que la causa principal de esta distorsión no radica en la cantidad de carga sino posiblemente en el tipo de cargas conectadas o en el diseño interno del transformador.

Finalmente, se identificó una franja horaria crítica entre las 18h00 y las 06h00, con especial énfasis entre las 18h00 y las 00h00 como se menciona anteriormente, donde los niveles de distorsión se incrementan notablemente. Esta tendencia temporal indica una relación directa con los hábitos de consumo residencial, que tienden a elevarse en la noche debido al uso intensivo de electrodomésticos y sistemas electrónicos con componentes no lineales, los cuales son generadores comunes de armónicos de orden bajo, como en este caso el tercero.

Para facilitar la caracterización y el análisis cuantitativo, se utilizó Microsoft Excel para:

- Calcular porcentajes de incumplimiento y Factor de Carga.
- Detectar y excluir valores atípicos.
- Agrupar armónicos individuales por orden y calcular su cumplimiento conforme al límite del 5% para bajo voltaje según ARCONEL 009/24.

Este procesamiento permitió generar tablas resumen, gráficas comparativas entre transformadores y visualizar claramente la tendencia armónica dominante del sistema.



3.4.4 Evaluación temporal de distorsión armónica

Con el fin de analizar el comportamiento armónico en función del tiempo, se realizó una evaluación temporal de los niveles de distorsión armónica total de voltaje ($THD V$) y del tercer armónico de voltaje ($V h_3$) a partir de las 1008 mediciones obtenidas durante una semana completa de registro, con una frecuencia de muestreo de 10 minutos, anteriormente expuesto. Este análisis permitió identificar franjas horarias críticas en las que se presentan picos de distorsión, así como verificar la estabilidad o variabilidad del fenómeno armónico a lo largo del día.

Los resultados muestran una tendencia marcada de incremento en los niveles de $THD V$ y $V h_3$ durante el periodo nocturno, especialmente entre las 18h00 y las 06h00, alcanzando sus valores máximos en el intervalo de 18h00 a 00h00. Este comportamiento coincide con las horas de mayor demanda residencial o la demanda del sistema, donde el uso de electrodomésticos y dispositivos electrónicos con componentes no lineales es más frecuente. Dichos equipos son generadores comunes de armónicos, en particular de orden bajo como el tercero, contribuyendo significativamente a la distorsión observada.

Se evidenció, además, que los periodos diurnos —especialmente entre las 06h00 y las 16h00— presentan niveles considerablemente más bajos de distorsión, lo cual sugiere una menor presencia de cargas no lineales durante estas horas, reafirmando que el comportamiento armónico está estrechamente ligado a la demanda del sistema antes ya mencionada.

Este análisis temporal resulta fundamental para caracterizar la influencia horaria de la carga sobre los niveles armónicos en la red de distribución, permitiendo además identificar intervalos de tiempo críticos en que los transformadores están expuestos a mayores esfuerzos térmicos y eléctricos derivados de la contaminación armónica, lo cual es clave para la posterior determinación del Factor K y para establecer criterios técnicos de operación y mantenimiento de estos equipos.



Tabla 7: Resumen del comportamiento del HD V y el V h3

Transformador	Potencia	THD V						V h3						Número de clientes	Distancia Transformador Subestación (km)
		% De incumplimiento		THD V máximo		THD V mínimo		% De incumplimiento		V h3 máximo		V h3 mínimo			
		L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2		
15622	5kVA	50,10%	50,10%	16,50	16,50	4,87	4,83	56,35%	56,15%	15,10	15,10	3,71	3,71	2	1,42
15580	15kVA	0,00%	0,00%	3,68	2,70	1,50	1,02	0,00%	0,00%	3,24	2,35	0,96	0,91	8	1,79
14954	15kVA	0,00%	0,00%	2,57	2,60	1,24	1,16	0,00%	0,00%	2,46	2,57	0,52	0,58	49	2,44
15326	25kVA	16,57%	16,37%	10,10	10,10	3,91	3,78	26,49%	25,79%	9,54	9,52	2,31	2,25	42	3,69
14997	15kVA	0,00%	0,00%	2,48	2,49	1,13	1,17	0,00%	0,00%	2,28	2,28	0,45	0,45	2	3,83
15851	10kVA	0,00%	0,00%	3,14	3,11	1,31	1,27	0,00%	0,00%	2,31	1,88	0,59	0,51	0	3,95
15465	15kVA	0,00%	0,00%	5,59	5,60	2,51	2,45	10,52%	7,34%	5,48	5,48	1,59	1,55	9	4,84
15626	10kVA	0,00%	0,00%	2,97	3,00	1,34	1,37	0,00%	0,00%	1,14	1,16	0,29	0,29	0	5,97
15524	15kVA	0,00%	0,00%	5,74	5,69	2,61	2,62	8,43%	8,23%	5,56	5,51	1,74	1,74	20	7,01
14823	37,5kVA	0,00%	0,00%	5,09	4,91	1,74	1,91	0,00%	0,00%	3,16	3,57	0,71	0,85	21	8,74
15833	15kVA	0,00%	0,00%	5,15	5,16	1,62	1,65	0,00%	0,00%	2,79	2,79	0,93	0,93	1	8,87
14857	37,5kVA	0,00%	0,00%	4,40	4,43	1,90	1,91	0,00%	0,00%	3,58	3,62	0,92	0,92	15	9,31
14858	10kVA	0,00%	0,00%	4,43	4,52	1,76	1,80	0,00%	0,00%	4,12	4,31	1,02	1,16	12	10,30
14701	7,5kVA	0,00%	0,00%	3,91	4,02	1,61	1,60	0,00%	0,00%	3,82	4,00	0,96	0,96	1	10,49
15051	25kVA	19,74%	18,95%	10,20	10,20	3,78	3,74	50,20%	50,20%	9,51	9,58	2,65	2,71	59	10,79
15050	37,5kVA	28,08%	27,38%	10,75	10,76	4,05	4,02	50,69%	50,60%	10,65	10,66	3,10	3,05	59	10,79
15608	15kVA	49,50%	49,80%	12,30	12,30	4,25	4,24	54,76%	54,86%	11,60	11,60	3,17	3,17	0	10,81
15057	15kVA	19,74%	15,97%	10,35	9,49	0,00	0,00	50,30%	49,80%	10,15	9,36	0,00	0,00	45	11,16
15377	15kVA	49,80%	49,80%	13,20	13,20	4,40	4,40	53,87%	52,68%	14,20	14,20	3,96	3,86	25	11,44
14704	10kVA	0,00%	0,00%	4,35	4,16	1,64	1,64	0,00%	0,00%	4,44	4,17	0,91	0,94	10	12,19
15366	10kVA	50,00%	49,90%	13,20	13,20	4,54	4,42	52,48%	51,79%	12,10	12,00	3,33	3,28	7	12,90
14875	5kVA	0,00%	0,00%	4,55	4,55	1,79	1,77	0,00%	0,00%	4,32	4,34	1,12	1,12	1	14,11
15763	10kVA	50,20%	50,20%	13,50	13,50	4,55	4,58	59,82%	59,42%	12,70	12,70	3,49	3,54	1	15,19
15100	15kVA	48,81%	48,61%	13,71	13,67	4,65	4,61	52,88%	52,38%	13,38	13,33	3,63	3,62	53	15,37
15766	15kVA	50,40%	50,30%	15,40	15,40	4,68	4,68	61,81%	61,31%	15,40	15,40	4,68	4,68	3	15,90
15139	10kVA	50,60%	50,60%	15,40	15,40	4,77	4,78	62,50%	62,40%	14,20	14,20	3,61	3,57	1	16,40
15791	15kVA	50,00%	50,00%	16,06	16,11	4,81	4,81	55,65%	55,16%	15,77	15,80	3,72	3,71	5	17,00



Transformador	Potencia	THD V						V h3						Número de clientes	Distancia Transformador Subestación (km)
		% De incumplimiento		THD V máximo		THD V mínimo		% De incumplimiento		V h3 máximo		V h3 mínimo			
		L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2		
15563	5kVA	50,40%	50,40%	16,50	16,50	4,85	4,85	52,48%	52,48%	14,00	14,00	3,54	3,54	6	17,10
15187	10kVA	50,00%	50,00%	15,93	15,83	4,88	4,82	56,15%	55,06%	15,68	15,56	3,76	3,73	10	17,15
15191	15kVA	49,60%	49,70%	15,40	15,40	4,66	4,69	53,57%	55,06%	14,10	14,30	3,57	3,77	14	17,18
15155	5kVA	50,30%	50,40%	16,50	17,50	4,86	4,92	53,17%	53,37%	14,50	15,00	3,59	3,63	1	20,91
15211	15kVA	50,20%	50,20%	15,50	15,50	4,96	4,99	52,98%	53,17%	14,00	14,00	3,86	3,87	17	24,17
15218	10kVA	50,40%	50,40%	18,00	18,00	4,81	4,80	55,85%	57,14%	15,80	16,10	3,54	3,73	22	24,73
15239	10kVA	50,20%	50,30%	15,50	15,60	5,14	5,13	53,27%	53,27%	14,10	14,20	4,01	3,95	1	24,94
15214	10kVA	50,30%	50,20%	15,50	15,50	5,05	5,00	53,87%	52,68%	14,20	14,20	3,96	3,86	10	24,95
15509	10kVA	64,09%	63,99%	15,40	15,40	4,84	4,83	59,52%	57,94%	14,30	14,30	3,86	3,80	6	25,08



3.4.5 Análisis general del comportamiento del THD V y $V h_3$

En la tabla [7], se resumen las características de distorsión armónica de voltaje ($THD V$) y del tercer armónico de voltaje ($V h_3$) en sus fases (L_1 y L_2) y neutro (N) para 36 transformadores del circuito X7 de la subestación “El Chota”. A partir del análisis, pueden destacarse los siguientes puntos clave:

3.4.6 Alta presencia de incumplimiento del THD V

La mayoría de los transformadores presentan niveles de incumplimiento superiores al 50% del total de mediciones (1008 por fase), es decir, más del 50% de los registros superan el límite permitido del 8% de $THD V$ establecido por la ARCONEL 009/24 para sistemas de bajo voltaje. Esto indica un problema generalizado de calidad de energía, especialmente en los transformadores de menor potencia (5 y 10 kVA).

Este análisis contribuye al cumplimiento del segundo objetivo específico, al caracterizar de forma cuantitativa el comportamiento armónico de los transformadores mediante la verificación de su cumplimiento con los límites de calidad de energía establecidos por la ARCONEL 009/24.

3.4.7 Tendencia descendente del THD V con el aumento de la potencia

Se observa que los transformadores de 25 kVA y 37,5kVA presentan los menores porcentajes de incumplimiento: por ejemplo, el transformador 15326 presenta un 16,57% y 16,37% de incumplimiento en L_1 y L_2 respectivamente, mientras que uno de 5 kVA como el 15155 tiene más del 50%. Esto confirma que transformadores con mayor capacidad presentan mejor comportamiento frente a distorsiones armónicas, probablemente debido a su mejor diseño interno o mayor robustez ante cargas no lineales.

Este análisis también es parte del cumplimiento del segundo objetivo específico, esto debido a que la robustez de los transformadores de potencia nominal tienen características físicas que contrarrestan la presencia de armónicos en el equipo.[18]



3.4.8 Valores elevados y constantes del 3er armónico (V_{h3})

En paralelo, el tercer armónico de voltaje (V_{h3}) también presenta altos porcentajes de incumplimiento, superando el límite del 5% de distorsión individual en la mayoría de los transformadores. En particular, transformadores como el 15763 (10 kVA) y el 15139 (10 kVA) presentan más del 62% de incumplimiento, lo que reafirma que el V_{h3} es el componente armónico dominante en el sistema, causado comúnmente por cargas residenciales no lineales (cargadores, TVs, computadoras, iluminación LED, etc.).

3.4.9 Distancia a la subestación no es determinante directa

Aunque se incluye la distancia entre cada transformador y la subestación, no se observa una correlación directa clara entre dicha distancia y los niveles de distorsión. Por ejemplo:

- El transformador 15155, ubicado a más de 20 km, tiene altos niveles de THD V y V_{h3} .
- El transformador 15326, ubicado a solo 3,6 km, también presenta valores considerables de distorsión. Esto refuerza la idea de que la distorsión es provocada principalmente por las cargas conectadas al sistema, no por la ubicación geográfica per se.

3.4.10 Influencia del número de clientes es limitada

Aunque algunos transformadores abastecen solo 1 o 2 clientes (como el 15155 o 15622), presentan altos niveles de distorsión. Esto sugiere que no es la cantidad de usuarios, sino el tipo de carga instalada (cargas electrónicas no lineales) la que incide en la generación de armónicos. También se destaca que incluso transformadores con más de 50 clientes (como el 15191) no presentan una mejora sustancial, lo cual implica que la diversificación de la carga no garantiza una reducción armónica si la mayoría son cargas no lineales.

3.4.11 Relación entre distorsión armónica y características del transformador

En el presente estudio se ha analizado el comportamiento del $THD V$ y del tercer armónico individual (V_{h3}) en diversos transformadores de distribución ubicados en el circuito extenso del alimentador “El Chota”. Uno de los principales objetivos de este análisis fue identificar si existen patrones o relaciones entre el nivel de distorsión



armónica y ciertas características técnicas de los transformadores, tales como la potencia nominal, la cantidad de clientes conectados y su posible distancia respecto a la subestación.

Los resultados evidencian que no existe una relación directa ni consistente entre la distancia de los transformadores a la subestación y los niveles de distorsión armónica registrados, ya que transformadores ubicados a diferentes distancias presentan comportamientos armónicos similares. Esto permite descartar la influencia significativa de la distancia como único factor determinante en la contaminación armónica de estos equipos.

Por otro lado, la cantidad de clientes conectados sí parece influir parcialmente en los niveles de $THD V$, como se observa en el caso del transformador 15509, el cual presenta un mayor porcentaje de incumplimiento comparado con otros transformadores de igual potencia (25 kVA) pero con menor carga asociada. Esto sugiere que la carga total y el tipo de equipos conectados pueden influir en la generación de armónicos, particularmente cuando se trata de usuarios residenciales con artefactos no lineales. [19]

Sin embargo, al observar los niveles del tercer armónico de voltaje ($V h_3$), los resultados indican que estos no necesariamente siguen la misma tendencia. Por ejemplo, transformadores con diferente cantidad de clientes, como el 15326 y el 15051, muestran niveles de $V h_3$ similares, lo que evidencia que este armónico puede estar más vinculado a características intrínsecas del sistema de distribución que a la carga individual de cada transformador.[20] Casos como el transformador 15505, que no presenta incumplimientos en $THD V$, pero sí en $V h_3$, refuerzan esta hipótesis.

Finalmente, se destaca el caso del transformador 15580, el cual no presenta incumplimientos ni en $THD V$ ni en $V h_3$, manteniéndose consistentemente por debajo del límite normativo del 5%. Este transformador constituye un caso aislado de operación limpia, que puede servir como punto de referencia para comparaciones futuras.

El análisis de variables como la distancia del transformador a la subestación, el número de clientes conectados y la potencia nominal —observándose que esta última influye principalmente en el $THD V$ y no de forma determinante en el $V h_3$ — contribuyó al



cumplimiento del segundo objetivo específico, al permitir una caracterización más integral del comportamiento armónico y descartar factores que no presentan una relación directa con la distorsión observada.[21]

En resumen, se concluye que la potencia del transformador y la cantidad de clientes tienen una cierta influencia en la distorsión armónica total, mientras que los armónicos individuales, especialmente el tercero, parecen depender de factores más amplios relacionados con la red y no exclusiva de la carga directamente o ubicación física del transformador.

Si bien existe una relación física entre armónicos de corriente y de voltaje, en sistemas de distribución en bajo voltaje dicha relación no es necesariamente proporcional ni directa, por lo que ambos fenómenos fueron analizados con objetivos distintos.

El análisis de armónicos de voltaje tiene como finalidad caracterizar la calidad del suministro, no el estrés térmico del transformador. Por lo que todo análisis en lo referente a estos armónicos, solamente son variables auxiliares que ayudan con el cumplimiento del segundo objetivo específico, puesto que permite la caracterización de la red y los efectos que produce en esta en lo referente a calidad de energía. De otra forma, los armónicos de corriente constituyen la causa directa del incremento de pérdidas térmicas en los transformadores, su análisis detallado como indicador de calidad de energía puede resultar poco representativo en sistemas de bajo voltaje con niveles de carga reducidos.[22] En este contexto, el análisis armónico de voltaje permite caracterizar de forma más robusta el comportamiento global del sistema antes mencionado, mientras que los armónicos de corriente se emplean exclusivamente para la evaluación térmica mediante el Factor K.[23]



Tabla 8: Matriz de operación de variables

Variable	Unidad de Medida	Técnica	Instrumento	Frecuencia de medición	Observación
THD I	%	Análisis de datos	Analizador de calidad	Por transformador	Según registros
THD V	%	Análisis de datos	Analizador de calidad	Por transformador	Según registros
Factor K	Adimensional	Cálculo matemático	Hoja de cálculo Excel	Por transformador	Hasta armónico 15
Pérdidas por corrientes Eddy	W o %	Cálculo estimado	Modelo teórico (IEEE)	Estimación teórica	Comparativa post análisis

3.5 Ecuación para el cálculo del Factor K

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 * h^2 \quad (1)$$

Donde:

K : Factor K adimensional.

I_h : Corriente armónica de orden h .

I_1 : Corriente fundamental.

h : # de orden del armónico (3, 5, 7, 9, etc).

Para la determinación del Factor K en los transformadores de distribución analizados, se empleará la ecuación [1], establecida en la normativa IEEE Std C57.110, la cual relaciona el contenido armónico de la corriente con el incremento de pérdidas térmicas en los devanados del transformador. Esta expresión fue seleccionada debido a que permite cuantificar de manera directa el impacto de las corrientes armónicas sobre el calentamiento del transformador, considerando explícitamente el efecto del orden armónico y su contribución relativa respecto a la corriente fundamental.[16]



CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos de calidad de energía del circuito extenso del alimentador “El Chota”, así como de la aplicación de los procedimientos metodológicos descritos en el Capítulo III. El estudio se enfoca en la evaluación del comportamiento armónico del sistema y en la determinación del Factor K de los transformadores de distribución analizados, considerando sus condiciones de operación dentro del área de concesión de EMELNORTE S.A.

4.1 Procedimiento matemático del cálculo del Factor K

El cálculo del Factor K se fundamenta en la relación entre las corrientes armónicas que circulan por el transformador y el incremento de pérdidas térmicas que estas producen, especialmente las pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Eddy) en los devanados. Desde el punto de vista teórico, dichas pérdidas no dependen únicamente de la magnitud de la corriente, sino también del orden armónico de cada componente. [7]

El procedimiento matemático parte de la descomposición espectral de la corriente, donde la corriente total se expresa como la suma de la corriente fundamental y sus armónicos. Cada armónico se caracteriza por:

- Su magnitud eficaz.
- Su orden armónico (h).

La ecuación [1] del Factor K expuesta en el capítulo previo, pondera cada corriente armónica elevando su orden al cuadrado, ya que las pérdidas por corrientes de Eddy aumentan proporcionalmente a h^2 . Este término refleja que los armónicos de mayor orden generan pérdidas térmicas significativamente mayores, aun cuando su magnitud sea menor que la de los armónicos de orden bajo.[7]

Desde el punto de vista matemático, el procedimiento consiste en:



1. Normalizar cada corriente armónica con respecto a la corriente fundamental, evitando que el resultado dependa del nivel absoluto de carga.

La normalización de cada corriente armónica respecto a la corriente fundamental constituye el primer paso del cálculo del Factor K y permite expresar el contenido armónico en términos relativos, eliminando la influencia del nivel absoluto de carga. Este procedimiento garantiza que el valor obtenido represente únicamente la composición armónica de la corriente y no su magnitud, lo que resulta esencial para determinar un Factor K comparable entre distintos intervalos de operación. De esta manera, se asegura que el indicador calculado refleje de forma objetiva la severidad armónica real del transformador.[8], [12]

2. Elevar al cuadrado el orden de cada armónico, incorporando el efecto térmico no lineal asociado a la frecuencia.

La elevación al cuadrado del orden de cada armónico introduce una ponderación que representa el incremento no lineal de las pérdidas térmicas asociado a frecuencias superiores. Este procedimiento traduce matemáticamente el efecto físico de las corrientes armónicas sobre el calentamiento del transformador, otorgando mayor peso a los armónicos de orden elevado dentro del cálculo. Así, el Factor K resultante incorpora de manera directa la contribución térmica de cada componente armónica, permitiendo evaluar su impacto acumulativo sobre el equipo.[8][12]

3. Sumar las contribuciones ponderadas de todos los armónicos considerados en el análisis.

La suma de las contribuciones ponderadas de todos los armónicos considerados consolida el efecto conjunto de las corrientes armónicas en un único parámetro cuantitativo: el Factor K . Este procedimiento integra la información espectral en una métrica representativa del estrés térmico total al que se encuentra sometido el transformador. Como resultado, se obtiene un indicador que sintetiza el comportamiento armónico del sistema y permite determinar de forma práctica la



incidencia térmica de las cargas no lineales en condiciones reales de operación.[12]

El resultado es un índice adimensional, el Factor K , que representa el nivel de severidad térmica que producen las corrientes armónicas en comparación con una carga puramente sinusoidal.

Teóricamente:

- Un Factor K cercano a 1 indica que la corriente es predominantemente fundamental, con impacto armónico despreciable.
- Valores crecientes del Factor K evidencian una mayor contribución de armónicos, especialmente de orden bajo pero con peso térmico significativo.
- El uso de esta formulación permitió evaluar el efecto acumulativo de varios armónicos simultáneamente, en lugar de analizar cada armónico de forma aislada.

4.1.1 Cálculo del Factor K

Desde el punto de vista metodológico, la expresión utilizada para el cálculo del Factor K (ecuación [1]) resulta especialmente adecuada para estudios basados en registros temporales, como el desarrollado en la presente investigación. Esto se debe a que el Factor K puede ser evaluado de forma independiente para cada intervalo de medición, permitiendo posteriormente su análisis mediante valores representativos. En este estudio, el análisis se centró en los valores máximos del Factor K obtenidos por transformador, por considerarse eventos críticos que reflejan condiciones potenciales de mayor impacto térmico. [6]

El uso de dicha ecuación fue particularmente pertinente, ya que el objetivo del análisis no se limitó a la identificación de la presencia de armónicos, sino a la evaluación de su incidencia térmica real sobre los transformadores de distribución bajo condiciones de carga. A diferencia de otros indicadores de calidad de energía, el Factor K integra en un único parámetro el efecto acumulativo de los armónicos de corriente, ponderando su impacto conforme aumenta el orden armónico. Este enfoque es coherente con el



fenómeno físico asociado al incremento de pérdidas por corrientes parásitas y efecto Joule en los devanados, los cuales se intensifican con armónicos de mayor orden.[6], [15]

Para el cálculo del Factor K , se consideraron exclusivamente los armónicos impares de corriente hasta el orden 15. Esta decisión se fundamenta en que, en sistemas de distribución en bajo voltaje, los armónicos pares suelen presentar amplitudes despreciables en condiciones normales bajo carga, mientras que los armónicos de orden superior al 15 mostraron una contribución mínima en los registros analizados.[20]

La implementación de la ecuación [2] se realizó directamente en hojas de cálculo de Microsoft Excel, lo que permitió procesar de manera sistemática los registros temporales disponibles, correspondientes a mediciones realizadas cada 10 minutos durante un período continuo de siete días. Este entorno de cálculo facilitó el análisis del Factor K por intervalo de tiempo, así como la aplicación de criterios de confiabilidad asociados al nivel de carga del transformador. En particular, se incorporaron filtros y condiciones de exclusión para evitar resultados no representativos derivados de corrientes fundamentales muy bajas, las cuales pueden inducir valores artificialmente elevados del Factor K sin una correspondencia física real.

$$K = \sum_{h=2n+1}^{15} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 * h^2 \quad (2)$$

En este contexto, la aplicación de la ecuación [2] del Factor K no solo es consistente con los estándares internacionales vigentes, sino que también proporcionó una herramienta práctica, reproducible y adecuada para evaluar el comportamiento térmico de transformadores de distribución en sistemas de bajo voltaje, como los analizados en el presente estudio.

A continuación, la tabla [9] presenta los resultados del cálculo del Factor K operacional para los transformadores analizados, considerando registros temporales de corriente armónica obtenidos durante el período de monitoreo. Para cada transformador se muestran los valores máximos del Factor K calculados de manera independiente en las líneas L1, L2 y el neutro (N), así como el Factor K representativo del transformador,



definido como el mayor valor obtenido entre dichos conductores. Este enfoque permite identificar las condiciones más severas de impacto térmico asociadas a la presencia de armónicos de corriente, independientemente de la magnitud instantánea de carga.

Tabla 9: Cálculo del Factor K en los transformadores de distribución del área de concesión

Transformador	Nivel de potencia	Factor K			Factor K operacional
		L1	L2	N	
15155	5kVA	3,86	2,56	3,07	4
15622	5kVA	0,18	0,11	0,20	1
14875	5kVA	0,20	0,03	0,19	1
15563	5kVA	5,97	5,32	0,35	6
14701	7,5kVA	0,01	0,00	0,01	1
15139	10kVA	0,69	0,38	0,00	1
15509	10kVA	0,79	1,37	0,75	2
14858	10kVA	6,40	5,38	11,40	12
14704	10kVA	4,00	1,20	3,28	5
15187	10kVA	2,26	3,21	0,00	4
15214	10kVA	5,43	2,64	0,00	6
15218	10kVA	6,10	5,37	4,59	7
15239	10kVA	0,00	0,50	0,00	1
15366	10kVA	7,94	1,10	2,04	8
15851	10kVA	3,05	4,60	4,58	5
15626	10kVA	0,07	0,15	0,00	1
15608	15kVA	1,45	2,01	0,00	3
15580	15kVA	3,87	2,96	1,40	4
15766	15kVA	2,96	1,35	0,00	3
15191	15kVA	0,00	1,98	0,80	2
14954	15kVA	1,55	2,15	0,00	3
14997	15kVA	0,00	0,00	0,98	1
15833	15kVA	0,32	0,84	9,20	10
15100	15kVA	1,07	0,84	5,18	6
15465	15kVA	2,84	4,16	0,00	5
15791	15kVA	0,00	0,00	0,31	1
15211	15kVA	1,98	2,11	0,99	3
15524	15kVA	1,40	0,60	0,59	2
15377	15kVA	2,19	1,39	7,01	8
15057	15kVA	0,69	0,00	9,55	10
15051	25kVA	0,35	0,00	1,66	2
15326	25kVA	0,00	1,23	0,00	2



14823	37,5kVA	2,00	3,63	2,99	4
14857	37,5kVA	0,00	1,49	0,11	2
15050	37,5kVA	0,00	0,00	0,00	0

De manera global, los resultados indican que la mayoría de los transformadores presentan valores de Factor K relativamente bajos, concentrándose principalmente entre $K = 1$ y $K = 6$. Este comportamiento sugiere que, en condiciones normales de carga, los armónicos de corriente presentes en el sistema no generan un incremento térmico significativo que comprometa la capacidad nominal de los transformadores.

El Factor K máximo fue seleccionado debido a que representa el escenario de mayor estrés térmico armónico observado durante el período de medición. Dicho valor no necesariamente coincide con la condición de máxima carga, ya que la presencia de corrientes armónicas depende principalmente de la naturaleza no lineal de las cargas y de su operación temporal, como se ha venido mencionando previamente. Considerando que estas condiciones pueden repetirse e incluso intensificarse en períodos de observación más prolongados, el valor máximo de K se considera representativo para la evaluación del transformador.

Sin embargo, se identifican casos puntuales con valores elevados de Factor K , alcanzando valores del orden de $K = 8, 10$ y hasta 12, lo cual evidencia la presencia de cargas no lineales con una contribución armónica relevante, particularmente asociada a armónicos impares de bajo orden. Estos resultados contribuyen directamente al cumplimiento del segundo y tercer objetivo específico, ya que el análisis de la distribución de valores del Factor K permite caracterizar el comportamiento armónico real de los transformadores evaluados y, a partir de ello, establecer un criterio técnico para su clasificación térmica. La identificación tanto de escenarios de bajo impacto como de casos puntuales con elevados niveles armónicos valida el uso del Factor K como indicador de impacto físico sobre el transformador y sustenta su determinación bajo un enfoque conservador, alineado con la evaluación del desempeño frente a cargas no lineales.[21]



4.1.2 Diferencias entre líneas y neutro

Un aspecto relevante que se observa en la tabla [9] es que el valor máximo del Factor K no siempre se presentó en las líneas de fase (L1 o L2), sino que en varios transformadores el neutro registró los valores más elevados. Esto es consistente con el comportamiento típico de sistemas monofásicos de fase partida, donde los armónicos triplen (especialmente el 3er armónico) tienden a sumarse aritméticamente en el neutro.[24]

Transformadores como el 14858, 15833, 15057 y 15377 muestran valores significativamente altos de Factor K en el neutro, aun cuando las líneas presentan valores moderados. Este fenómeno confirma que el neutro se convierte en un conductor crítico desde el punto de vista térmico, aun cuando el nivel de carga aparente del transformador no sea extremo. Este análisis contribuye al cumplimiento del segundo objetivo específico, al evidenciar el papel del neutro en la concentración de corrientes armónicas y su impacto térmico, lo que fortalece la caracterización del comportamiento armónico del sistema y del tercer objetivo específico en la correcta determinación del Factor K desde una perspectiva física y operativa.[25]

4.1.3 Relación entre potencia nominal y Factor K

No se observa una correlación directa entre la potencia nominal del transformador y el valor del Factor K . Transformadores de baja potencia (5 kVA y 10 kVA) presentan valores de Factor K comparables, e incluso superiores, a los de transformadores de 15 kVA, 25 kVA y 37,5 kVA.

Este resultado refuerza el criterio de que el Factor K depende principalmente del tipo de carga conectada y su contenido armónico, y no de la potencia nominal del transformador ni de la magnitud absoluta de la corriente. Desde el punto de vista de la investigación, este hallazgo contribuye al cumplimiento del segundo objetivo específico al caracterizar el comportamiento de las corrientes armónicas en función de la naturaleza de la carga, y del tercer objetivo específico al sustentar técnicamente la determinación del Factor K como un indicador independiente del nivel de potencia del equipo, validando su aplicación comparativa entre transformadores de distintas capacidades.[20]



4.1.4 Transformadores con Factor $K \approx 1$

Un grupo importante de transformadores presenta valores de Factor K iguales o cercanos a 1, lo cual indica que el contenido armónico de corriente es bajo o despreciable en dichos equipos. En estos casos, el comportamiento térmico del transformador es prácticamente equivalente al de una carga lineal, y no se espera un incremento adicional de pérdidas por armónicos.

Estos resultados son coherentes con escenarios de baja penetración de cargas electrónicas o con períodos prolongados de baja actividad en el sistema. Desde la perspectiva de la investigación, este comportamiento aporta evidencia para el cumplimiento del segundo objetivo específico al caracterizar condiciones donde la distorsión armónica de corriente es mínima, y simultáneamente respalda el tercer objetivo específico al confirmar que el procedimiento de cálculo del Factor K permite distinguir operativamente entre regímenes de carga lineales y no lineales, validando su uso como indicador del impacto térmico real en los transformadores evaluados.[10]

4.1.5 Casos críticos o frontera

Los transformadores que alcanzan valores de Factor K superiores a 8 deben considerarse como casos críticos o de atención prioritaria, ya que indican eventos donde la distorsión armónica puede generar pérdidas adicionales significativas en los devanados.

Si bien estos valores no se presentan de forma permanente, su aparición en intervalos específicos demuestra que el sistema está expuesto a condiciones operativas con elevado impacto armónico que pueden repetirse en redes de bajo voltaje con alta variabilidad de carga. Este comportamiento contribuye al cumplimiento del segundo objetivo específico al evidenciar la presencia y severidad de corrientes armónicas en escenarios de operación bajo carga, y al tercer objetivo específico al validar, mediante resultados cuantitativos, la capacidad del Factor K para identificar intervalos de mayor impacto térmico potencial en los transformadores analizados.[8]



4.2 Análisis comparativo entre la potencia activa máxima y la potencia asociada al Factor K máximo

Con el objetivo de evaluar la relación entre la magnitud de la carga y el contenido armónico de corriente reflejado mediante el Factor K , se elaboró la tabla [10] comparativa que presenta, para cada transformador analizado, la potencia activa máxima registrada durante el período de medición y la potencia correspondiente al intervalo en el cual se obtuvo el Factor K máximo.

Tabla 10: Relación entre la potencia máxima y la potencia en el intervalo del Factor K máximo.

Transformador	Nivel de potencia	Potencia máxima	Potencia K máx.
15155	5kVA	7556,68	3067,76
15622	5kVA	2901,14	1205,54
14875	5kVA	1823,01	196,02
15563	5kVA	1786,75	803,35
14701	7,5kVA	245,03	245,03
15139	10kVA	4491,21	1127,78
15509	10kVA	4126,28	294,03
15763	10kVA	0,00	0,00
14858	10kVA	7344,97	2438,52
14704	10kVA	2685,51	343,04
15187	10kVA	4463,42	2140,20
15214	10kVA	5095,61	445,95
15218	10kVA	10125,55	2842,33
15239	10kVA	865,94	591,14
15366	10kVA	1947,49	452,81
15851	10kVA	5822,48	2163,08
15626	10kVA	931,13	664,99
15608	15kVA	3328,42	2510,08
15580	15kVA	6792,19	872,30
15766	15kVA	5978,69	686,08
15191	15kVA	1617,19	725,28
14954	15kVA	13856,85	4859,40
14997	15kVA	450,85	0,00
15833	15kVA	28563,45	0,00
15100	15kVA	16590,10	12541,00
15465	15kVA	7888,94	2953,08
15791	15kVA	510,43	395,09
15211	15kVA	5356,32	1403,52



15524	15kVA	4461,48	1050,68
15377	15kVA	11442,83	7782,10
15057	15kVA	10968,60	8909,57
15051	25kVA	14612,51	10127,51
15326	25kVA	10784,19	3605,84
14823	37,5kVA	6610,69	595,25
14857	37,5kVA	5075,15	1791,94
15050	37,5kVA	28,25	28,25

El análisis de los resultados evidenció que no existe una relación directa ni proporcional entre la cantidad de carga y el valor del Factor K. En múltiples transformadores se observó que la potencia activa máxima ocurre en intervalos distintos a aquellos en los que se presenta el valor máximo del Factor K, lo cual confirma que el contenido armónico de corriente, y por ende el estrés térmico adicional sobre el transformador, depende principalmente del tipo de carga conectada y no de su magnitud.

En particular, se identificaron transformadores con potencias máximas elevadas y valores relativamente bajos de Factor K, así como casos inversos en los que, bajo condiciones de carga moderada o incluso reducida, se obtuvieron valores elevados de Factor K. Este comportamiento confirma que la presencia de armónicos está asociada principalmente a la naturaleza no lineal de las cargas —como equipos electrónicos, iluminación con balastos electrónicos y fuentes conmutadas— y no al nivel de demanda. Este hallazgo contribuye al cumplimiento del segundo objetivo específico al caracterizar el origen y comportamiento de las corrientes armónicas en condiciones bajo carga, y al tercer objetivo específico al sustentar, con evidencia cuantitativa, la determinación del Factor K como indicador representativo del impacto térmico derivado de dichas corrientes.

4.2.1 Casos especiales: potencia activa nula y Factor K elevado

El comportamiento observado en los intervalos donde se registran valores elevados del Factor K puede explicarse a partir de la composición cuadrática de la corriente efectiva que circula por los devanados del transformador. Matemáticamente, la corriente total se expresa como la suma RMS de sus componentes armónicas,



$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad (3)$$

lo que implica que cada armónico contribuye energéticamente al esfuerzo eléctrico independientemente de su fase. Las pérdidas en cobre del transformador, proporcionales al cuadrado de la corriente,

$$P_{cu} = R * \sum_{h=1}^n I_h^2 \quad (4)$$

evidencian que la presencia de corrientes armónicas incrementa directamente la disipación térmica aun cuando la corriente fundamental —y por tanto la potencia activa transferida— sea reducida. Esta relación explica los casos en los que se obtienen valores elevados de Factor K en intervalos de baja potencia activa: el indicador no refleja la energía suministrada a la carga, sino el aumento relativo de pérdidas asociado a la distribución espectral de la corriente. Desde esta perspectiva, el Factor K actúa como una ponderación térmica del contenido armónico, coherente con los resultados experimentales que muestran estrés adicional en el transformador sin una correspondencia directa con la magnitud de carga. Estos resultados y su desarrollo analítico contribuyen directamente al cumplimiento de los objetivos específicos segundo y tercero de la investigación. Por un lado, la interpretación matemática de las corrientes armónicas y su relación con las pérdidas térmicas permite caracterizar con mayor precisión el comportamiento armónico presente en los transformadores, cumpliendo el objetivo de análisis de sus efectos físicos. Por otro, la vinculación entre dichos fenómenos y el cálculo del Factor K sustenta técnicamente la determinación de este indicador, reforzando el objetivo orientado a evaluar su magnitud bajo condiciones de carga.[18]

Lejos de representar una inconsistencia, estos casos refuerzan el planteamiento central del estudio: el Factor K es independiente de la cantidad de carga y está gobernado por el contenido armónico de la corriente, incluso bajo condiciones de baja o nula potencia activa.

En este estudio, el uso de la potencia activa tuvo como propósito evaluar si existía una relación directa entre la magnitud de la carga y el valor del Factor K . El análisis



comparativo de estos parámetros permitió descartar dicha relación, evidenciando que la severidad armónica —reflejada en el Factor K — no depende del nivel de demanda energética, sino de la naturaleza de las cargas conectadas. Este enfoque permitió aislar el efecto armónico de la simple magnitud de carga, fortaleciendo la interpretación de los resultados obtenidos.

4.2.2 Implicaciones técnicas de los resultados

Los resultados obtenidos permitieron afirmar que la evaluación del Factor K basada únicamente en condiciones de máxima carga podría conducir a conclusiones incompletas o erróneas. El análisis por intervalos temporales y la selección del valor máximo del Factor K como parámetro representativo resultan metodológicamente adecuados, ya que consideran escenarios que, aunque no coincidan con la máxima demanda, pueden repetirse en la operación normal del sistema y generar efectos térmicos acumulativos sobre los transformadores.

Asimismo, esta comparación justificó plenamente la decisión metodológica de no vincular el Factor K a un único estado de carga, sino tratarlo como un indicador asociado al tipo de uso del transformador y a la variabilidad de las cargas no lineales conectadas al sistema de bajo voltaje.

En síntesis, la comparación entre la potencia activa máxima y la potencia correspondiente al intervalo de Factor K máximo demuestra que la severidad armónica no guarda una relación directa con la magnitud de la carga, validando el uso del Factor K como un parámetro independiente para la evaluación térmica de transformadores de distribución. Este análisis sustenta de forma objetiva la hipótesis del estudio y aporta un criterio técnico sólido para la selección y clasificación de transformadores en entornos con alta penetración de cargas no lineales. Este análisis confirma que la severidad armónica evaluada mediante el Factor K es independiente de la magnitud de la carga, validando su determinación a partir de intervalos representativos del comportamiento real del transformador. Con ello se cumple el objetivo específico 3, al sustentar técnicamente el cálculo del Factor K , y se refuerza el objetivo específico 2, al caracterizar el impacto físico de los armónicos en la operación del equipo.



4.3 Selección del Factor K por nivel de potencia

La Tabla [11] resume el valor del Factor K representativo asignado a cada transformador, junto con su respectivo nivel de potencia nominal. A partir de los valores máximos obtenidos durante el período de monitoreo, se adoptó un criterio de clasificación por rangos de Factor K , con el fin de seleccionar un valor único y conservador aplicable a todos los transformadores de un mismo nivel de potencia.

Este enfoque permite estandarizar la evaluación térmica de los transformadores, evitando que la selección del Factor K dependa exclusivamente del comportamiento individual observado durante un período limitado de medición. En consecuencia, el Factor K seleccionado para cada nivel de potencia corresponde al mayor valor representativo identificado dentro de ese grupo, aun cuando algunos transformadores presenten valores iguales o cercanos a $K = 1$. Esta selección precisa de manera técnica el cumplimiento del tercer objetivo, al materializar la determinación del Factor K mediante un criterio comparativo y conservador sustentado en los datos analizados, garantizando que el valor adoptado refleje el escenario de mayor impacto armónico posible dentro de cada nivel de potencia. [21]

Tabla 11: Ajuste del valor de Factor K para cada transformador según su nivel de potencia

Transformador	Nivel de potencia	Factor K operacional	Factor K
15155	5kVA	4	9
15622	5kVA	1	
14875	5kVA	1	
15563	5kVA	6	
14701	7,5kVA	1	1
15139	10kVA	1	13
15509	10kVA	2	
14858	10kVA	12	
14704	10kVA	5	
15187	10kVA	4	
15214	10kVA	6	
15218	10kVA	7	



15239	10kVA	1	
15366	10kVA	8	
15851	10kVA	5	
15626	10kVA	1	
15608	15kVA	3	13
15580	15kVA	4	
15766	15kVA	3	
15191	15kVA	2	
14954	15kVA	3	
14997	15kVA	1	
15833	15kVA	10	
15100	15kVA	6	
15465	15kVA	5	
15791	15kVA	1	
15211	15kVA	3	
15524	15kVA	2	
15377	15kVA	8	
15057	15kVA	10	
15051	25kVA	2	4
15326	25kVA	2	
14823	37,5kVA	4	4
14857	37,5kVA	2	
15050	37,5kVA	0	

4.3.1 Análisis del criterio adoptado

El criterio adoptado responde a una visión preventiva y de largo plazo del desempeño de los transformadores de distribución. Si bien varios equipos presentan un Factor K bajo, lo que indicaría un contenido armónico reducido en el período analizado, la experiencia operativa demuestra que las condiciones de carga en sistemas de bajo voltaje son altamente variables, y que la incorporación futura de cargas no lineales puede modificar sustancialmente el perfil armónico del sistema.

Por esta razón, la asignación de un Factor K común por nivel de potencia busca anticiparse a escenarios operativos más exigentes, garantizando que los transformadores puedan operar de forma segura ante posibles incrementos de distorsión armónica, sin comprometer su vida útil ni su desempeño térmico.[20]



4.3.1.1 Aplicación del Factor K por nivel de potencia

Con base en los resultados obtenidos, se observa que:

En transformadores de 5 kVA, aunque algunos equipos presentan valores de K cercanos a 1, se identifican casos con valores superiores, por lo que se adopta un Factor K conservador para todo el grupo.

En transformadores de 10 kVA y 15 kVA, se registran los valores más elevados de Factor K , lo que justifica la selección de factores mayores para estos niveles de potencia.

En transformadores de 25 kVA y 37,5 kVA, los valores de Factor K resultan más homogéneos y moderados; no obstante, se mantiene el criterio de selección por grupo para asegurar uniformidad en el diseño y operación.

Este enfoque evita la coexistencia de transformadores con diferentes capacidades térmicas dentro de un mismo nivel de potencia, lo cual podría generar inconsistencias en mantenimiento, planificación y reposición de equipos.

4.4 Interpretación de resultados

La selección de un Factor K por nivel de potencia cumple directamente con el tercer objetivo de la investigación, orientado a evaluar el impacto de los armónicos sobre el comportamiento térmico de los transformadores de distribución y proponer criterios técnicos que permitan mejorar su desempeño operativo.

Al adoptar un Factor K común y conservador, se contribuye a:

- Reducir el riesgo de sobrecalentamiento prematuro.
- Mejorar la confiabilidad del sistema de distribución.
- Facilitar estrategias de mantenimiento preventivo.
- Prolongar la vida útil de los transformadores, independientemente de variaciones temporales en el perfil de carga.

Este criterio no implica que todos los transformadores operen permanentemente bajo condiciones armónicas severas, sino que establece un margen de seguridad técnica frente



a escenarios operativos cambiantes. De este modo, el Factor K deja de ser únicamente un indicador de medición y se convierte en una herramienta de planificación y gestión de activos, alineada con prácticas modernas de calidad de energía y confiabilidad en sistemas de bajo voltaje.[20]

4.4.1 Observaciones técnicas derivadas del análisis

4.4.1.1 El THD V en el contexto del Factor K

Los análisis del THD de voltaje y de los armónicos individuales de voltaje constituyen la base técnica para el cumplimiento del segundo objetivo específico, ya que los resultados obtenidos permitieron caracterizar cuantitativamente el comportamiento armónico de los transformadores bajo condiciones de carga. A partir de estos análisis se identificaron niveles significativos de distorsión, patrones temporales de incremento armónico y porcentajes de incumplimiento respecto a la normativa vigente, evidenciando una presencia generalizada de perturbaciones en la calidad de energía. Esta información no solo describe el estado armónico del sistema, sino que también permite comprender su magnitud y recurrencia, aportando un sustento técnico sólido para evaluar sus implicaciones en el desempeño de los transformadores.[16]

4.4.1.2 Comportamiento armónico del conductor neutro

El análisis de los registros evidenció que, en varios transformadores evaluados, el conductor neutro presenta niveles de carga armónica superiores a los observados en ambas fases. Este comportamiento se asocia principalmente a la presencia de armónicos triples, los cuales se suman aritméticamente en el neutro, incrementando su esfuerzo térmico. De esta forma, el neutro se consolida como un elemento crítico dentro del análisis armónico de transformadores de distribución en sistemas de bajo voltaje.

Este resultado aporta al cumplimiento del segundo objetivo específico al caracterizar la distribución de las corrientes armónicas y sus efectos físicos en el transformador, destacando el papel crítico del conductor neutro en el comportamiento armónico del sistema.[16]



4.4.1.3 Implicaciones térmicas en transformadores con Factor K elevado

En los casos donde el Factor K alcanzó valores iguales o superiores a 8, los resultados sugieren un incremento significativo del estrés térmico asociado a las pérdidas adicionales por armónicos. Si bien este estudio se basa en análisis eléctricos, dichos valores permiten inferir la conveniencia de considerar evaluaciones térmicas complementarias para caracterizar de forma más completa el impacto acumulativo de los armónicos sobre el aislamiento y los componentes internos del transformador.

Dicho análisis contribuye al cumplimiento del tercer objetivo específico, al evidenciar cómo valores elevados del Factor K se traducen en un mayor estrés térmico potencial sobre el transformador, permitiendo interpretar el impacto operativo de los armónicos a partir de los resultados obtenidos.[23]

4.4.1.4 Relación entre perfil de carga y severidad armónica

Los resultados muestran que la severidad del Factor K no guarda una relación directa con el nivel de carga promedio del transformador. Esto evidencia que transformadores operando con cargas moderadas o incluso bajas pueden experimentar elevados niveles de estrés armónico, dependiendo del tipo de carga conectada. Por tanto, el Factor K se consolida como un indicador dependiente de la naturaleza de la carga más que de su magnitud.

El párrafo anterior fortalece el cumplimiento del tercer objetivo específico al demostrar, a partir de los datos analizados, que el Factor K refleja la naturaleza armónica de la carga más que su magnitud, permitiendo una interpretación más precisa del impacto térmico real sobre los transformadores.[23]

4.4.1.5 Alcance operativo del Factor K

Un Factor K elevado no debe interpretarse como una condición de falla inmediata del transformador, sino como un indicador del incremento del estrés térmico al que el equipo es sometido bajo determinadas condiciones de operación. La severidad de este impacto depende tanto de la frecuencia como de la duración de los eventos armónicos, lo que



refuerza el valor del Factor K como herramienta de análisis del riesgo térmico y no como un criterio de diagnóstico de falla.

Esta interpretación contribuye al cumplimiento del tercer objetivo específico al contextualizar el Factor K como un indicador del riesgo térmico asociado a la presencia de armónicos, permitiendo evaluar sus efectos operativos sin interpretarlo erróneamente como una condición de falla inmediata del transformador.[8]



Conclusiones

- El desarrollo del estudio permitió describir y diferenciar técnicamente el comportamiento de los armónicos de voltaje y de corriente en transformadores de distribución, evidenciando que ambos responden a fenómenos físicos distintos y generan efectos diferentes en el sistema. Esta diferenciación fundamenta el uso del Factor K como indicador especializado del impacto térmico de las corrientes armónicas, cumpliendo el objetivo de establecer el marco teórico necesario para interpretar correctamente su influencia en la operación de los transformadores.
- La aplicación de criterios de validación de datos del transformador y en la magnitud de la corriente fundamental permitió caracterizar de forma objetiva el comportamiento de las corrientes armónicas presentes en el área de estudio. Este enfoque evitó interpretaciones erróneas del THD de corriente y garantizó que el análisis se realizara sobre datos representativos, cumpliendo el objetivo de caracterizar los armónicos y sus efectos reales sobre el desempeño de los transformadores.
- El cálculo del Factor K a partir de registros temporales evidenció que su valor depende principalmente de la naturaleza armónica de la carga y no de su magnitud, demostrando que pueden presentarse condiciones de alto estrés térmico incluso en intervalos de baja demanda. Este resultado permitió determinar valores representativos del Factor K para los transformadores estudiados, cumpliendo el objetivo de evaluar cuantitativamente la incidencia térmica de las corrientes armónicas en condiciones bajo carga.



Recomendaciones

- Se recomienda que futuros estudios amplíen el período de monitoreo y analicen de forma específica la evolución temporal del Factor K en transformadores con alta presencia de cargas no lineales, así como la correlación entre el calentamiento real del equipo y los valores calculados de Factor K. Adicionalmente, sería conveniente incorporar mediciones térmicas directas o simulaciones electromagnéticas que permitan validar experimentalmente el impacto térmico asociado a los armónicos de corriente.



Referencias bibliográficas.

- [1] L. Marrero, L. García-Santander, L. Hernandez-Callejo, P. Bañuelos-Sánchez, and V. J. González, "Harmonic distortion characterization in groups of distribution networks applying the IEEE Standard 519-2014," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 4, pp. 526–533, 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9448534.
- [2] O. E. Gouda, G. M. Amer, and W. A. A. Salem, "A Study of K- Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 1, no. 5, 2020, doi: 10.48084/etasr.59.
- [3] O. H. Abdalla, S. Elmasry, M. I. El Korfolly, and I. Htita, "Harmonic Analysis of an Arc Furnace Load Based on the IEEE 519-2014 Standard," in *2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2022, pp. 1–7. doi: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021725.
- [4] J. Yaghoobi, A. Alduraibi, D. Martin, F. Zare, D. Eghbal, and R. Memisevic, "Impact of high-frequency harmonics (0–9 kHz) generated by grid-connected inverters on distribution transformers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 122, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106177.
- [5] M. Apriansyah and M. K. Iwa Garniwa, "Effect of K-Factor on Capability in Power Transformers," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1962, no. 1, p. 012005, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1962/1/012005.
- [6] IEEE Institution, *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, 2020.
- [7] B. Coleman, C. Hsieh, D. Guckelberger, and J. Harshaw, "Engineers Newsletter providing insights for today's hvac system designer volume 47-1 Harmonic Distortion in Electrical Systems," 2020.
- [8] K. Dawood, M. A. Çakır, G. Kömürgöz, and S. Tursun, "K-Factor Impacts on Transformer Cost and Weight: A Comparative Evaluation," in *2025 7th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (ICHORA)*, 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICHORA65333.2025.11017099.
- [9] CH Transformadores, "Tipos de transformadores de distribución," Technology, Engineering.
- [10] B. Can, O. Ayan, M. Silsupur, and B. E. Turkay, "Harmonic Effects of Electric Vehicles on Low Voltage Distribution Transformers and Power Grid," in *ISMSIT 2018 - 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Proceedings*, 2020. doi: 10.1109/ISMSIT.2018.8566696.
- [11] Ferroviario STEM, "¿Qué es un transformador?," Technology.



- [12] M. A. Taher, S. Kamel, and Z. M. Ali, "K-Factor and transformer losses calculations under harmonics," in *2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016 - Proceedings*, 2019. doi: 10.1109/MEPCON.2016.7836978.
- [13] L. Gumilar, A. N. Afandi, Aripriharta, M. A. Habibi, and A. Kusumawardana, "Effect of Combination Shunt Passive Filter Harmonic and Detuned Reactor on the K-Factor Changes of Transformer," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.1.16064.
- [14] H. Zheng, F. Xu, Q. Shu, C. Wang, and Q. Zhou, "Estimation of harmonic impedance and harmonic contribution with harmonic complex power in the absence of harmonic phase angle," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 17, no. 1, 2023, doi: 10.1049/gtd2.12673.
- [15] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, "EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD-ARCONEL," Quito, Nov. 2024.
- [16] Ing. Condori Laura, "FACTOR K COMO PARÁMETRO DE EFICIENCIA EN TRANSFORMADORES SECOS DE DISTRIBUCIÓN," May 2022.
- [17] L. Gumilar and I. J. Permana, "Three Winding Transformer Evaluation of K-Factor Value and Harmonic Distortion," in *2023 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication: Smart Technology Based on Industry 4.0: A New Way of Recovery from Global Pandemic and Global Economic Crisis, iSemantic 2023*, 2023. doi: 10.1109/iSemantic59612.2023.10295325.
- [18] R. Szewczyk, S. Purohit, and J.-C. Duart, "IMPROVING RELIABILITY AND PERFORMANCE OF TRANSFORMERS FOR POWER DISTRIBUTION UNITS IN DATA CENTRES," in *IET Conference Proceedings*, 2025, pp. 2195–2199. doi: 10.1049/icp.2025.2064.
- [19] T. F. Megahed and M. F. Kotb, "Improved design of LED lamp circuit to enhance distribution transformer capability based on a comparative study of various standards," *Energy Reports*, vol. 8, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.027.
- [20] K. Dawood, M. A. Cakir, and S. Tursun, "Optimizing Transformer Performance: A Comparative Analysis of K-Factor Impact on No-Load and Load Losses," in *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, ICEEAC 2024*, 2024. doi: 10.1109/ICEEAC61226.2024.10576239.
- [21] E. Chenan and G. R. Bindu, "Minimizing harmonics and transformer derating in low voltage distribution networks by DC distribution," in *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research, ICETIETR 2018*, 2020. doi: 10.1109/ICETIETR.2018.8529063.
- [22] C. Liu, J. Hao, R. Liao, F. Yang, W. Li, and Z. Li, "High proportion and large value harmonic current influence on the magnetic field, loss and temperature distribution for ultrahigh voltage converter transformer," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 18, no. 2, pp. 208–225, 2024, doi: 10.1049/elp2.12382.



- [23] D. Contreras Ramírez and L.-G. Juan, "K-Factor Analysis to Increase the Actual Capacity of Electrical Distribution Transformers," in *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, pp. 367–379. doi: 10.1007/978-981-16-4126-8_34.
- [24] J. A. Badri, J.-R. R. Ruiz, A. Garcia, S. Trujillo, and A. Marzabal, "Predicting the Effect of Voltage Harmonic Phase Angle on Transformer Core Losses," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3449933.
- [25] J. A. Badri, J.-R. R. Ruiz, A. Garcia, S. Trujillo, and A. Marzabal, "Predicting the Effect of Voltage Harmonic Phase Angle on Transformer Core Losses," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3449933.