ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN ENTORNOS RESIDENCIAL E INDUSTRIAL MEDIANTE EL ANALIZADOR FLUKE 1775

HARMONIC DISTORTION ANALYSIS IN RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL ENVIRONMENTS USING THE FLUKE 1775 ANALYZER

Alexis Geovanny Taco Cabrera [1*]

[1] Instituto Superior Universitario "Sucre". Ecuador. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9609-0798. Correo: ataco@tecnologicosucre.edu.ec

Manuel David Rodríguez Santillán [2]

[2] Instituto Superior Universitario "Sucre". Ecuador. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9609-3955. Correo: drodriguez@tecnologicosucre.edu.ec

*** Autor para correspondencia: ataco@tecnologicosucre.edu.ec**

Resumen

En el presente estudio se analizaron los niveles de distorsión armónica en entornos residencial e industrial, utilizando el analizador de calidad de energía Fluke 1775, con el objetivo de describir detalladamente las condiciones de cada ambiente y verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022. La metodología consistió en realizar mediciones durante un periodo de siete días, con una configuración del analizador ajustada a las características de cada entorno. Los datos recolectados fueron procesados mediante el software Energy Analyze, que permitió evaluar la distorsión tanto en la corriente como en la tensión. En el entorno residencial, los niveles de distorsión armónica en ambos parámetros se encontraron dentro de los límites normativos. Sin embargo, en el entorno industrial, si bien la tensión cumplió con los valores establecidos, la corriente presentó niveles de distorsión que superaban en más del doble a los límites permitidos. Se concluye que, aunque la calidad de la tensión fue adecuada en ambos entornos, la distorsión armónica en la corriente del entorno industrial representa un riesgo significativo para la eficiencia del sistema eléctrico, lo que evidencia la necesidad de implementar medidas para la mitigación de armónicos.

Palabras clave: Cargas no lineales; distorsión armónica; calidad de la energía; Fluke 1775; IEEE 519-2022.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Abstract

The present study analyzed harmonic distortion levels in residential and industrial environments using the Fluke 1775 power quality analyzer, with the objective of providing a detailed description of each setting and verifying compliance with the limits established by the IEEE 519-2022 standard. The methodology involved conducting measurements over a period of seven days, with the analyzer's configuration adjusted to the characteristics of each environment. The collected data were processed using the Energy Analyze software, which allowed for the evaluation of distortion in both current and voltage. In the residential environment, harmonic distortion levels for both parameters were found to be within the normative limits. However, in the industrial environment, although the voltage remained within the allowed range, current levels showed significant distortion, exceeding the permitted limits by more than twice the established values. It is concluded that, while voltage quality was acceptable in both cases, the current harmonic distortion in the industrial environment represents a significant risk to the efficiency of the electrical system, highlighting the need to implement measures for harmonic mitigation.

Keywords: *Nonlinear loads; harmonic distortion; power quality; Fluke 1775; IEEE 519-2022*

Fecha de recibido: 26/07/2025
Fecha de aceptado: 02/10/2025
Fecha de publicado: 09/10/2025

Introducción

La creciente incorporación de dispositivos electrónicos en actividades cotidianas y procesos industriales ha supuesto un avance significativo en términos de calidad de vida, automatización y eficiencia operativa. Sin embargo, muchos de estos equipos —como fuentes conmutadas, variadores de velocidad, iluminación LED y electrodomésticos modernos—ocasionan un tipo de contaminación eléctrica, comúnmente llamada "distorsión armónica" o simplemente "armónicos", que termina por distorsionar la onda senoidal del voltaje o la corriente afectando directamente la calidad del suministro eléctrico y provocando problemas de eficiencia, sobrecalentamiento en transformadores y conductores, disparo de protecciones, disminución del factor de potencia y el deterioro prematuro en componentes eléctricos o equipos sensibles (Torres y Sanches, 2020).

Los armónicos corresponden a múltiplos enteros de la frecuencia fundamental que puede ser 50 o 60 Hz, y como se mencionó anteriormente, son generados por dispositivos que incorporan circuitos electrónicos de conmutación, lo que los convierte en cargas no lineales. Este tipo de cargas se caracteriza por no consumir corriente con una forma de onda sinusoidal, incluso cuando el voltaje de alimentación sí lo es, creando una relación no lineal entre tensión y corriente, lo que da lugar a la inyección de armónicos en la red eléctrica. Para cuantificar este fenómeno, se suelen utilizar dos índices principales: la distorsión armónica total o THD (Total Harmonic Distortion), que expresa en porcentaje la distorsión presente en la onda en relación con su componente fundamental de voltaje (THDv) o de corriente (THDi), y la distorsión de demanda total o TDD (Total Demand Distortion), que mide la distorsión de la corriente con respecto a la demanda máxima del

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).
Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

sistema, dando otro punto de vista más relacionado al entorno medido (Chere Ronquillo y Quiroga Rendon, 2025).

Para mantener condiciones óptimas de eficiencia operativa, y maximizar la vida útil de los equipos eléctricos, surge la necesidad de normativas que regulen los niveles de distorsión armónica en los sistemas eléctricos, respondiendo a la visión técnica de mantenimiento y confiabilidad, como a la visión de sostenibilidad y ahorro energético. Una de las normativas más conocidas para este propósito, es la normativa IEEE 519, formalmente llamada: "*IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*", que otorga recomendaciones técnicas para el control de armónicos, estableciendo límites permisibles de distorsión en la corriente y voltaje en los puntos de acoplamiento común , también llamados PCC (*Poit of Common Copling*), que son la interfaz entre los usuarios y la red, con el propósito de asegurar que los usuarios conectados no afecten negativamente la calidad del suministro eléctrico, protegiendo tanto la infraestructura del proveedor como los equipos sensibles de los consumidores (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022).

Con esto en mente, el presente artículo se ideó con el objetivo de analizar las distorsiones armónicas presentes en dos entornos reales: uno de tipo residencial y otro industrial, con el fin de evaluar su impacto en la calidad de la energía eléctrica, buscando identificar los armónicos más predominantes en cada contexto y verificar su grado de cumplimiento con los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022, la versión más reciente de esta normativa. Los resultados obtenidos proporcionaran información clave para el diseño de futuras estrategias de mitigación de armónicos en estos entornos. Para ello, se empleó una metodología de enfoque cuantitativo, basada en la recolección de datos reales en campo, utilizando el analizador de calidad de energía Fluke 1775, un instrumento especializado capaz de registrar diversos parámetros eléctricos de la red.

El equipo fue instalado en los tableros principales de cada uno de los entornos de estudio, donde permaneció operando durante un período determinado para capturar el comportamiento eléctrico bajo condiciones reales de carga. Posteriormente, los datos fueron descargados a un computador y analizados mediante el software Energy Analyze, proporcionado por el fabricante. A continuación, se detallan los procedimientos técnicos realizados, así como las condiciones específicas bajo las cuales se efectuaron las mediciones.

Materiales y métodos

Analizador Fluke 1775

El analizador de calidad de energía Fluke 1775 es un instrumento de alta precisión diseñado para monitorear y registrar diversas variables críticas de un sistema eléctrico. Entre sus principales capacidades se encuentra la medición de parámetros relevantes como voltaje, corriente, frecuencia, potencia, etc. así como la detección de eventos y perturbaciones del suministro, como transitorios de tensión de alta velocidad (impulsivos y oscilantes), variaciones de voltaje, interrupciones de larga duración, y en particular, el análisis del contenido armónico de la red, que constituye el foco principal de este estudio. Este dispositivo permite el registro continuo bajo la normativa IEC 61000-4-30, facilitando un análisis detallado del comportamiento del sistema eléctrico en diferentes condiciones de carga. Dado que, en este artículo, el concepto de calidad de energía se restringe a la evaluación de la distorsión armónica presente en los entornos de estudio, toma mucha importancia una de las funciones del analizador Fluke 1775 y es su capacidad de analizar armónicos desde el

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

orden 1 hasta el 100, así como el cálculo de THD de forma precisa, tanto en señales de tensión como de corriente (FLUKE, 2024).

Métodos

El desarrollo de este estudio se fundamenta en la recopilación de datos directamente en los sitios de análisis, complementada con una revisión teórica sobre el impacto de la distorsión armónica generada por cargas no lineales en los sistemas eléctricos. Como el objetivo es describir los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en los entornos residencial e industrial para compararlos con los límites establecidos en la norma IEEE 519-2022, la metodología adoptada se clasifica como de tipo cuantitativa, con un enfoque descriptivo comparativo.

El método propuesto es del tipo no experimental, ya que se basa en la observación, medición y análisis de variables dentro de un entorno real, sin manipular de forma directa las condiciones externas, para así observar el comportamiento de la calidad de la energía bajo condiciones reales de uso (Desai, 2025; Hernandez Sampieri et al., 2014). Este enfoque facilitó el establecimiento de parámetros de medición adecuados para la obtención de datos relevantes, como los valores de armónicos, THD y TDD, fundamentales para caracterizar la calidad de la energía en ambos contextos. Así, se logró evaluar el grado de cumplimiento normativo y se aportó una base técnica para futuras estrategias de mitigación. En la siguiente figura se resumen los pasos seguidos para la recolección y posterior análisis de datos.

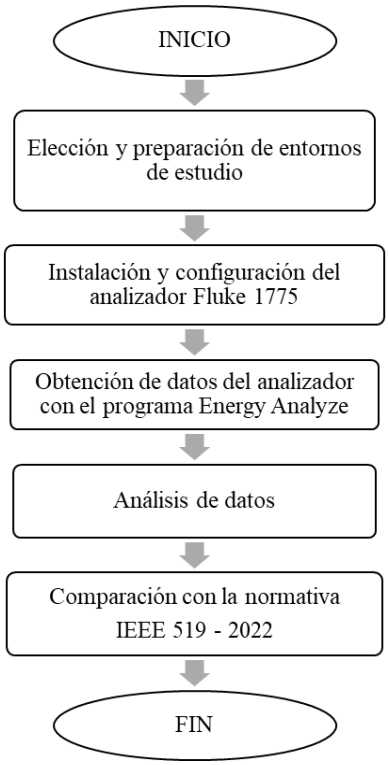


Figura 1. Diagrama de flujo de los pasos para la recolección y análisis de datos.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Preparación del entorno

Durante el análisis de la distorsión armónica en los entornos de estudio, fue fundamental asegurar un entorno de trabajo seguro y libre de riesgos eléctricos. Para ello, se realizó una inspección preliminar del área de medición, verificando que no existieran elementos que pudieran comprometer la seguridad del personal ni la del equipo. Asimismo, se verificó la disponibilidad de una fuente de alimentación confiable para garantizar el funcionamiento adecuado del analizador de calidad de energía (Achilie y Molina, 2024).

Configuración del analizador Fluke 1775

La correcta conexión y configuración del analizador de red es fundamental para garantizar la precisión de las mediciones. El equipo debe de ajustarse a la topología del PCC al que se conecta, pues la forma de conexión del equipo varía en función de las características del tablero de alimentación de cada entorno de estudio. En el caso del entorno residencial, el tablero principal operaba bajo un sistema bifásico de tres hilos (dos fases y un neutro), derivado de un transformador trifásico. Por su parte, en el entorno industrial, se identificó un sistema trifásico de cuatro hilos (tres fases y un neutro), lo que implicó una configuración diferente para cada caso.

Una vez conectado el equipo, se procedió a configurarlo según los valores nominales de operación, estableciendo una tensión por fase de 127 V y una frecuencia de 60 Hz para ambos escenarios. También se definieron los intervalos de muestreo, así como la duración total de la medición. En cada entorno, el analizador permaneció en operación continua durante un período de siete días, recolectando datos cada 10 minutos. Finalizado el proceso de monitoreo, los datos recopilados en la memoria interna del dispositivo quedaron listos para su procesamiento y evaluación mediante el software correspondiente.

Análisis e interpretación de resultados

La interpretación de los datos obtenidos se realizó mediante el software “Energy Analyze”, proporcionado por el fabricante del equipo. A través de esta herramienta, se identificaron parámetros clave de los entornos estudiados, tales como la corriente de carga, el voltaje, la frecuencia, el porcentaje de distorsión armónica (THDv y THDi) y los armónicos individuales más significativos en cada escenario. A modo de ejemplo, la Tabla 1 muestra un fragmento de los datos obtenidos en el entorno residencial durante el sexto día de mediciones.

Tabla 1. Muestra de datos obtenidos por el analizador en entorno residencial.

Fecha y hora	Fases	Voltaje (V)	Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	THD de voltaje (%)	THD de corriente (%)
28/4/2025 - 17:10:00	A	131.56	1.58	59.994	2.17	27.4
28/4/2025 - 17:10:00	B	129.84	0.65	59.994	2.53	59.2

Nota. Los datos sin procesar por el software no mostraban valores de la TDD.

Con los datos recogidos durante la medición, el software calculó automáticamente los valores promedio de la TDD de la corriente y los comparó con los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022, facilitando la

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial “ALEMA-Pentaciencias” E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

identificación de aquellos componentes armónicos que no cumplían con los criterios de calidad establecidos por dicha normativa.

Sobre el estándar IEEE

Como se mencionó anteriormente, la norma IEEE 519-2022 establece límites para la distorsión armónica máxima permisible en sistemas eléctricos, diferenciando los criterios de evaluación según se trate de tensión o corriente, ya que ambos fenómenos afectan de manera distinta la calidad de la energía. En el caso del voltaje, se examinan tanto los valores de THD, como los porcentajes individuales de cada armónico del valor nominal configurado. Por su parte, en la corriente, el análisis se basa en el cálculo de la TDD, que como se mencionó, es un indicador que dependiente de la corriente máxima de demanda del sistema evaluado, y como en el voltaje, la normativa también establece límites específicos para cada componente armónico individual. Aunque se evalúen de diferente manera, la normativa exige que los armónicos individuales se analicen solo hasta al h50, tanto en voltaje como en corriente. En la Tabla 2 se muestran los límites de distorsión de voltaje que exige la norma.

Tabla 2. Límites de distorsión armónica de voltaje

Parámetro	**Límite establecido**
THD de voltaje	Máximo 8% del valor de tensión nominal
Armónicos individuales en el voltaje	Máximo 5% del valor de la tensión nominal

Nota. Adaptado de la Norma IEEE-519 2022 para sistemas con tensión <69KV

Los límites de TDD y de cada armónico individual se obtienen según la relación de cortocircuito del sistema en el punto de acoplamiento, que es: I_{SC} (corriente de cortocircuito o falla) / IL (corriente de carga máxima), esta proporción determina la sensibilidad a las distorsiones del sistema, a mayor valor de la relación, mayor es su tolerancia a las distorsiones armónicas.

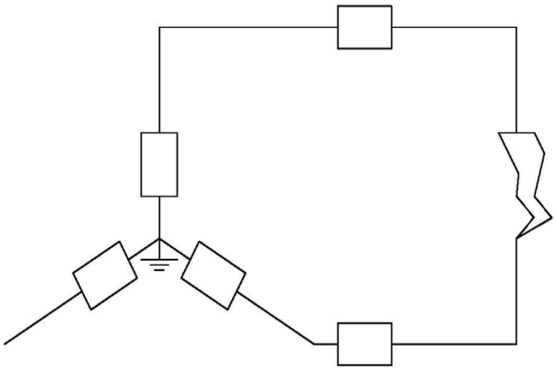
Para cada entorno de estudio, la corriente de carga IL se estimó considerando los picos de demanda registrados en intervalos de dos horas, así como las corrientes pico alcanzadas durante el período de medición. Con base en estos datos, se determinó un valor de IL de 10 A para el entorno residencial y de 115 A para el entorno industrial.

En cuanto a la corriente de cortocircuito (I_{SC}), se realizó el cálculo correspondiente para cada entorno, considerando la potencia y el voltaje del secundario del transformador, su configuración, la impedancia porcentual (Z%), la impedancia de los conductores, y el tipo de falla más crítica que podría presentarse en los PCC.

Con los datos obtenidos, en el sector residencial, donde el peor escenario correspondía a una falla bifásica, se determinó una impedancia de cortocircuito (Z_{SC}) de 0.1328 Ω. A partir de este valor, se calculó la corriente de cortocircuito correspondiente, como se muestra en la siguiente figura:

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com



Falla bifásica:

$$I_{SC2} = \frac{V_{L2}}{2 * Zsc}$$

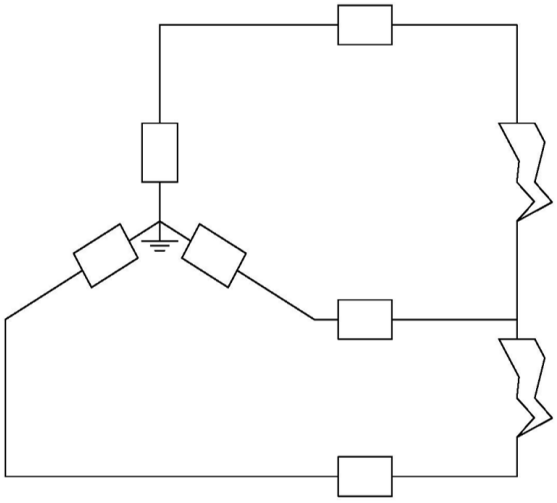
$$I_{SC2} = \frac{220\ V}{2 * 0{,}1328\ \Omega}$$

$$I_{SC2} = 828{,}31\ A$$

Figura 2. Cálculo de I_{SC} entorno residencial.

A partir de este resultado, se determinó que la relación de cortocircuito (I_{SC}/IL) para este entono, fue de 82,83, que se encuentra en el rango de 50<100.

Por otro lado, en el entorno industrial, considerando que el peor caso corresponde a un cortocircuito trifásico, se encontró una impedancia de cortocircuito de 0.1703 Ω. Con este valor, se realizó el cálculo correspondiente, como se muestra en la siguiente figura:



Falla trifásica:

$$I_{SC3} = \frac{V_{F2}}{Zsc}$$

$$I_{SC3} = \frac{127\ V}{0{,}1703\ \Omega}$$

$$I_{SC3} = 745\ A$$

Figura 3. Cálculo I_{SC} en entorno industrial

Con este resultado, se obtuvo que la relación de cortocircuito correspondiente a este ambiente fue de 6.48, que entra en el rango de <20. Con estas relaciones, podemos evaluar los resultados obtenido de cada estudio con los límites propuestos por la normativa. En la Tabla 3 se explican los límites individuales de distorsión armónica para cada entorno según la relación de cortocircuito calculada.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Tabla 3. Límites de distorsión armónica de corriente según la relación de cortocircuito, representados en porcentaje de la corriente de carga IL

I_{SC}/I_L	Límites de armónicos $2 \leq h < 11$	Límites de armónicos $11 \leq h < 17$	Límites de armónicos $17 \leq h < 23$	Límites de armónicos $23 \leq h < 35$	Límites de armónicos $35 \leq h \leq 50$	TDD máxima permitida
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0

Nota. Adaptada de la Norma IEEE-519 2022 para los límites de distorsión armónica de la corriente

Resultados y discusión

Estudio en entorno residencial

Datos del voltaje

Los resultados del análisis de THD en el voltaje del entorno residencial se presentan en la Tabla 4. Estos valores permiten evaluar el comportamiento de la calidad de la energía en comparación con los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022 (Tabla 2), y corresponden a los promedios registrados durante el período de medición.

Tabla 4. Datos relevantes de la distorsión de voltaje en el entorno residencial.

Fases	THD promedio de la tensión eficaz (%)	THD promedio de la tensión nominal (%)	THD máx. (%) medido	THD min. (%) medido	Armónicos predominantes*
A	2.52	3.14	3.46	1.68	h05, h07, h03
B	2.72	3.66	3.61	1.84	h05, h07, h03

Nota. *Los armónicos predominantes se disponen por orden de magnitud.

Bajo la norma IEEE 519-2022, los valores del THD de tensión, en ningún momento sobrepasan el límite impuesto de 8% de la tensión nominal. Siendo el h05 el más prominente medido en la red, con un valor promedio de 2,2% en la fase A, y 2,4% en la fase B, con ambos valores de este armónico sin sobrepasar el límite dado en la norma (5% de la tensión nominal). Por lo tanto, la distorsión armónica del voltaje en ambas fases cumple con la normativa. La siguiente figura da una mejor visión de la distorsión que se presentó durante el estudio:

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

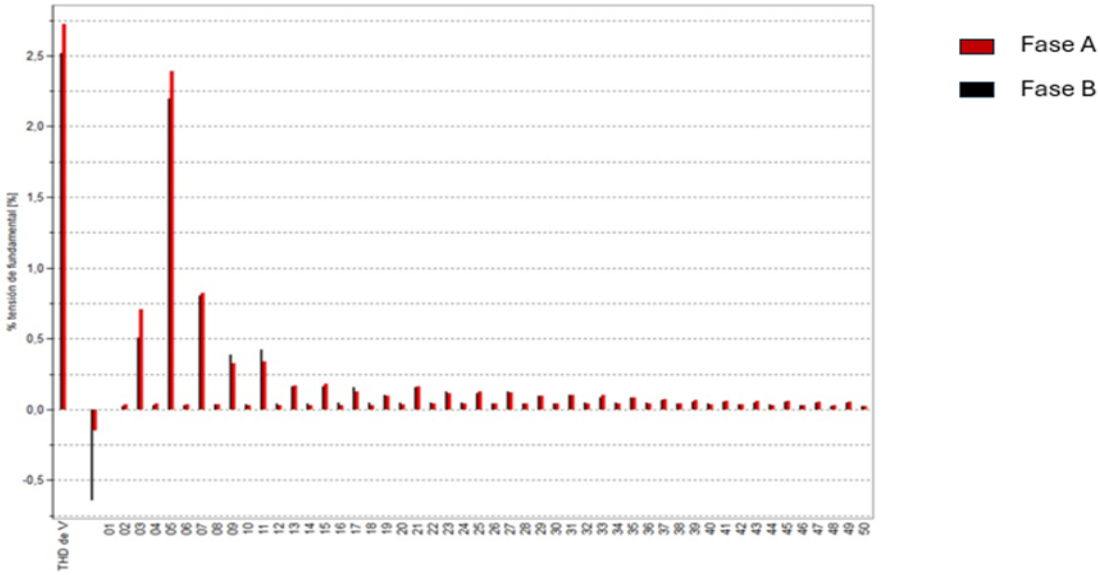


Figura 2. Gráfico de barras: THD y armónicos de voltaje en entorno residencial.

Datos de la corriente

En comparación al voltaje, la media del THD de la corriente registrada fue de 32,79% en la fase A, y de 19,78% en la fase B. Siendo el armónico más predominante el h03 que alcanzo un promedio de 23,66% en la fase A y el 15,18% en la fase B, este armónico (y los que son múltiplos de 3) es de secuencia cero, por lo que afecta directamente al conductor de neutro (Rosero Sangucho y Orizondo Martínez, 2023). La Figura 3 presenta los niveles de distorsión registrados durante el período de medición, evidenciando la clara prominencia del tercer armónico.

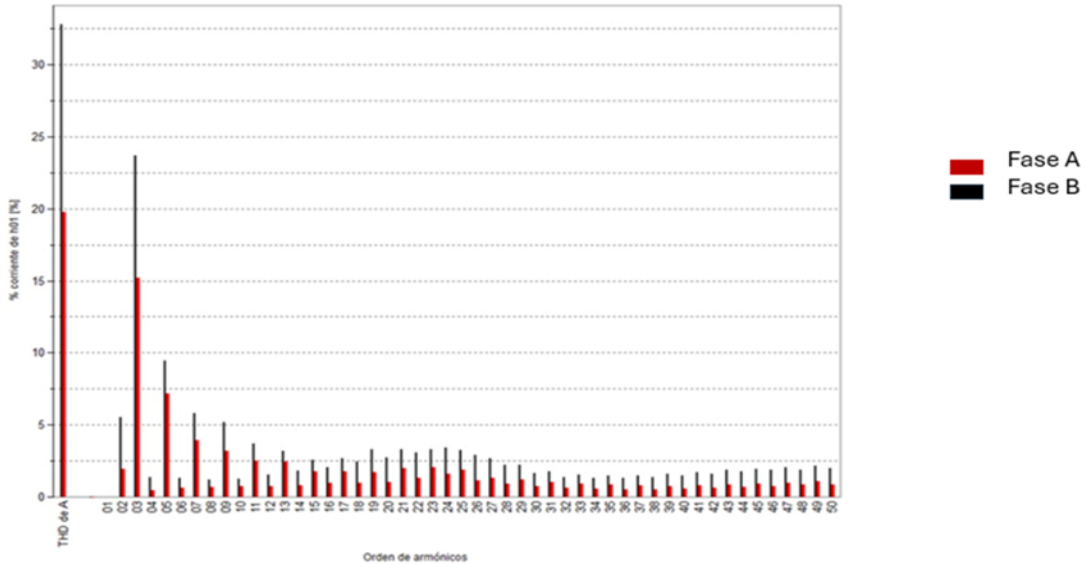


Figura 3. Gráfico de barras: THD y armónicos de corriente en entorno residencial.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Aunque estos valores reflejan que la corriente presenta distorsión, la normativa IEEE 519-2022 establece que la evaluación debe realizarse en función de la TDD y no del THD, considerando además la relación de cortocircuito del sistema. Siendo la corriente IL de 10 A por fase, la Figura 4 muestra cómo los valores de TDD y de cada armónico individual, se mantienen dentro de los límites de la normativa, representados por la línea negra.

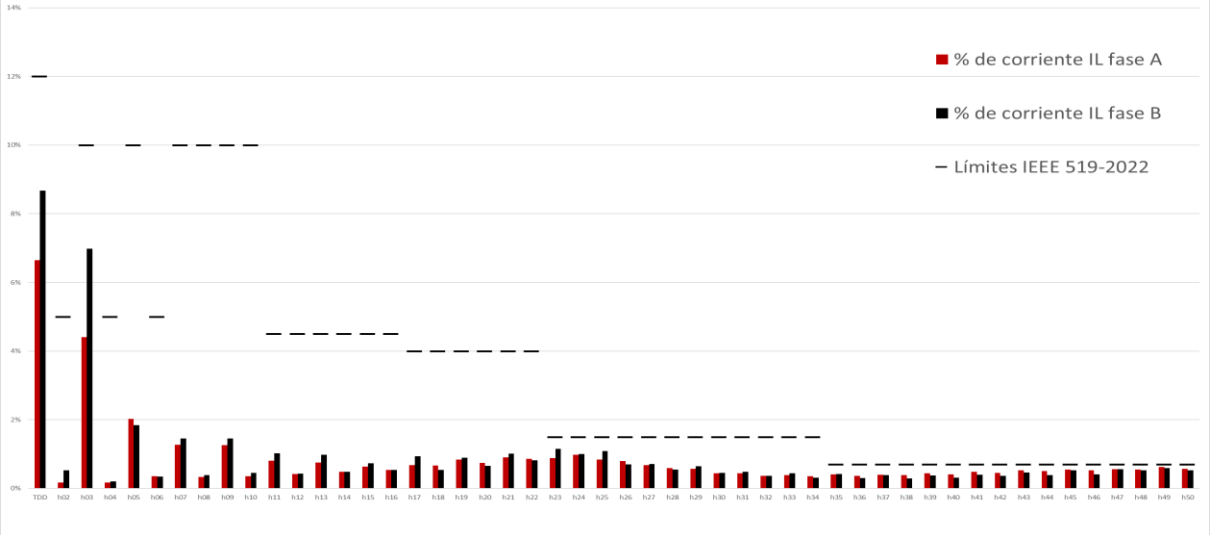


Figura 4. Gráfico de barras: TDD de corriente y valores de armónicos individuales.

Los valores de TDD obtenidos fueron de 6,65 % para la fase A y 8,67 % para la fase B, ambos por debajo del límite del 12 % establecido por la norma IEEE 519-2022. Esto evidencia que la distorsión armónica en la corriente se encuentra dentro de los rangos aceptables. Asimismo, los armónicos individuales medidos también respetan los valores máximos permitidos, lo que confirma el cumplimiento de los criterios de calidad de energía eléctrica.

En síntesis, el análisis efectuado en el entorno residencial evidenció que los niveles de distorsión en el voltaje se mantuvieron por debajo del 50 % del límite permitido. En contraste, la corriente presentó una mayor distorsión, con valores de TDD que ocupan el 75 % del umbral normativo, pero que no llegaron a exceder los límites establecidos. Por lo tanto, se concluye que, en el entorno residencial, los valores de distorsión presentes en los parámetros de voltaje y corriente cumplen con la normativa IEEE 519-2022.

Estudio en entorno Industrial

Datos del voltaje

El entorno industrial presentó variaciones en la configuración y conexión del equipo, debido a que en este caso existía una conexión trifásica con neutro aterrizado. En la Tabla 4 se organizan los valores promedio de distorsión del voltaje, así como otros datos relevantes registrados durante el periodo de estudio en el entorno industrial.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Tabla 4. Datos relevantes de la distorsión de voltaje en el entorno industrial.

Fases	THD promedio de la tensión eficaz (%)	THD promedio de la tensión nominal (%)	THD máx. (%) medido	THD min. (%) medido	Armónicos predominantes*
A	1.66	2.69	2.93	0.68	h03, h05, h07
B	2.08	3.06	3.47	0.69	h03, h05, h07
C	1.91	3.16	3.52	0.7	h03, h05, h07

Nota. *Los armónicos predominantes se disponen de igual manera, por orden de magnitud.

De los datos obtenidos, se observó que igual que en el caso anterior, el THD promedio presente en el voltaje, no alcanzo ni la mitad del 8% permitido, por lo que cumple con la normativa IEEE 519-2022, e incluso presenta menos distorsión que el entorno residencial, sin embargo, a diferencia de este, en el entorno residencial se observa una prominencia del tercer armónico (h03) en todas las fases, llegando a alcanza valores del 3.03%, pero sin haber sobrepasado el límite normativo de 5% de la tensión nominal. La Figura 5 muestra los niveles de distorsión presentes en el estudio.

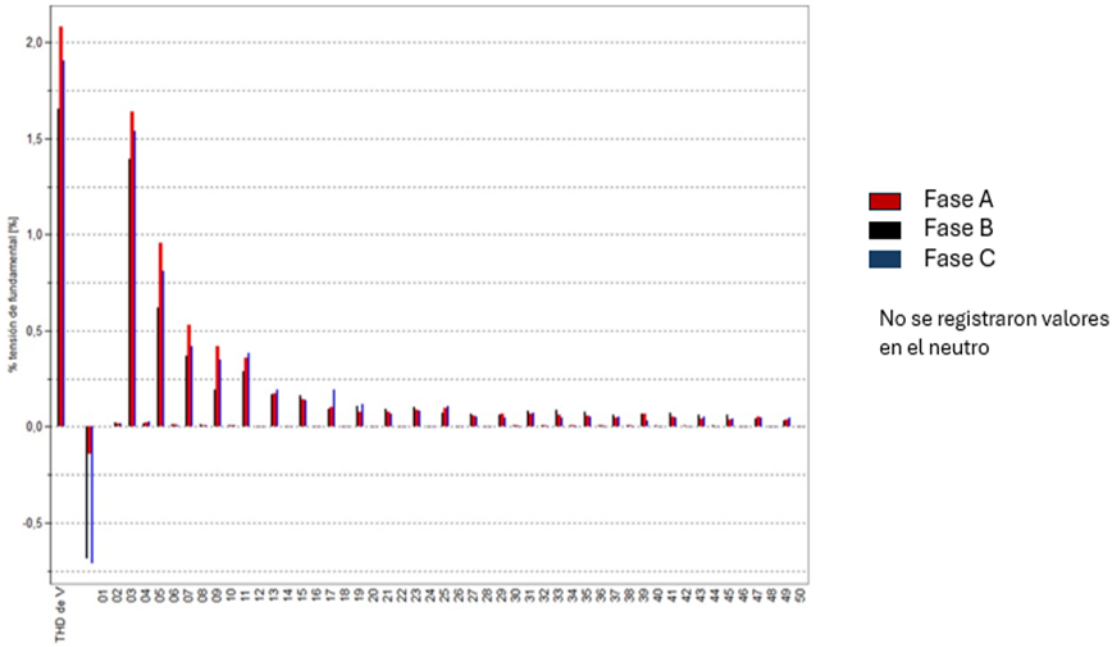


Figura 5. Gráfico de barras: THD y armónicos de voltaje en entorno industrial.

Datos de la corriente

Los datos obtenidos mostraron que la corriente presenta una gran distorsión armónica en comparación con el anterior estudio. Si bien la corriente se evalúa tomando como criterio la TDD, la Figura 6 nos permite observar el elevado valor de THD de existente en la corriente y, además, a diferencia del estudio residencial, se aporta información sobre el conductor neutro.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

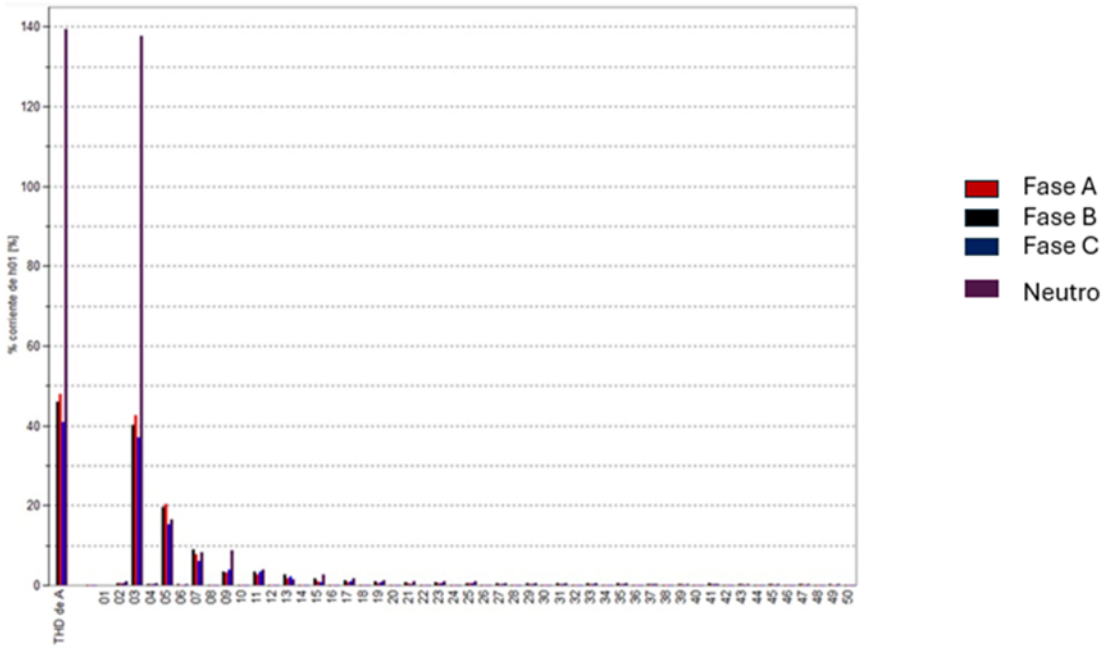


Figura 6. Gráfico de barras: THD de corriente en entorno industrial

Para una mejor comprensión de la nueva información encontrada en este estudio, se presenta la siguiente tabla que agrupa los datos más relevantes del THD presente en la corriente.

Tabla 4. Datos relevantes de la distorsión de voltaje en el entorno industrial

Conductor	THD promedio de la corriente eficaz (%)	THD máx. Medido (%)	THD min. Medido (%)	Armónicos predominantes*
Fase A	46	79.84	18.36	h03, h05, h07
Fase B	48	71.3	34.7	h03, h05, h07
Fase C	40	60.17	21.48	h03, h05, h07
Neutro*	139.3	286.1	63.9	h03, h05, h09

Nota. *A diferencia del anterior estudio, si se registraron valores en el conductor de neutro. *Los armónicos más prominentes se disponen por orden de magnitud.

Los armónicos predominantes en la corriente son de orden impar, siendo el tercer armónico (h03) el más relevante en todas las fases, con una media del 42 % respecto a la onda fundamental en la fase B. No obstante, otro dato muy significativo es la elevada presencia de armónicos en el conductor neutro, donde se registran valores que superan el 200 %. Este resultado no es una falla en la medición, sino que refleja la naturaleza del h03 y sus múltiplos, como armónicos de secuencia cero, los cuales terminan por sumarse en el conductor neutro, pues no se cancelan entre fases (Rosero Sangucho y Orizondo Martínez, 2023). Esto también sugiere un desbalance entre las fases, que contribuye a la acumulación de corriente armónica en el neutro. Al igual que en el anterior caso, para evaluar la distorsión armónica en la corriente bajo la norma IEEE 519-2022, se debe utilizar el valor de TDD. Siendo para este ambiente la IL = 115 A en todas las fases, se obtuvieron los siguientes resultados expresados en la Figura 7.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

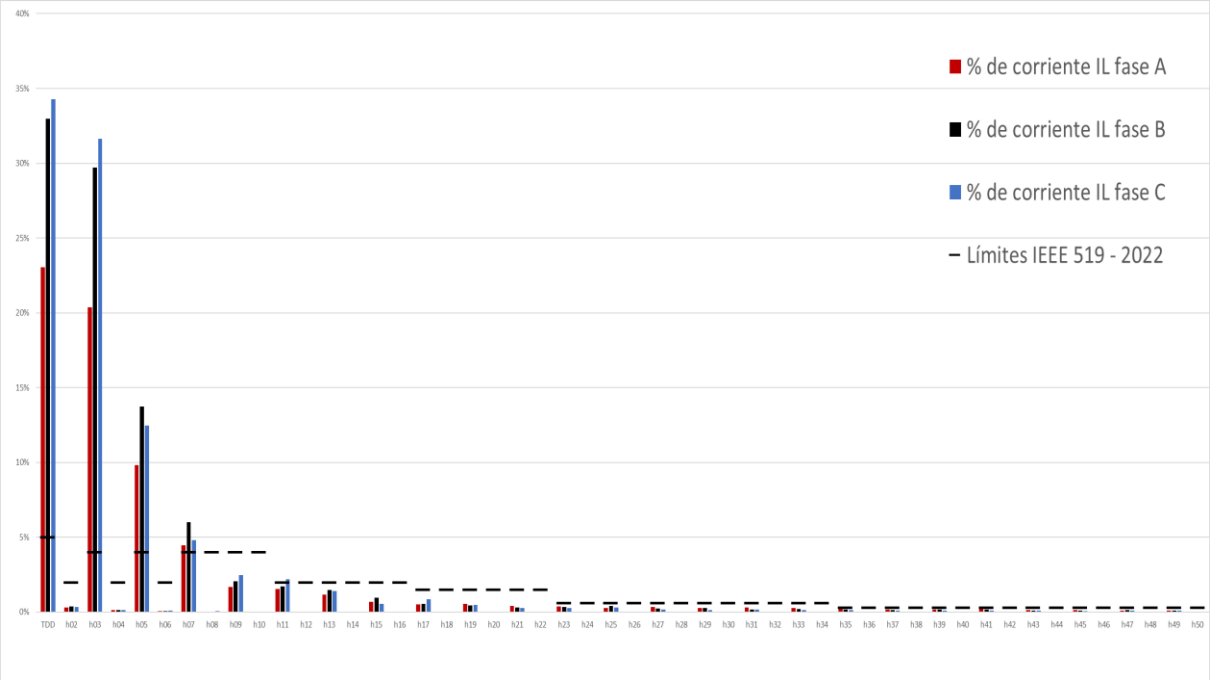


Figura 7. Gráfico de barras: TDD de corriente y valores de armónicos individuales.

El valor de TDD de la corriente para las fases A, B y C fue de 23,04 %, 32,98 % y 34,28 %, respectivamente. En todos los casos, estos valores superan ampliamente el umbral permitido del 5% establecido por la norma IEEE 519-2022. Asimismo, se detectó que los armónicos h03, h05, h07 y h11 (este último, únicamente en la fase C) exceden los valores límites establecidos por la normativa, siendo los principales responsables del incremento de la distorsión en la corriente. El armónico h03, en particular, presenta la mayor contribución, alcanzando entre un 20 % y un 30 % de la corriente IL, cuando el límite normativo es del 4%. En cambio, los armónicos comprendidos entre el h12 y el h50 permanecen dentro de los rangos permitidos, por lo que su influencia sobre la calidad de energía en el sistema resulta poco significativa. Por lo tanto, aunque la distorsión en el voltaje permanece dentro de los límites establecidos, los niveles de distorsión en la corriente no cumplen la normativa.

Comparativa bajo la norma IEEE 519 - 2022

A continuación, se muestra una tabla comparativa que resume los resultados obtenidos en ambos estudios relacionados con la distorsión armónica en el voltaje y la corriente. Esta comparación facilita la identificación de variaciones y coincidencias en los niveles de distorsión y aporta una visión más clara sobre el estado de la calidad de la energía en los sistemas analizados.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Tabla 4. Comparativa de los resultados obtenidos en ambos ambientes y los limites normativos.

Parámetros	Resultados del entorno residencial	Resultados del entorno industrial
Limites IEEE 519-2022 Asignados al entorno	THDv: 8% TDD: 12%	THDv: 8% TDD: 5%
THD promedio de tensión nominal	Fase A: 3.14% Fase B: 3.66%	Fase A: 2.69% Fase B: 3.06% Fase C: 3.16%
Distorsión armónica total (TDD)	Fase A: 6,65% Fase B: 8,67%	Fase A: 23,04% Fase B: 32,98% Fase C: 34,28%

Discusión

Los resultados obtenidos a partir del análisis en los entornos residencial e industrial proporcionaron información clave sobre el comportamiento de la calidad de la energía eléctrica, especialmente en lo referente a la distorsión armónica, evaluando indicadores específicos en cada parámetro, como los valores de THD del voltaje, o los valores de TDD de la corriente. Ambos valores, según la norma IEEE 519-2022, permite determinar el grado de distorsión presente en los sistemas, así como el estado y condiciones de operación de este. Para el voltaje, se observó que los niveles de distorsión armónica en ambos ambientes se mantienen por debajo del umbral normativo (8 %), siendo incluso menores en el entorno industrial. Esta diferencia puede explicarse por el diseño más robusto y técnico de las instalaciones industriales, que generalmente están mejor preparadas para manejar cargas exigentes.

Esta observación es coherente con lo que señalan Zhang y Yan (2020), quienes indican que el análisis de calidad energética debe considerar el contexto espacial y temporal de la red, debido a que las condiciones varían significativamente entre diferentes tipos de usuarios. En contraste, los datos de distorsión en la corriente eléctrica revelan diferencias notables. En el entorno residencial, aunque el THD de la corriente presentó valores que superaban el 30% de la onda senoidal, lo que significa que la onda se encontraba distorsionada, la TDD calculada se mantuvo dentro de los márgenes permitidos por la normativa. Esto sugiere que, aunque las cargas residenciales modernas —como lámparas, cargadores y electrodomésticos— generan armónicos importantes, no comprometen la calidad del suministro de manera crítica en la instalación.

Por el contrario, en el entorno industrial, los niveles de distorsión armónica en la corriente fueron significativamente altos, ya que el valor de TDD superó ampliamente los límites de referencia (5 %) en todas las fases. El armónico más significativo fue el de tercer orden (h03), cuya presencia se mantuvo constante y elevada en todas las fases, parecido a lo captado por Verma et al. (2019) que en su estudio se puede observar que de la mayoría de los dispositivos que analizaron, el h03 es el que más se repite, resaltando también, la aparición de otros armónicos impares como el h05 y el h07, coincidiendo con lo encontrado en el estudio industrial, pues son estos los mayor presencia tuvieron a lo largo del estudio. A esto se suma un hallazgo relevante: se registró una fuerte acumulación de armónicos en el conductor neutro, con un THD superior al 100 %, lo que evidencia una importante descompensación entre fases.

Este comportamiento también corresponde a la naturaleza aditiva de los armónicos de secuencia cero, los cuales se suman en el neutro y pueden ocasionar sobrecalentamientos o fallos operativos, como advierten Pinyon (2016). Este hallazgo en el conductor neutro del entorno industrial, si bien es conocido en la teoría,

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

su magnitud pone en evidencia la necesidad de rediseñar o reforzar medidas correctivas en este tipo de instalaciones.

Entre los aspectos que limitan este análisis, se encuentra el tiempo restringido de medición, ya que no se evaluaron ciclos completos de carga ni se aplicaron soluciones de corrección armónica que permitieran observar su impacto en los indicadores. Asimismo, no se incluyó el efecto de energías renovables distribuidas, que podrían introducir nuevas variables de distorsión. Sin embargo, a pesar de las limitaciones de este estudio, se concluye que se logró con los objetivos originalmente planteados.

Conclusiones

Las mediciones realizadas indican que, el nivel de distorsión armónica de tensión se mantiene dentro de los límites permitidos por la IEEE 519-2022 en ambos entornos (residencial e industrial). Sin embargo, la distorsión armónica de la corriente presenta valores considerablemente más elevados. Esta condición es especialmente notoria en el entorno industrial, donde la presencia de cargas no lineales de mayor potencia contribuye a que se excedan de manera significativa los límites permitidos, además, la relación de cortocircuito calculada para cada entorno muestra que en el ambiente industrial es menos tolerante a la distorsión armónica de la corriente que en el ambiente residencial.

El entorno industrial presentó valores de TDD que excedieron los límites establecidos por la normativa, lo que indica una contaminación armónica severa. Esta condición se atribuye a la alta concentración de equipos con electrónica de potencia sin dispositivos de mitigación. Además, se identificó que los armónicos predominantes fueron de orden impar, con magnitudes significativas tanto en las fases como en el conductor neutro, por lo que se concluye que este entorno no cumple con los requisitos normativos en cuanto a distorsión armónica de corriente. En contraste, el entorno residencial mostró niveles de distorsión dentro de los límites permitidos, lo que sugiere que, además de ser más tolerante a la distorsión, las cargas no lineales presentes no afectan de manera significativa la calidad de la corriente, permitiendo el cumplimiento de la normativa aplicada.

Con esto, el presente trabajo cumple con el propósito planteado inicialmente, al dar una descripción detallada sobre la calidad de energía en dos contextos diferentes bajo condiciones reales y evaluarlos según el estándar IEEE 519-2022. Los hallazgos confirman que, si bien los entornos residenciales pueden operar dentro de los márgenes aceptables, las instalaciones industriales requieren de un monitoreo técnico más riguroso y la implementación de estrategias de mitigación. Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones contemplen periodos de análisis más amplios, para poder analizar más detalladamente las fuentes puntuales de distorsión en cada entorno, así como la implementación de medidas que permitan su mitigación, tales como filtros armónicos activos o pasivos.

Referencias

Achilie, C., y Molina, C. (2024). Análisis de la calidad de la energía orientado a distorsiones armónicas en el bloque de la universidad politécnica salesiana. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27451/1/UPS-GT004985.pdf

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Chere Ronquillo, E. E., y Quiroga Rendon, J. L. (25 de enero de 2025). Simulación de armónicos en redes trifásicas basada en la normativa ecuatoriana TDD y THD: caso de estudio en establecimiento recreativo. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29971/1/UPS-GT006125.pdf

Desai, P. (02 de febrero de 2025). Estudio comparativo: Métodos, ideas y aplicaciones en la investigación. Blog Mind the Graph: https://mindthegraph.com/blog/es/comparison-study/

Fluke. (2024). Fluke-Direct.com. Fluke 1775 Three-Phase Power Quality Analyzer with current probes and WiFi/BLE adaptor, 8 kV: https://www.fluke-direct.com/product/fluke-1775-power-quality-analyzer

Hernández Sampieri, R., Collado, L., y Lucio, P. (s.f.). Universidades Aliat. http://online.aliat.edu.mx/adistancia/InvCuantitativa/LecturasS4/Hernandez_Sampieri_Cap._7_disenos_no_experimentales.pdf

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. d. (2014). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. McGRAW-HILL Hill Education. https://doi.org/I978-1-4562-2396-0

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2022). 519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9848440

Pinyon, R. (abril de 2016). ARMÓNICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACIÓN. SALICRU: https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf

Rosero Sangucho, M. R., y Orizondo Martínez, R. A. (2023). REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS CREADOS POR CORRIENTES NO SINUSOIDALES. Universidad Politécnica Salesiana. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24833/1/TTS1297.pdf

Torres, G., y Sanches, J. M. (2020). Analisis de la calidad de la energia electrica servicio nacional de aprendizaje- SENA CEET. Bogotá: Universidad Distrial Francisco Jóse De Caldas. https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/0cd12bf8-70d9-4892-becd-e13984a07f21/content

Verma, V., Verma P., V., y Singh, H. (2019). THD Analysis of Non-Linear Loads. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 33-38.

Zhang, X.-P., y Yan, Z. (2020). Energy Quality: A Definition. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 430-440. https://www.doi.org/%2010.1109/OAJPE.2020.3029767

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com