



Calidad de energía eléctrica en cámara de transformación II de la Universidad Técnica de Cotopaxi Quality of electricity in transformer chamber II of the Technical University of Cotopaxi

Luis Armando Vargas-Tocte
luis.vargas6@utc.edu.ec

Universidad Técnica Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0002-2524-4442>

Omar Luis Supe-Sailema
omar.supe6865@utc.edu.ec

Universidad Técnica Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0001-1026-6887>

Carlos Francisco Pacheco-Mena
Carlos.Pacheco2902@utc.edu.ec

Universidad Técnica Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-1874-7391>

Jefferson Alberto Porras-Reyes
jefferson.porras0449@utc.edu.ec

Universidad Técnica Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0005-9333-0934>

RESUMEN

Se tiene por objetivo de investigación analizar la calidad de energía eléctrica en cámara de transformación II de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Para el estudio se combina mediciones en tiempo real y un posterior análisis de histórico de datos recolectados a través de instrumentos de monitoreo en el tablero principal. Los datos obtenidos muestran patrones de perturbaciones causadas principalmente por cargas no lineales, el análisis de los armónicos de corriente impares revela un claro predominio del tercer armónico en las tres fases L1, L2 y L3, característica común en sistemas trifásicos con cargas no lineales. Las amplitudes de este armónico son especialmente significativas en L2 y L3. El contexto del encendido del generador refuerza la hipótesis que dicho equipo, o las cargas que alimenta, constituyen una fuente de distorsión armónica, estos datos son relevantes para la evaluación actual.

Descriptor: electricidad; ingeniería eléctrica; industria eléctrica. (Fuente: Tesoro UNESCO).

ABSTRACT

The research objective is to analyse the quality of the electrical energy in transformer chamber II of the Technical University of Cotopaxi. The study combines real-time measurements and a subsequent analysis of historical data collected through monitoring instruments on the main panel. The data obtained shows patterns of disturbances caused mainly by non-linear loads. The analysis of the odd current harmonics reveals a clear predominance of the third harmonic in the three phases L1, L2 and L3, a common characteristic in three-phase systems with non-linear loads. The amplitudes of this harmonic are especially significant in L2 and L3. The context of the generator ignition reinforces the hypothesis that said equipment, or the loads it feeds, constitute a source of harmonic distortion; these data are relevant for the current evaluation.

Descriptors: electricity; electrical engineering; electrical industry. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 21/09/2024. Revisado: 03/10/2024. Aprobado: 23/11/2024. Publicado: 07/02/2025.

Sección artículos de Tecnología



INTRODUCCIÓN

La presencia de problemas relacionadas con la calidad de energía en la infraestructura del sistema eléctrico tiene impactos importantes a nivel técnico y operativo en las instalaciones de la institución como el parpadeo de iluminación aunque imperceptibles por el ojo humano que pueden causar efectos secundarios como: fatiga visual, distracción y efectos perjudiciales (IEEE, 2010), las desviaciones de voltaje tiene consecuencias en los componentes internos de los equipos conectados a los circuitos de iluminación y distribución; con este tipo de perturbación causan sobrecalentamiento en dispositivos electrónicos, servidores y equipos de laboratorio. La relevancia de mantener la calidad de energía en niveles adecuados en un sistema eléctrico de cualquier instalación es aun de mayor importancia en una institución de educación superior con carreras de ingeniería como software, electricidad, electromecánica e industrial debido al intensivo uso de laboratorios con equipos electrónicos, servidores, redes de comunicación, osciloscopios y sistemas de control, equipos aún más sensibles como impresoras 3D y dispositivos de medición en presencia de picos de voltaje o corriente y pueden causar daños permanentes a dichos equipos.

La importancia de los estudios de calidad de energía adquiere un papel fundamental en la migración hacia una matriz energética más limpia y renovables en Ecuador, junto con la creciente dependencia de equipos electrónicos, resalta la necesidad de investigaciones que identifiquen y disminuyan las perturbaciones eléctricas, contribuyendo a los objetivos nacionales energéticos con políticas públicas como “El plan nacional de eficiencia energética” (Energética, 2022) y la “Ley orgánica de eficiencia energética”. en donde la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos energético son prioridades.

Un antecedente clave en el desarrollo del estudio en la Cámara de Transformación II de la Universidad Técnica de Cotopaxi, se identifica variaciones de voltaje, factor de potencia, y perturbaciones electromagnéticas, implementando un sistema de monitoreo de parámetros eléctricos para definir el estado de a la calidad de energía. El producto de este estudio reveló magnitudes de THD moderados (Moreta, 2020). Los resultados no solo validan la necesidad de profundizar estudios de este tipo sino también sugieren metodologías que se pueden usar en la investigación actual, reforzando su aporte académico y práctico para la búsqueda del mejoramiento de las perturbaciones anteriormente identificadas.

Estado del arte

La calidad de la energía eléctrica se centra en asegurar un suministro eléctrico estable y confiable para los usuarios, abordando tanto las perturbaciones y variaciones de voltaje que experimentan los consumidores como las deficiencias que puedan presentarse en el sistema de las compañías suministradoras (Muyulema et al. 2021). Por lo tanto, se presenta:

Marco legal

El suministro de energía eléctrica está regulado por la ley del servicio público y su respectivo reglamento, que establecen los límites superior e inferior de voltaje(Borrás, 2024). Cualquier voltaje fuera de estos límites se considera una anomalía o deficiencia en el suministro.

Sensibilidad de las cargas microelectrónicas a las perturbaciones eléctricas

La microelectrónica ha dado lugar a una creciente cantidad de cargas, tanto residenciales como comerciales e industriales, sensibles a las variaciones de calidad de energía (De Yong, 2013). Los microprocesadores modernos, presentes en dispositivos cada vez más rápidos, complejos y con mayor capacidad, operan con lógicas de circuitos que requieren niveles de tensión precisos, lo que los hace susceptibles a fluctuaciones y reduce su tolerancia al consumo de potencia fuera de sus rangos óptimos.

Importancia de la calidad de la energía eléctrica

La energía eléctrica es esencial en la vida moderna, desde la iluminación y el funcionamiento de diversos equipos hasta el aire acondicionado y las operaciones de laboratorios. Su uso



permea la fabricación de la mayoría de los productos que utilizamos (Agnello, 2022). Las perturbaciones y variaciones de voltaje pueden tener un impacto significativo en una amplia gama de actividades.

Definiciones de calidad de la energía eléctrica

El término "Calidad de la Energía Eléctrica" se define de diversas maneras, aunque las definiciones de las principales instituciones comparten conceptos centrales:

- a) El Instituto EPRI (Electric Power Research Institute) de los Estados Unidos la define como: "Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo."
- b) Las normas IEC (61000-2-2/4) y CONELEC (50160) la definen como: "Una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo."
- c) La CREG en Colombia, en su Resolución 070 de 1998, establece una distinción importante: "El término calidad de la potencia suministrada se refiere a las perturbaciones y variaciones de estado estacionario de la tensión y corriente suministrada por el Operador de Red. El término calidad del servicio prestado se refiere a los criterios de confiabilidad del servicio."

Factores que afectan la calidad de la energía eléctrica

Existen tres categorías principales de problemas de calidad de la energía en un sistema eléctrico:

1. Desviaciones en el voltaje.
2. Desviaciones en la corriente.
3. Desviaciones en la frecuencia.

Estos fenómenos pueden ser causados por una variedad de factores:

1. Mala operación de equipos y diseño deficiente del sistema de protecciones.
2. Cargas no lineales.
3. Malas técnicas de diseño de sistemas de puesta a tierra.
4. Descargas atmosféricas.
5. Conmutación de bancos de capacitores.
6. Balastos electrónicos.
7. Efectos de los variadores de frecuencia.
8. Convertidores CA-CC.

Consecuencias de deficiencias en la calidad del suministro eléctrico

Las desviaciones de tensión respecto a los valores nominales o de trabajo aceleran el envejecimiento del aislamiento de los equipos eléctricos debido al calentamiento (Espinoza et al. 2018). Las bajas tensiones conllevan a un aumento del calentamiento de los motores, mientras que las sobretensiones disminuyen su vida útil.

La presencia de armónicos superiores acelera el envejecimiento del aislamiento, genera calentamiento adicional en las partes conductoras de los equipos e instalaciones, incrementa las pérdidas de energía en las redes y provoca la operación errática de los esquemas de protección eléctrica. También incrementa las pérdidas parásitas e histéresis en los núcleos de motores y transformadores, tanto del sistema eléctrico como de los propios consumidores. La reducción de la frecuencia disminuye la productividad de los accionamientos eléctricos y causa un trabajo inestable de equipos electrónicos, de medición y de sistemas de protección (Dhulipala et al. 2019).

Armónicos

Los armónicos son de corrientes o voltajes presentes en un sistema eléctrico cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. En sistemas con una frecuencia fundamental de 60 Hz, típicos y con cargas monofásicas, los armónicos característicos son el tercero 180 Hz, el quinto 300 Hz y el séptimo 420 Hz, la creciente de cargas no lineales en los sistemas de distribución, como los convertidores estáticos de potencia y los controladores de motores con rectificadores, ha provocado un aumento notable en el contenido de componentes armónicos (Stalin & Ordóñez 2009).

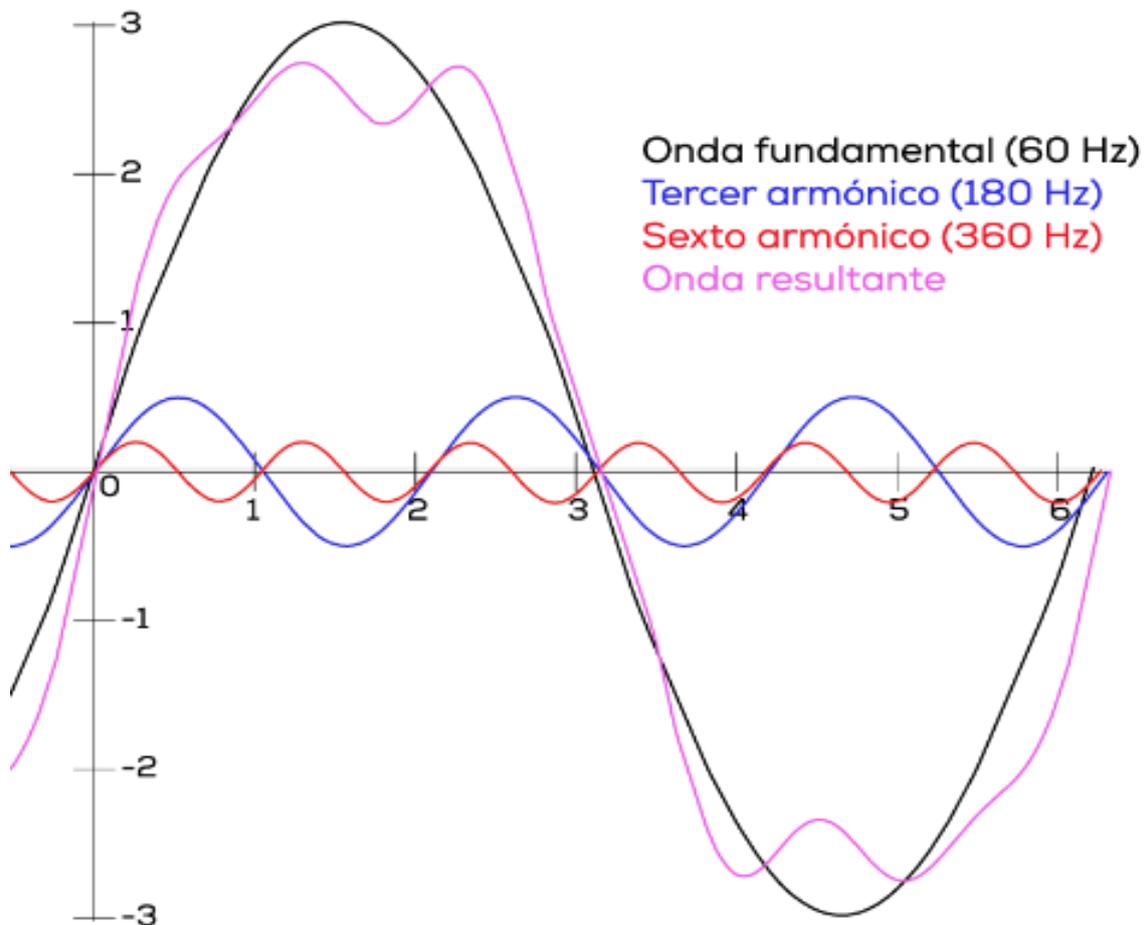


Figura 1. Armónicos de la senoidal fundamental. Fuente: Elaboración propia.

Interarmónicos

Los interarmónicos son componentes de tensión o corriente cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema de suministro 50 Hz o 60 z, la presencia de interarmónicos puede excitar severamente la resonancia en el sistema de alimentación, especialmente cuando la frecuencia del interarmónicos coincide con una de las frecuencias naturales del sistema. Esta resonancia puede amplificar las corrientes y tensiones del interarmónicos, causando problemas significativos (Holguín & Gómez Coello 2010). Las



principales fuentes de interarmónicos son; convertidores de frecuencia estáticos, ciclos convertidores, hornos de inducción y dispositivos de formación de arcos (como soldadoras de arco).

Voltaje desbalanceado

El desequilibrio de tensión, también conocido como voltaje desbalanceado o asimetría de tensión, se define como la condición en la que las magnitudes de las tensiones de fase o los ángulos de fase entre ellas no son iguales en un sistema trifásico (Aponte et al. 2011). El método más sencillo para cuantificar el desequilibrio de tensión consiste en determinar la desviación de la tensión de cada fase con respecto al valor promedio de las tensiones de fase. Esta desviación se expresa comúnmente como un porcentaje del voltaje promedio. El desequilibrio de tensión puede ser causado por diversas razones, entre las que se incluyen:

1. Fusibles fundidos o defectuosos en una o más fases.
2. Distribución desigual de cargas monofásicas entre las fases.
3. Impedancias desiguales en las líneas de transmisión o distribución.

El desequilibrio de tensión puede tener efectos negativos en los equipos conectados al sistema, tales como:

1. Sobrecalentamiento de motores trifásicos, lo que reduce su eficiencia y vida útil.
2. Aumento de las pérdidas en las líneas de transmisión y distribución.
3. Funcionamiento incorrecto de equipos electrónicos sensibles

El desequilibrio de tensión, también conocido como asimetría de tensión o voltaje desbalanceado, se produce cuando las magnitudes de las tensiones de fase o los ángulos de fase entre ellas no son iguales en un sistema trifásico. En un sistema idealmente equilibrado, las tres tensiones de fase tendrían la misma magnitud y estarían desfasadas 120 grados (Riofrío Jirón & Haro Pico 2013).

Corrección del factor de potencia

El uso de capacitores conectados en paralelo para mejorar la regulación de voltaje en sistemas con bajo factor de potencia. Sin embargo, la corrección del factor de potencia se justifica por múltiples beneficios, entre los que destacan:

1. Reducción de costos en la facturación eléctrica: Muchas empresas de suministro eléctrico aplican cargos adicionales o tarifas diferenciadas según el factor de potencia medido en el punto de conexión.
2. Disminución de las pérdidas de energía en conductores y transformadores: Un bajo factor de potencia implica una mayor circulación de corriente en el sistema para entregar la misma cantidad de potencia real.
3. Optimización de la capacidad instalada: Al reducir la corriente total, la corrección del factor de potencia permite aprovechar mejor la capacidad instalada de transformadores, interruptores, barras colectoras y conductores.

La mayoría de las aplicaciones eléctricas requieren tanto potencia activa como potencia reactiva para operar de manera adecuada. Sin embargo, existen excepciones, como las lámparas incandescentes y los calentadores de resistencia, que solo consumen potencia real. Entre estos beneficios adicionales destacan la regulación de voltaje, el aumento de la capacidad y Disminución o eliminación de penalizaciones económicas.

Tecnologías s de protección y mejora de la calidad de la energía

El principal impulsor detrás del enfoque en la calidad del suministro de energía eléctrica es el



aumento de la productividad para los clientes finales. Para lograr este objetivo, se ha desarrollado una amplia gama de equipos diseñados para mitigar las perturbaciones eléctricas y asegurar un suministro confiable y de calidad. Se pueden definir tres niveles de protección, cada uno con tecnologías específicas como supresores de picos, transformadores de aislamiento, acondicionadores de línea, UPS y plantas de emergencia (Song 2020).

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CÁMARA DE TRANSFORMACIÓN II DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

Las mediciones de los parámetros eléctricos se llevaron a cabo utilizando un analizador de redes Fluke 435 serial II, registrando datos entre el 6 y el 17 de diciembre de 2024. Durante este período, el territorio ecuatoriano experimentó cortes de energía eléctrica de hasta 12 horas de duración, producto de la escasez en la generación eléctrica ocasionada por el estiaje. En el contexto específico de este análisis, se registraron interrupciones de suministro eléctrico con una duración entre 2 y 4 horas.

La Universidad Técnica de Cotopaxi dispone de un generador de respaldo para su sistema eléctrico. Sin embargo, con el fin de optimizar el consumo de combustible, su operación se limitó al horario diurno, proveyendo energía a la comunidad universitaria y permitiendo la continuidad de las actividades administrativas y académicas. Durante el horario nocturno, el generador permaneció inactivo. El analizador de redes registró estos eventos de interrupción y el posterior análisis de los datos reveló la presencia de armónicos leves y desbalances de potencia en el sistema eléctrico.

Curva de carga o demanda

La potencia activa por fase muestra un desbalance en la distribución de carga entre las fases L1, L2 y L3. La fase L1 presenta los valores más altos de potencia activa, lo que sugiere que soporta la mayor carga del sistema, mientras que L3 tiene valores significativamente más bajos, indicando una distribución desigual. La fase L2 se mantiene en un nivel intermedio, con variaciones moderadas. Este desbalance podría generar problemas como pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y vibraciones. Además, se observan fluctuaciones cíclicas en las potencias de todas las fases, con picos de carga que alcanzan aproximadamente 5.6 kW y descensos a 1.3 kW, lo que indica la influencia de cargas variables que se encienden y apagan en diferentes momentos, para optimizar el sistema es necesario redistribuir las cargas entre las fases, equilibrarlas y analizar los dispositivos conectados a cada línea.

Se identifican picos de potencia que señalan momentos de mayor consumo en cada fase, como el pico en L1 alrededor de las 18:25 y en L2 cerca de las 18:45, así como periodos de baja potencia por desconexión de cargas o una menor demanda. Si bien existe desequilibrio, las fases muestran cierta similitud en su comportamiento general en algunos tramos, es fundamental investigar las causas de este desequilibrio, el desbalance de potencia entre fases indica una variación de cargas, lo que hace necesario redistribuirlas para mitigar las diferencias entre una fase y fase, esta redistribución permitirá equilibrar el sistema.

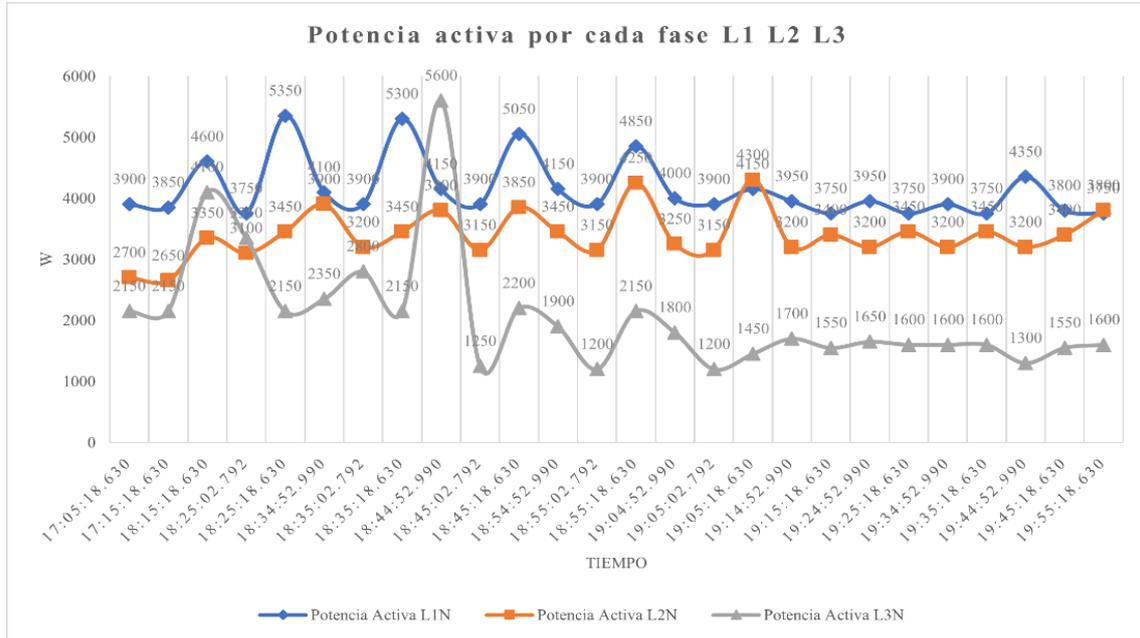


Figura 2. Potencia activa por cada fase L1 L2 L3. Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia

La figura de la frecuencia del sistema revela estabilidad en torno a los 60 Hz durante el período registrado, lo que indica un funcionamiento adecuado del sistema de generación y control. La frecuencia se mantiene dentro del rango aceptable de $\pm 1\%$ para sistemas de 60 Hz, se observan un pico pronunciado alrededor de las 21:05, donde la frecuencia supera ligeramente los 60.013 Hz. Se identifican también otros picos de menor magnitud entre las 17:55 y las 18:55. La variación de frecuencia observada en el valor pico es relacionada con el arranque del generador, ya que la carga se conecta de manera inmediata tras la activación del mismo, lo que puede provocar un mínimo aumento en la frecuencia. De acuerdo con las normativas de la IEEE, la frecuencia de la red debe mantenerse dentro de un rango con una variación máxima de $\pm 0.5\%$ para redes de 50 Hz o $\pm 1\%$ para redes de 60 Hz, con el fin de evitar daños en los equipos y garantizar la estabilidad del sistema.

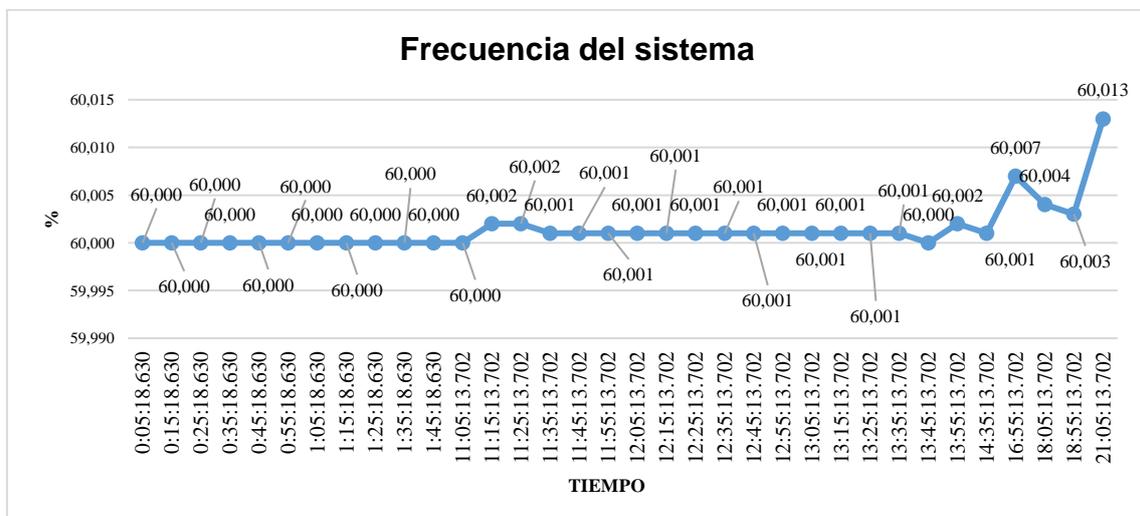


Figura 3. Frecuencia. Fuente: Elaboración propia.



Desbalance de tensión

La gráfica correspondiente al período del 6 al 13 de diciembre de 2024 muestra que el sistema se mantiene estable la mayor parte del tiempo, con un nivel de desequilibrio inferior al 3%. Esto indica un funcionamiento adecuado y en conformidad con la norma IEEE 519, que establece un límite del 3% para el desequilibrio de tensión en el punto de conexión común. Los picos puntuales observados, con variaciones entre el 0.5% y el 1.12%, se deben principalmente a la conexión o desconexión de cargas monofásicas de magnitud considerable. Aunque estos eventos no comprometen el cumplimiento normativo, es esencial realizar un monitoreo continuo para identificar posibles anomalías o tendencias que puedan afectar la calidad de la energía a largo plazo. Si bien la gráfica no muestra picos de desequilibrio que excedan el límite establecido, cualquier fluctuación inusual debe ser analizada para prevenir impactos negativos en la operación del sistema eléctrico.

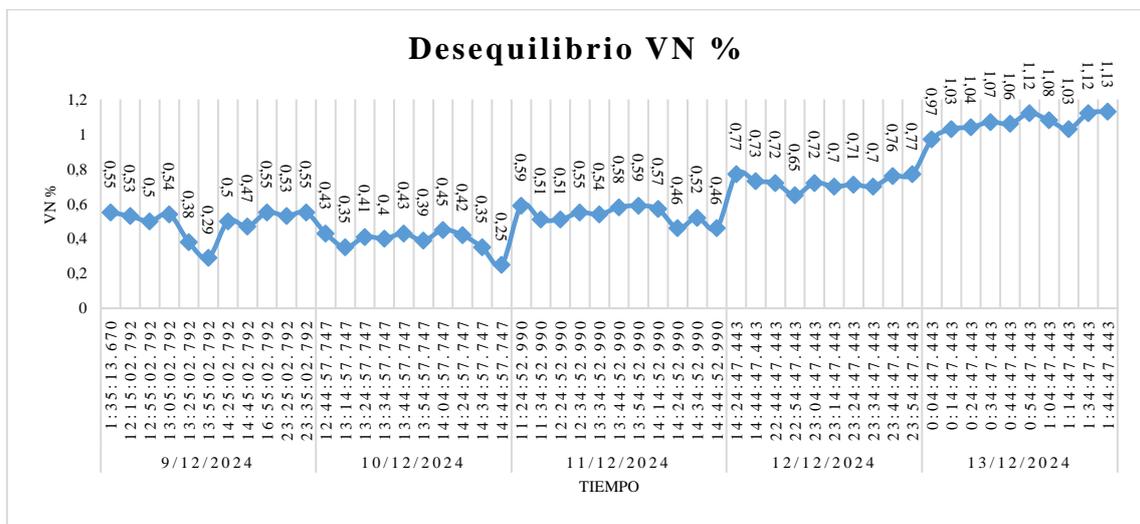


Figure 4. Imbalance Vn % first period. Source: Author's own creation.

THD voltaje en las Fases L1 L2 L3

El análisis del THD de voltaje por fase revela que los niveles de distorsión armónica se mantienen por debajo del límite del 8% recomendado por la norma IEEE 519 para sistemas de baja tensión. Durante el período analizado, se observa una variación gradual, con valores que oscilan entre 1.4% y 2.17%. Se identifican picos en la fase L3, alcanzando un máximo de 2.17%, probablemente debido a la presencia de cargas no lineales en el sistema, así como al arranque de generadores o la desconexión de grandes cargas. No obstante, estos picos no representan un riesgo significativo, ya que la diferencia entre fases es mínima, lo que indica un comportamiento equilibrado del sistema en términos de distorsión armónica. Sin embargo, se recomienda un monitoreo continuo para detectar posibles tendencias crecientes que puedan comprometer la calidad de la energía en el futuro.

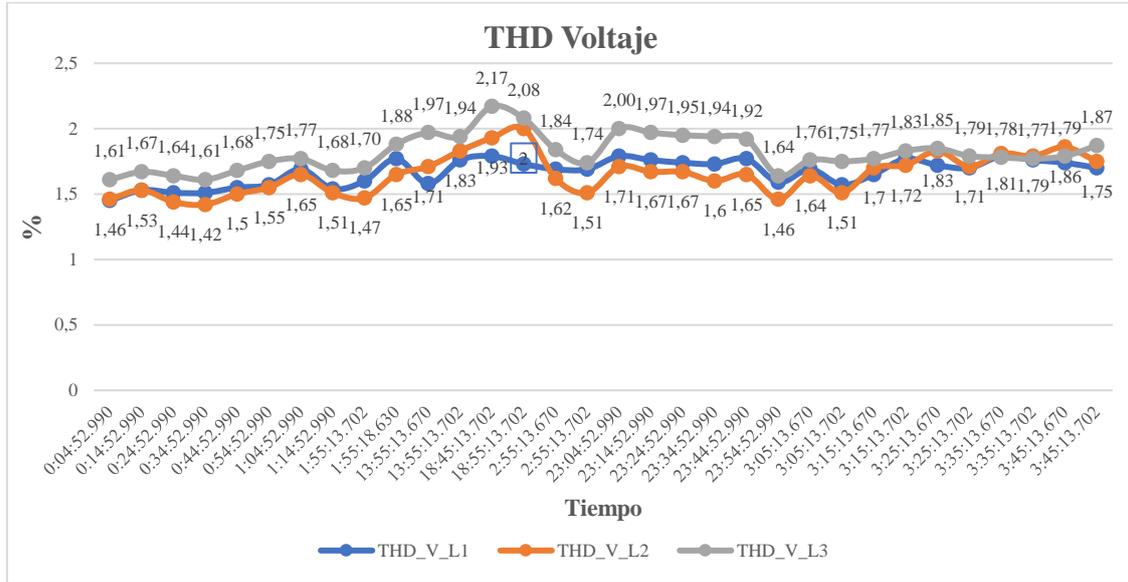


Figura 5. THD voltaje. Fuente: Elaboración propia.

Onda de voltaje monofásico con armónicos

En la figura 6, titulada "Onda de Voltaje Monofásico Pico con Armónicos", se pueden distinguir dos formas de onda. La línea punteada representa una onda senoidal fundamental ideal de 60 Hz, la cual corresponde a la forma de onda de voltaje característica de una señal senoidal pura y simétrica. En contraste, la línea continua muestra la onda de voltaje afectada por los armónicos presentes en el análisis de calidad de la cámara de transformación 2. En este caso, los armónicos de los órdenes 3, 5 y 7 se suman a la onda fundamental. Se observa que la señal presenta alteraciones visuales mínimas en comparación con la onda fundamental. Una de las distorsiones más notables se encuentra en las crestas de la onda. Mientras que la onda senoidal fundamental tiene crestas redondeadas, las crestas de la onda con armónicos se muestran más aplanadas y puntiagudas. Este cambio en la forma de las crestas es una indicación visual clara de la presencia de armónicos mínimos y su impacto en la forma de la onda de voltaje.

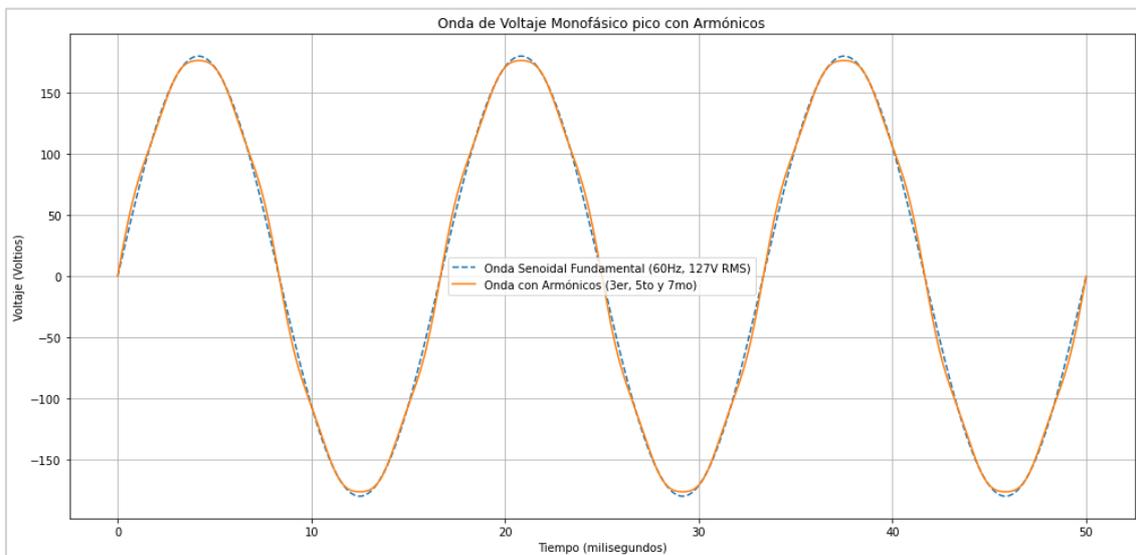


Figura 6. Onda de voltaje monofásica. Fuente: Elaboración propia.



Armónico de voltaje impar

El análisis de los armónicos de tensión de orden 3, 5 y 7 en un sistema trifásico de 127 V por fase durante un periodo de 7 días revela importantes aspectos en cuanto a la calidad de la energía. De acuerdo con la normativa IEEE 519, que establece límites para la distorsión armónica en sistemas eléctricos, se especifica que sistemas de baja tensión, como el de la cámara de transformación de la UTC, los niveles armónicos individuales de voltaje no deben superar el 5.0%, mientras que la Distorsión Armónica Total de Voltaje (THD) no debe exceder el 8.0% en el Punto de Acoplamiento Común (PCC). La gráfica muestra que, para las tres fases L1N, L2N y L3N, los armónicos se mantienen por debajo del límite individual del 5.0% establecido por la IEEE. Sin embargo, para asegurar el cumplimiento completo de la normativa IEEE 519 y realizar una evaluación, se calculó la Distorsión Armónica total, la cual resultó en un valor máximo del 2.17%, que se encuentra bien por debajo del límite del 5.0%. Por lo tanto, aunque los armónicos individuales se mantienen dentro de los valores permitidos, el análisis de la THD demuestra que la calidad de la energía está dentro de los parámetros normativos y que el sistema no presenta anomalías.

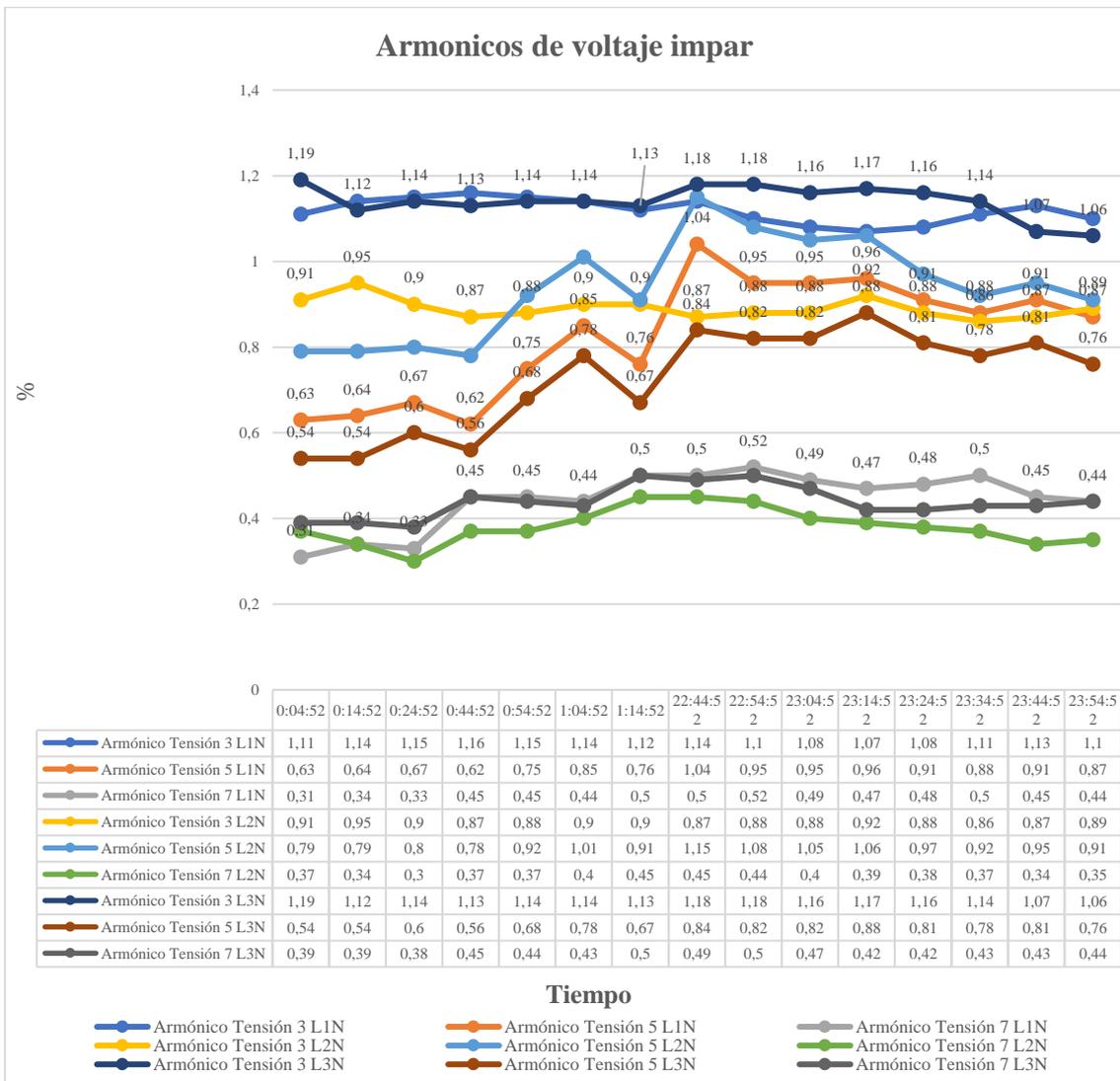


Figura 7. Armónicos impares de voltaje. Fuente: Elaboración propia.

THD de corriente

La figura 8 muestra la evolución de la Distorsión Armónica Total de Corriente (THD) en el sistema a lo largo del tiempo, con las etiquetas "THD A L1", "THD A L2" y "THD A L3", que representan la THD de corriente en las fases L1, L2 y L3, respectivamente, los valores presentan variaciones en el tiempo para cada fase, reflejando cambios en la carga normales del sistema. En la fase L1, la THD de corriente oscila entre aproximadamente 3.5% y 6%. Para la fase L2, los valores fluctúan dentro de un rango entre el 3% y el 6%. La fase L3 muestra un comportamiento que varían entre el 4% y el 6%. Estas fluctuaciones pueden estar asociadas a la operación de cargas no lineales que modifican la demanda de corriente a lo largo del tiempo. Si bien los valores de THD de corriente se mantienen dentro de los límites normativos y no representan un riesgo inmediato para la calidad de la energía, su presencia sugiere la existencia de cargas no lineales que generan corrientes armónicas en el sistema. Entre los principales contribuyentes a esta distorsión se encuentran equipos electrónicos utilizados en los laboratorios, como variadores de voltaje, computadoras y motores en arranque, los cuales introducen armónicos en la red debido a sus características de conmutación. Además, aunque en menor medida, la iluminación LED también puede aportar a la distorsión armónica debido a la electrónica de sus fuentes de alimentación. Es importante monitorear estos niveles de THD de corriente de manera continua, ya que una acumulación de armónicos en el sistema puede provocar sobrecalentamiento en conductores, transformadores y otros equipos eléctricos, reduciendo su vida útil. Además, una elevada distorsión armónica podría afectar la estabilidad del sistema eléctrico y generar interferencias en dispositivos sensibles.

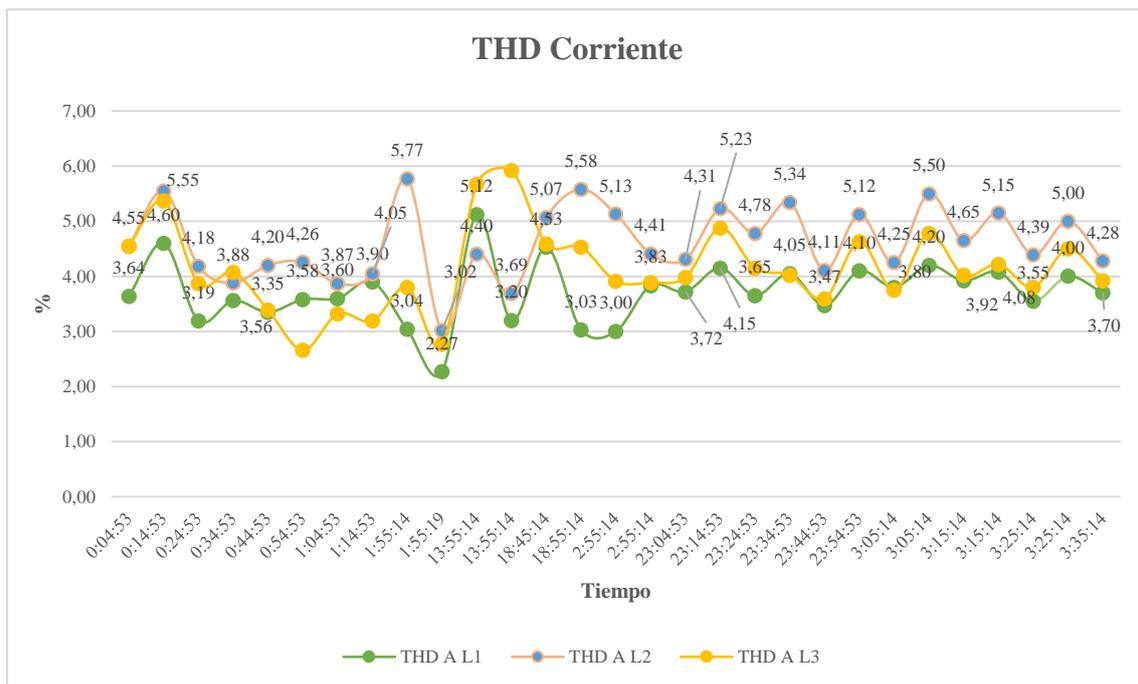


Figura 8. THD de corriente. Fuente: Elaboración propia.

Armónicos de corriente impar

Los armónicos de corriente impares en la figura 9 muestra la evolución de los armónicos individuales de orden 3, 5 y 7 en las fases, estos son indicadores clave de la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico. La norma IEEE 519 define límites para los armónicos individuales de corriente en función de la relación entre la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la corriente de carga máxima (I_L) en el Punto de Acoplamiento Común, los límites varían según la relación (I_{sc}/I_L), sistemas con ($I_{sc}/I_L < 20$), los armónicos de orden 3 a 11 deben mantenerse por debajo del 4%, mientras que los de orden 11 a 17 no deben superar el 2%.



En la gráfica analizada, los valores máximos de los armónicos de corriente de orden 3, 5 y 7 no superan el 2.5%, lo que indica que se encuentran dentro de los márgenes permitidos por la normativa, incluso en los picos. Desde el punto de vista del comportamiento temporal, el armónico de orden 3 presenta picos de hasta 2.3% en la fase L3, mientras que en las fases L1 y L2 muestra fluctuaciones moderadas. El armónico de orden 5 alcanza valores máximos de 2.2%, con oscilaciones a lo largo del tiempo. En comparación, el armónico de orden 7 presenta los valores más bajos, con picos cercanos a 1.8% y variaciones más suaves, estas fluctuaciones sugieren la influencia de cargas no lineales con variaciones en su operación.

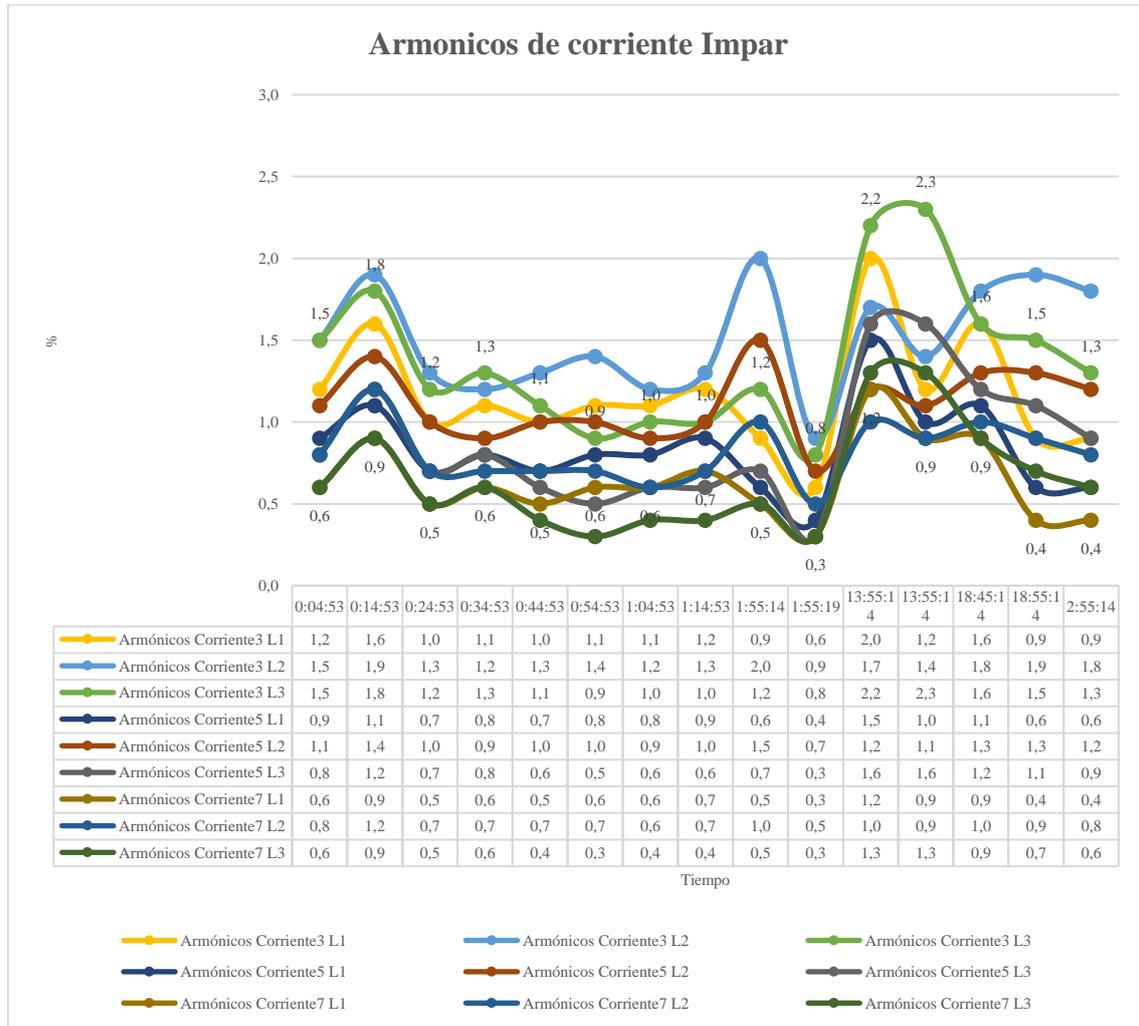


Figura 9. Armónicos impares de corriente. Fuente: Elaboración propia.

Factor de potencia

La tabla 1 se muestran los resultados del análisis del factor de potencia de cada una de las tres fases, datos recolectados del 06 al 13 de diciembre con intervalos de registro de datos cada 10 minutos según normativa nacional "Resolución Nro. ARCERNR -003/2023" emitida por la Agencia de regulación y control de Energía lo cual en el tiempo de 7 días tenemos 795 registros por cada fase, mediciones que se toman como un 100% para determinar el porcentaje de incumplimiento respecto a la normativa.



Tabla 1. Factor de potencias por las líneas del sistema

Factor de potencia		
Fase	Valor promedio	Limites mínimo
L1	0.948	0.92
L2	0.932	0.92
L3	0.921	0.92

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se evidencia el cumplimiento de la normativa, la cámara de transformación N° 2 alimenta al tablero de distribución principal (TDP N° 1), que a su vez suministra energía al bloque de laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Aplicadas (CIYA). Dado que este alimentador está destinado a proporcionar energía a los laboratorios de la facultad, su consumo eléctrico es altamente variable debido a las distintas actividades académicas que allí se realizan. Entre estas actividades se incluyen prácticas de arranque de motores, pruebas de alto voltaje, sincronismo, uso de fresadoras, rectificadores y laboratorios de simulación, todas ellas asociadas a cargas no lineales. La operación de estos equipos provoca fluctuaciones en la demanda de energía, lo que a su vez impacta en el factor de potencia (FP), se registran valores de factor de potencia igual a cero, lo que se debe a la interrupción del suministro eléctrico durante la emergencia energética que afectó al país desde principios de abril hasta la segunda semana de diciembre de 2024, con cortes de aproximadamente dos horas de duración.

CONCLUSIONES

El factor de carga de la Universidad Técnica de Cotopaxi se ve afectado por el desbalance de carga en cada una de sus fases, actualmente, la carga se encuentra desequilibrada, por lo que se recomienda, como primera medida, implementar un balance de carga que reduzca la diferencia de corriente entre las fases, los principales problemas de calidad de energía está relacionado con la presencia de cargas no lineales, cuya incidencia ha aumentado debido a la implementación de nuevos laboratorios, el crecimiento de la población estudiantil y la transición tecnológica hacia iluminación LED. Este último factor, junto con la presencia de rectificadores, es una fuente significativa de armónicos, el THD de voltaje presentó una variación gradual, con valores entre 1.4% y 2.17%, con picos en la fase L3 que alcanzaron un máximo de 2.17%, posiblemente debido al arranque del generador o la desconexión de grandes cargas.

Durante el período de estiaje en Ecuador, los cortes de energía oscilaron entre 2 y 12 horas diarias, lo que obligó a la institución a operar con un generador de respaldo. En el momento del arranque del generador, se observó un leve desequilibrio de tensión y una variación mínima en la salida de carga, con valores que no superan el 1.12%, cumpliendo con el límite máximo del 3% establecido en la normativa.

Los armónicos de voltaje se encuentran dentro de los límites permitidos por la normativa IEEE 519. En cuanto a los armónicos individuales de corriente, se registraron picos de hasta 2.3%, valores que también cumplen con la normativa, aunque estos aumentos coinciden con el período en que el generador está conectado a la carga. Además, la presencia de estos armónicos se debe a que la carga no está balanceada y solo representa entre el 20% y el 25% de la capacidad del transformador de 300 KVA, se recomienda conectar el nuevo edificio en construcción para optimizar los niveles de operación del transformador. Los valores analizados evidencian que los cortes de energía y el uso de generadores pueden alterar el comportamiento del sistema eléctrico. Por ello, es necesario realizar un estudio detallado de la calidad de energía en dos escenarios: primero, con el suministro de la empresa de distribución



asegurando un balance de carga y segundo, con la conexión del generador para evaluar su impacto en la calidad de energía. De esta manera, se podrán evitar posibles sanciones reguladas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR).

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por incentivar la investigación científica.

REFERENCIAS

- Agnello, A., et al. (2022). Proposal for flicker measurement and evaluation in grid-connected low-power wind turbines. *2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, San Juan, Argentina, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON55245.2022.9939856>
- Aponte, Guillermo, Herrera, Wilder, González, Carlos, & Pleite, Jorge. (2011). Implementación de un Modelo de un Transformador Eléctrico para el Análisis de su Respuesta en Frecuencia [Implementation of a model of an electrical transformer for the analysis of its frequency response]. *Información tecnológica*, 22(4), 5-72. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000400008>
- Borrás, M. D., Bravo, J. C., & Montaña, J. C. (2016). Disturbance ratio for optimal multi-event classification in power distribution networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(5), 3117–3124. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2521615>
- Castañeda Ordóñez, O. S. (2009). *Análisis de calidad de energía de la calidad del producto de la zona urbana de Milagro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Milagro* [Analysis of power quality of product quality in the urban area of Milagro in the concession area of Empresa Eléctrica Milagro] [Tesis de grado]. Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9941>
- De Yong, D., Reineri, C., & Magnago, F. (2013). Educational software for power quality analysis. *IEEE Latin America Transactions*, 11(1), 479–485. <https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6502849>
- Dhulipala, S. C., Bretas, A., & Baeyens, E. (2019). Control strategy design for power quality management in active distribution networks. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1903.03710>
- Espinoza, J. L., González, L. G., & Sempértegui, R. (2017). Micro grid laboratory as a ability for research on non-conventional energy sources in Ecuador. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261615>
- Holguín, M., & Gómez Coello, D. (2010). *Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana* [Analysis of the quality of electrical power on the new campus of the Universidad Politécnica Salesiana] [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2110>
- Muyulema Cholota, M. F. & Pachacama Toapanta, W. A. (2021). *Análisis de la calidad de la energía eléctrica en el campus de la Escuela Politécnica Nacional*. 133 hojas [Analysis of the quality of the electrical power on the campus of the National Polytechnic School .133 pages]. Quito: EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21682>



- Riofrío Jirón, J. A., & Haro Pico, M. E. (2013). *Análisis de calidad de la energía eléctrica en los puntos de recepción de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil* [Analysis of the Quality of the Electricity at the Reception Points of the Catholic University of Santiago de Guayaquil] [Tesis de grado]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. <https://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1630>
- Song, J. (2020). Actual measurement and analysis of power transformer dynamic stability diagnosis by low voltage reactance method based on short circuit test check. *2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS)*, Shenyang, China, 104–108. <https://doi.org/10.1109/TOCS50858.2020.9339613>

Derechos de autor: 2025 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>