

Estudio de calidad de la energía en una industria en Ciudad Juárez, México

Power quality study in an industry in Ciudad Juarez, Mexico

Luis Edwin López López^{1a}  , Francisco Javier Enríquez Aguilera^{1b} , Abel Eduardo Quezada Carreón^{1b} ,
David García Chaparro^{1b} , Jesús Martín Silva Aceves^{1b} 

^{1a}{Doctorado en Tecnología, Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas}, ^{1b}{Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación}, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar los parámetros que afectan la calidad de la energía eléctrica en una industria maquiladora en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, identificando las normas vigentes y las consecuencias de problemas en la calidad de la energía. La metodología empleada incluye la recolección de datos mediante un analizador de red Fluke 1750 Power Recorder, seguido de un análisis detallado de factores como voltaje, corriente, frecuencia y distorsión armónica. Los resultados revelan que la calidad de la energía presenta variaciones significativas que pueden impactar la eficiencia operativa de la industria, así como la vida útil de los equipos. Se proponen acciones de mejora basadas en los hallazgos, destacando la importancia de realizar estudios periódicos para garantizar un suministro eléctrico estable. Este trabajo contribuye a la sustentabilidad al promover un uso más eficiente de la energía, reduciendo costos operativos, lo que a su vez minimiza el impacto ambiental de las operaciones industriales. La implementación de las recomendaciones derivadas del estudio no solo optimiza el rendimiento energético, sino que también fomenta prácticas responsables en el uso de recursos, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible.

PALABRAS CLAVE: calidad de la energía; sustentabilidad; análisis eléctrico; eficiencia energética; optimización.

ABSTRACT

This study aims to analyze the parameters that affect the quality of electrical energy in a maquiladora industry in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico, identifying current regulations and the consequences of problems in energy quality. The methodology used includes data collection through a Fluke 1750 Power Recorder, followed by a detailed analysis of factors such as voltage, current, frequency, and harmonic distortion. The results reveal that energy quality shows significant variations that can impact the operational efficiency of the industry, as well as the lifespan of equipment. Improvement actions are proposed based on the findings, highlighting the importance of conducting periodic studies to ensure a stable power supply. This work contributes to sustainability by promoting more efficient energy use, reducing operational costs, which in turn minimizes the environmental impact of industrial operations. The implementation of the recommendations derived from the study not only optimizes energy performance but also encourages responsible practices in resource usage, aligning with sustainable development goals.

KEYWORDS: power quality; sustainability; electrical analysis; energy efficiency; optimization.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Luis Edwin López López

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Av. del Charro 450 norte, colonia Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez Chihuahua, México

CORREO ELECTRÓNICO: edwin.lopez@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de mayo de 2025. **Fecha de aceptación:** 10 de julio de 2025. **Fecha de publicación:** 4 de agosto de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un recurso vital para el funcionamiento de la industria y el comercio moderno. Su disponibilidad y calidad afectan directamente la operación de los equipos y la eficiencia de los procesos productivos. Sin embargo, la calidad de la energía puede verse comprometida por una serie de factores que, si no se controlan adecuadamente, generan serios problemas en los sistemas eléctricos [1]. Entre los principales parámetros que influyen en la calidad de la energía se encuentran la tensión, la frecuencia, los armónicos, los desequilibrios y las caídas de tensión [2]. Estos problemas pueden causar daños a los equipos, disminuir su vida útil y provocar fallas operativas que se traducen en pérdidas económicas significativas.

Para mitigar estos riesgos, existen diversas normativas que establecen límites y recomendaciones en cuanto a la calidad de la energía suministrada. En el caso de México, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 [3] fija los requisitos mínimos para garantizar una calidad de energía aceptable en instalaciones eléctricas. Esta normativa establece umbrales para la distorsión armónica, el desequilibrio de fase y otros aspectos críticos que deben ser monitoreados y gestionados en las redes eléctricas industriales [3]. Además, en el ámbito internacional, normas como la IEEE 519 [4], y la IEC 61000 [5] proporcionan lineamientos técnicos para la mejora de la calidad energética, aplicables en distintos países y regiones.

La importancia de mantener una buena calidad de energía ha ido en aumento debido a la creciente integración de dispositivos electrónicos y sistemas automatizados en una industria. La demanda de electricidad más limpia y estable es una prioridad para las empresas que buscan optimizar sus operaciones y prolongar la vida útil de sus sistemas. De lo contrario, se enfrentan a problemas como el sobrecalentamiento de equipos debido a armónicos no controlados, paradas inesperadas de la producción causadas por caídas de tensión, o incluso daños irreversibles en maquinaria sensible [6].

A nivel empresarial, muchas compañías se ven obligadas a contratar servicios externos para llevar a cabo análisis exhaustivos de la calidad de la energía, ya que no cuentan con los instrumentos necesarios para monitorear constantemente su red eléctrica. Dispositivos

avanzados, como Fluke 1750 Power Recorder, utilizado en algunas investigaciones, permiten realizar mediciones detalladas en tiempo real de variables como tensión, corriente y potencia, ofreciendo un diagnóstico completo de las perturbaciones que puedan afectar la calidad del suministro eléctrico.

El cumplimiento de normativas, como el Código de Red mexicano, también impone desafíos adicionales a las empresas, especialmente en lo que respecta al factor de potencia, la frecuencia y la estabilidad del sistema eléctrico [7]. Estas regulaciones buscan asegurar que las empresas que superan un umbral de consumo energético operen dentro de parámetros que optimicen la eficiencia energética y reduzcan las pérdidas. El Código de Red establece, por ejemplo, que el factor de potencia debe mantenerse en un 95 % (cifra que aumentará al 97 % a partir de 2026), lo que obliga a las industrias a implementar estrategias de mejora en la gestión de su energía [8].

Desde una perspectiva de sustentabilidad, asegurar una alta calidad de energía no solo es una cuestión técnica, sino que está directamente relacionado con la eficiencia en el uso de los recursos energéticos [9]. El mal uso o la ineficiencia en la gestión de la energía eléctrica pueden llevar a un mayor consumo y desperdicio de recursos, aumentando así la huella de carbono de las operaciones industriales [10]. Por lo tanto, este estudio no solo aborda las soluciones técnicas para mejorar la calidad de la energía, sino que también destaca su contribución a los objetivos de desarrollo sustentable, al promover un uso más racional y eficiente de la electricidad.

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar una visión integral de las medidas necesarias para mantener una calidad óptima de energía en instalaciones industriales y comerciales, así como discutir las implicaciones de no hacerlo. Además, se propone un enfoque educativo y práctico que permita a los ingenieros en formación desarrollar habilidades en el monitoreo y gestión de la energía, favoreciendo la implementación de tecnologías más sostenibles en el futuro.

En última instancia, la mejora de la calidad de la energía no solo beneficia a las empresas al reducir costos y aumentar la productividad, sino que también es un paso esencial hacia un uso más responsable y sustentable de los recursos energéticos.

II. METODOLOGÍA

La metodología del proyecto se estructuró en varias etapas clave para garantizar un análisis exhaustivo de la calidad de la energía eléctrica en una industria maquiladora en donde se realizó. A continuación, se detalla cada una de estas etapas:

Revisión bibliográfica: Se realizó una investigación exhaustiva en diversas fuentes, incluyendo revistas científicas, reportes gubernamentales y normas vigentes relacionadas con la calidad de la energía. Esta revisión permitió identificar los parámetros críticos que afectan la calidad de la energía y las normativas aplicables.

Identificación de parámetros. Se identificaron los principales parámetros que influyen en la calidad de la energía eléctrica, tales como voltaje, corriente, frecuencia, distorsión armónica y transitorios eléctricos. Esta identificación es fundamental para entender los factores que pueden causar problemas en el suministro eléctrico.

Planificación del estudio. Antes de llevar a cabo el estudio, se coordinó con la empresa eléctrica y se realizó una visita a las instalaciones de la maquiladora, durante la cual se hizo un recorrido por las instalaciones para conocer el entorno y determinar los puntos de conexión adecuados para el analizador de red.

Instrumentación y medición. Se utilizó un analizador de red Fluke 1750 Power Recorder para recopilar datos sobre la calidad de la energía. Este equipo permite medir y registrar parámetros eléctricos en tiempo real, lo que facilita la obtención de datos precisos y representativos.

El Fluke 1750 es un analizador de calidad de energía empleado para medir variables eléctricas esenciales en sistemas industriales (Figura 1). A continuación, se detalla el proceso general llevado a cabo para su uso en estudio dentro de la industria maquiladora:

1. Configuración del dispositivo: se programaron las mediciones necesarias (voltaje, corriente, frecuencia, armónicos, factor de potencia, etc.), utilizando el software Power Log, que se conectó al Fluke 1750 mediante un cable USB.



Figura 1. Fluke 1750 Power Recorder. Fuente: reproducida de [11], con el permiso correspondiente.

2. Instalación: el equipo se colocó en el punto de medición adecuado y se conectó al sistema eléctrico mediante pinzas amperimétricas y cables de medición de voltaje.
3. Medición: las lecturas pueden realizarse en tiempo real o de forma programada. Durante la medición, el Fluke 1750 registró continuamente las variables eléctricas del sistema.
4. Descarga y análisis de datos: al finalizar la medición, los datos se transfirieron al software Power Log para su visualización y análisis. Este proceso permitió identificar problemas eléctricos como armónicos, desequilibrios o variaciones de voltaje.
5. Generación de informes: con los resultados obtenidos, se elaboró un informe detallado que se puede usar para diagnosticar y corregir problemas en el sistema eléctrico de la industria maquiladora.

Además, se utilizó un multímetro de pinza Fluke 381 (Figura 2), que es un dispositivo portátil diseñado para medir corriente, voltaje y resistencia en sistemas eléctricos. Su principal ventaja radica en que permite medir la corriente sin necesidad de interrumpir el circuito. Esta herramienta es ideal para electricistas y técnicos, ya que facilita obtener mediciones precisas sin establecer contacto directo con los conductores.

Recolección de datos. Se definió un periodo de medición adecuado para recopilar datos representativos, garantizando que las mediciones reflejen las variaciones en la calidad de la energía a lo largo del tiempo. Este periodo fue seleccionado considerando las distintas condiciones operativas de la maquiladora.



Figura 2. Multímetro de pinza Fluke 381. Fuente: reproducida de [11], con el permiso correspondiente.

La norma IEC 61000-4-30 [12] establece que la prueba de calidad de la energía tendrá una duración de 7 días, lo cual representa una ventaja, ya que la industria maquiladora evaluada opera de forma continua durante toda la semana. Este periodo permite obtener una visión completa de la calidad de la energía bajo diversas condiciones de carga. Durante este tiempo, se empleó el analizador Fluke 1750 Power Recorder para realizar un registro continuo de los datos del sistema eléctrico.

Es posible ajustar la duración según los objetivos del proyecto, la complejidad del sistema o la necesidad de detectar patrones prolongados o problemas esporádicos. Factores como las restricciones presupuestarias también pueden influir en la duración del estudio, ya que este proceso conlleva gastos asociados tanto por la contratación del servicio como por el uso de equipos especializados.

Aunque un periodo más corto puede ser viable, se optó por encontrar un equilibrio entre tiempo y representatividad para asegurar datos precisos que permitan obtener conclusiones fiables sobre la calidad de la energía del sistema.

Al continuar con la fase de planificación, instalación y configuración del Fluke 1750 Power Recorder, esta se llevó a cabo considerando los puntos de medición identificados previamente durante un recorrido técnico (Figura 3). Se puso especial énfasis en la correcta conexión de sondas y cables a paneles de control, dispositivos eléctricos u otros puntos relevantes del sistema.

Ha sido fundamental seguir las indicaciones del manual del equipo para garantizar mediciones precisas y evitar riesgos eléctricos. En algunos casos, fue necesario coordinarse con el personal de la maquiladora para facilitar el acceso a los puntos de conexión y asegurar condiciones de trabajo seguras durante la instalación.

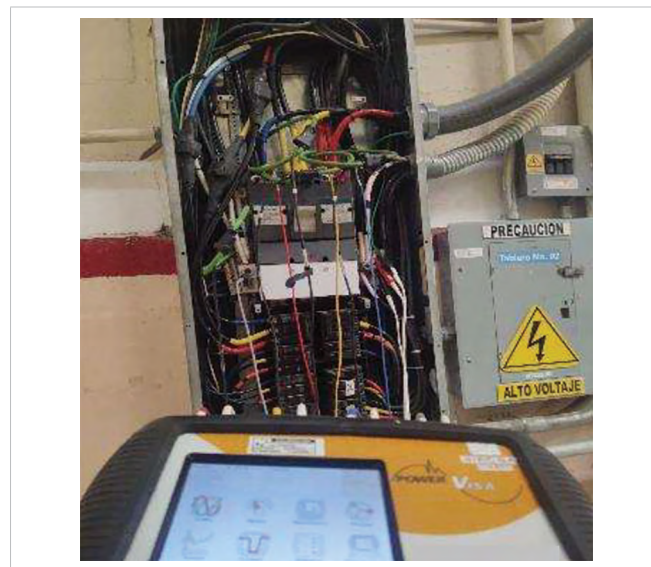


Figura 3. Selección del lugar de conexión.

Para este estudio se seleccionó la configuración “3 fases 4 hilos en estrella”, según las recomendaciones del manual y la experiencia del técnico encargado. Esta elección responde a que el tablero eléctrico está conectado directamente a un transformador con una configuración delta-estrella (Figura 4). En este tipo de conexión, la alimentación llega en tres fases (delta) y se distribuye hacia el tablero en cuatro hilos (estrella), lo cual es habitual en sistemas eléctricos industriales.

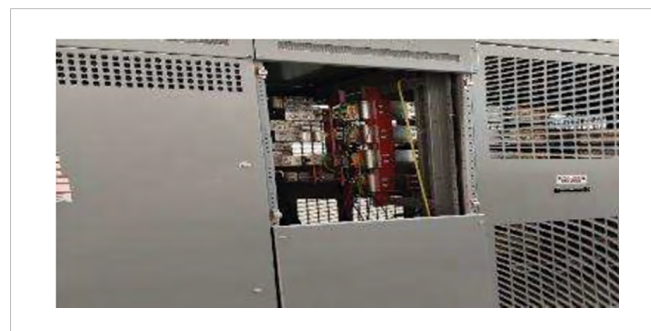


Figura 4. Visualización de parte del tablero a analizar.

La configuración “3 fases 4 hilos en estrella” es adecuada porque permite medir con precisión tanto las tres fases de corriente y voltaje como el neutro. Esto garantiza

un análisis integral de la calidad de energía del sistema. Posteriormente, se realizó la conexión del Fluke 1750 a las fases y al neutro del tablero eléctrico, siguiendo las instrucciones del manual (Figura 5). Esta instalación meticulosa aseguró que se recolectaran datos precisos para evaluar el rendimiento del sistema eléctrico de manera efectiva.

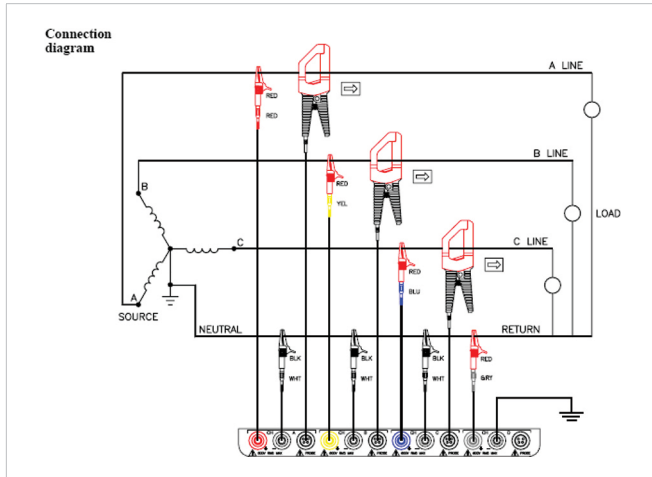


Figura 5. Método de conexión para el analizador al sistema trifásico en estrella. Fuente: [13].

Para ofrecer una explicación más clara sobre el proceso de conexión del equipo, se incorporan fotografías adicionales que detallan cada paso del procedimiento. Estas imágenes (Figuras 6, 7 y 8) complementan la descripción escrita y facilitan una mejor comprensión visual de cómo se llevó a cabo la instalación del Fluke 1750 Power Recorder en el sistema eléctrico de la industria maquiladora.



Figura 6. Apertura del lugar de conexión del equipo analizador.



Figura 7. Inspección del equipo conectado a la red eléctrica de la industria maquiladora.



Figura 8. Equipo conectado y recabando datos.

Es importante destacar que, durante la prueba, se empleó equipos de protección personal específicos para trabajos con riesgo eléctrico, ya que garantizar la seguridad de los trabajadores en entornos eléctricos es una prioridad fundamental. A continuación, se detallan los elementos utilizados en este estudio, así como las normativas que deben cumplir:

- Guantes dieléctricos: proveen protección contra contactos eléctricos y deben cumplir con la norma NOM-113-STPS [14], que establece los requisitos y clasificaciones de resistencia.
- Lentes de protección: previenen lesiones en ojos y rostro frente a impactos, salpicaduras y partículas volátiles, y deben ajustarse a la norma NOM-116-STPS [15].

- Calzado dieléctrico: evita el riesgo de electrocución desde el suelo y debe cumplir con la norma NOM-115-STPS [16].
- Casco de seguridad: protege la cabeza contra golpes y objetos que puedan caer, conforme a las especificaciones de la NOM-115-STPS [16].
- Overol Arc Flash: diseñado para resguardar al trabajador de arcos eléctricos, este traje es resistente a las llamas y protege contra radiación térmica. La selección del overol debe seguir la NOM-017-STPS [17].
- Careta de protección: cubre el rostro y los ojos, brindando defensa contra salpicaduras, partículas, y arcos eléctricos. Es indispensable que cumpla con las normas de seguridad aplicables, como la NOM-116-STPS [15].

El cumplimiento de estas normas garantiza que el equipo utilizado (Figura 9) sea adecuado para mitigar riesgos eléctricos, asegurando un entorno de trabajo más seguro para los operarios.



Figura 9. Método de utilización del equipo de protección en análisis de calidad de la energía.

Análisis de resultados. Una vez recopilados los datos, se realizó un análisis detallado para identificar patrones, anomalías y tendencias en la calidad de la energía. Se compararon los resultados obtenidos con las normas vigentes para determinar el cumplimiento y las áreas de mejora.

Propuestas de mejora. Con base en el análisis de los resultados, se elaboraron recomendaciones y acciones de mejora para optimizar la calidad de la energía en la maquiladora. Estas propuestas se enfocaron en la implementación de tecnologías y prácticas que minimicen las perturbaciones en el suministro eléctrico.

Presentación de resultados. Finalmente, se elaboró un informe que incluye los hallazgos, conclusiones y recomendaciones del estudio. Este informe se presentó a los responsables de la maquiladora, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones informadas sobre la gestión de la calidad de la energía.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según las normas mexicanas, los diagramas de fasores en una red eléctrica deben cumplir con ciertos requisitos específicos que garantizan su precisión y consistencia. Estos requisitos están diseñados para asegurar un análisis correcto del comportamiento eléctrico de la red y facilitar su interpretación técnica. A continuación, se detallan dichos aspectos:

- Voltaje: 127 V, nominal a 60 Hz, con tolerancia de $\pm 5\%$ y $\pm 1\%$ en la frecuencia. El ángulo de fase debe estar entre 0° y $\pm 30^\circ$.
- Corriente: 60 Hz con $\pm 1\%$ de tolerancia, ajustada a la capacidad de los dispositivos y ángulo de fase entre 0° y $\pm 30^\circ$.
- Factor de potencia: mayor a 0.9 con ± 0.1 de tolerancia, mostrando un ángulo cercano a 0° .
- Armónicos: dentro de los límites normativos, indicando magnitud y ángulo para cada armónico.

Estas son algunas de las características exigidas por la norma mexicana NOM-001-SEDE-2012 para garantizar la calidad de la energía [3].

VOLTAJE RMS

Como se observa en la Figura 10, el voltaje teórico esperado es de 277 V, mientras que el valor RMS promedio varía entre 282.41 V y 296.30 V, superando consistentemente el valor teórico.

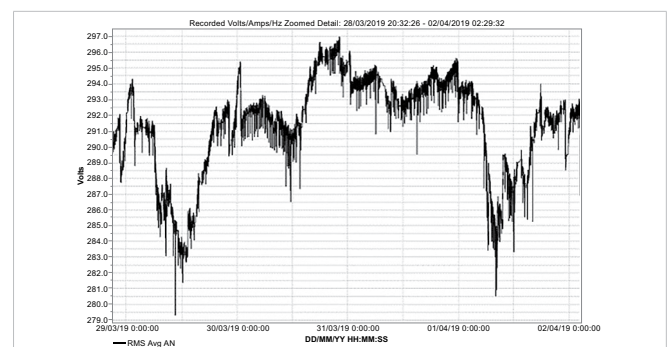


Figura 10. Voltaje RMS fase A-N.

De la misma forma, en la **Figura 11** el voltaje fluctuó entre 281.09 V y 294.27 V. Durante la mayor parte del periodo de monitoreo, se mantuvo por encima del valor nominal de 277 V.

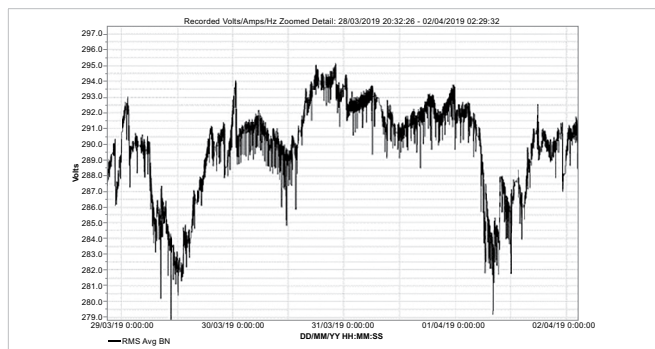


Figura 11. Voltaje RMS fase B-N.

De acuerdo con la **Figura 12**, el voltaje teórico esperado es de 277 V, mientras que el valor RMS promedio se mantuvo entre 281.14 V y 293.73 V, siguiendo un patrón similar al de las otras fases.

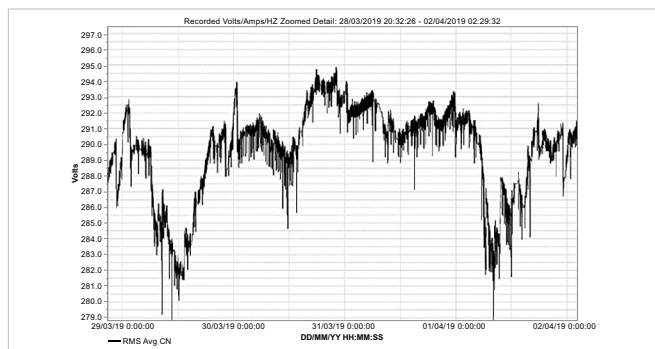


Figura 12. Voltaje RMS fase C-N.

CORRIENTE RMS

La **Figura 13** muestra corrientes RMS máximas de 319.86 A y picos instantáneos (en gris) de hasta 518.17 A.

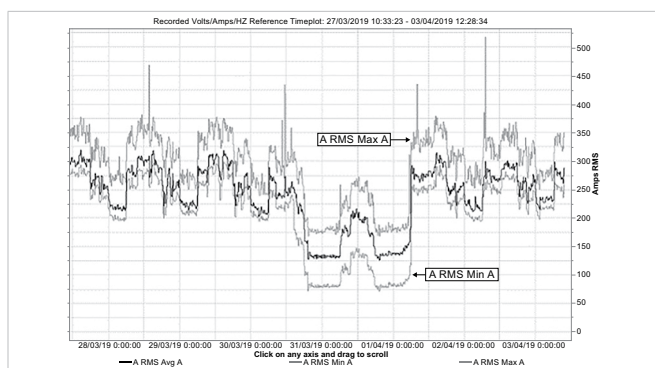


Figura 13. Corriente RMS fase A-N.

DOI: 10.20983/culcyt.2025.2.2e.2

La **Figura 14** evidencia corrientes RMS máximas de 242.96 A y picos instantáneos (en gris) de hasta 411.54 A.

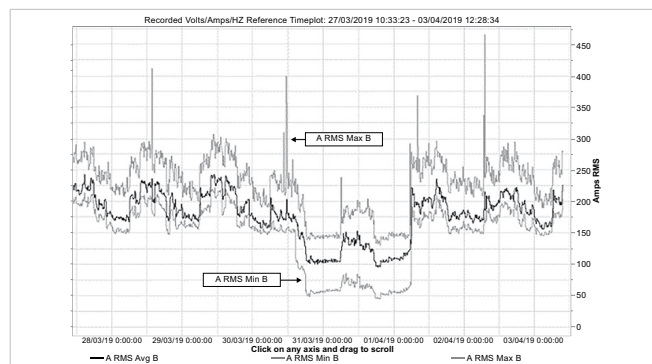


Figura 14. Corriente RMS fase B-N.

La **Figura 15** muestra corrientes RMS máximas de 243.94 A y picos instantáneos (en gris) de hasta 451.82 A, similares a los de las dos fases anteriores.

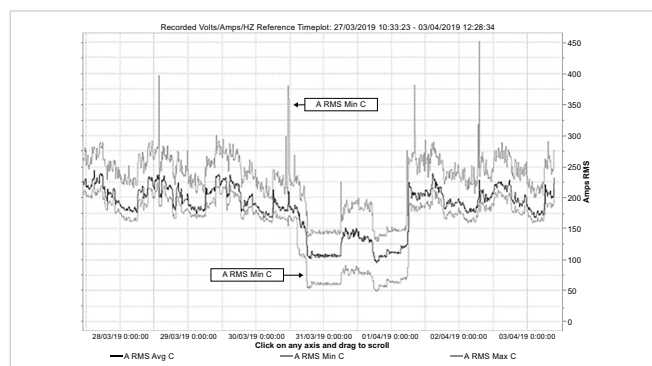


Figura 15. Corriente RMS fase C-N.

FRECUENCIA

La **Figura 16** indica que la frecuencia registrada es adecuada, al mantenerse entre 59.9 Hz y 60.1 Hz. Según la NOM-001-SEDE-2012, la frecuencia nominal en México es de 60 Hz, permitiéndose variaciones de ± 1 Hz, es decir, entre 59 y 61 Hz, sin afectar el funcionamiento del sistema.

La frecuencia depende de la rotación de los generadores en las plantas eléctricas, por lo que cambios en la demanda pueden alterarla. Por ejemplo, un aumento en la demanda puede reducir la frecuencia al requerir más energía para mantener los equipos operando. Además, la calidad de la energía no solo depende de la frecuencia, sino también de factores como armónicos, desequilibrio de cargas y fluctuaciones de voltaje. Por ello, se recomienda un análisis integral para asegurar que la red cumpla con todas las normas aplicables.

ISSN (electrónico): 2007-0411

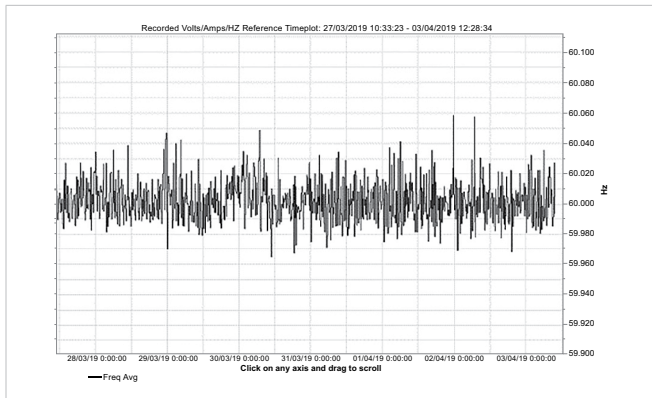


Figura 16. Frecuencia medida.

DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE THDV

La Figura 17 revela que la Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDV) se encuentra entre 1.33 % y 2.91 % en un sistema eléctrico con voltajes menores a 1000 V. Estos valores están dentro de los límites establecidos por las normas mexicanas y la IEEE, que fijan un máximo del 5 % para sistemas eléctricos con voltajes de hasta 69 kV. Cumplir con este parámetro garantiza que la calidad de la energía es adecuada, minimizando el riesgo de fallas en los equipos eléctricos conectados a la red.

Un THDV dentro del rango permitido reduce las probabilidades de interferencia en el funcionamiento de dispositivos sensibles, como motores o equipos electrónicos. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que otros factores también influyen en la calidad de la energía, como la ubicación geográfica, las condiciones climáticas y los cambios en la demanda eléctrica. Un aumento repentino en la carga o un entorno con climas extremos puede generar fluctuaciones en la distorsión armónica, afectando el rendimiento de los sistemas eléctricos.

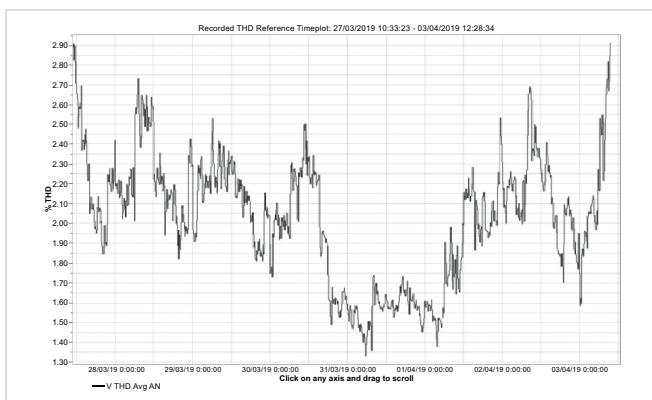


Figura 17. Distorsión armónica de voltaje THDV fase A-N.

Para mantener la estabilidad y el desempeño óptimo de la red, se recomienda realizar monitoreos periódicos de la calidad de la energía y asegurar el mantenimiento preventivo de los equipos. Esto permite identificar y corregir a tiempo cualquier desviación en los parámetros establecidos, evitando daños mayores o interrupciones en la operación. Si se detectan niveles de THDV superiores al límite normativo, será necesario aplicar medidas correctivas, como la instalación de filtros o la redistribución de cargas, para restablecer los niveles aceptables y asegurar el buen funcionamiento del sistema.

La Figura 18 muestra que la Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDV) varía entre 0.85 % y 2.64 % en sistemas eléctricos de menos de 1000 V, cumpliendo con el límite del 5 % establecido por las normas mexicanas e IEEE para sistemas de hasta 69 kV. Esto ayuda a prevenir problemas futuros y asegura el correcto funcionamiento de los equipos conectados. Si se detectan valores de THDV por encima de los límites, es necesario implementar medidas para mejorar la calidad de la energía eléctrica.

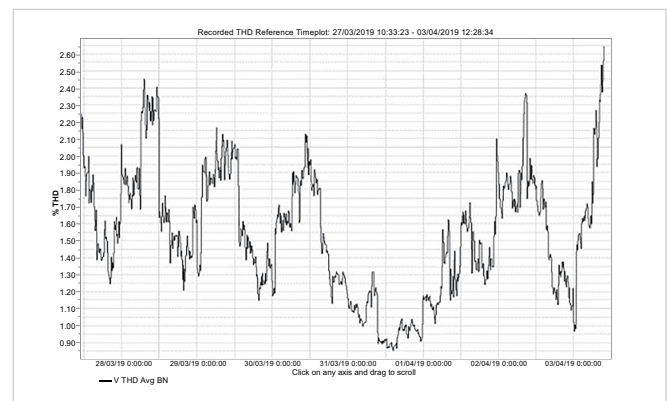


Figura 18. Distorsión armónica de voltaje THDV fase B-N.

Se muestra en la Figura 19 que el valor de la Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDV) varía entre 1.27 % y 2.85 % en un sistema eléctrico de menos de 1000 V. Aunque se encuentra dentro del límite del 5 % establecido por la norma mexicana para sistemas de hasta 69 kV, se aproxima al límite superior, lo que sugiere que la calidad de la energía podría no ser óptima.

Si se superan los límites de THDV, es fundamental implementar medidas correctivas, como la instalación de filtros de armónicos, la corrección del factor de potencia y el remplazo de equipos defectuosos. Esto ayudará

a prevenir futuros problemas y garantizará el adecuado funcionamiento de los equipos eléctricos en la red.

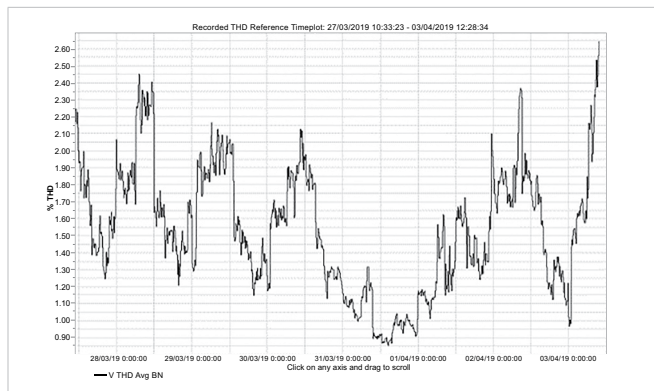


Figura 19. Distorsión armónica de voltaje THDV fase C-N.

DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE THDI

La norma mexicana de calidad de la energía eléctrica de 2012 [3] establece los siguientes límites máximos de THDI para los consumidores conectados a la red de baja tensión:

- 10 % para usuarios residenciales y comerciales.
- 15 % para usuarios industriales y maquiladoras.
- 20 % para aquellos que generen armónicos de corriente que interfieran con otros usuarios en la misma red.

Es fundamental considerar que estos son los límites máximos permitidos y que, en la medida de lo posible, se deben implementar acciones para reducir los niveles de THDI y mejorar sustancialmente la calidad del suministro eléctrico.

La Figura 20 muestra una distorsión armónica total en corriente que varía entre 3.03 % y 9.61 %. Según la norma de 2012, la THDI para la industria maquiladora puede llegar hasta el 20 %.

El hecho de que la THDI se haya registrado entre 3.03 % y 9.61 % indica que la calidad de la energía es aceptable para la mayoría de las cargas eléctricas no sensibles a armónicas. Aunque algunos equipos sensibles podrían enfrentar problemas, la operación general de la industria maquiladora no debería verse afectada significativamente.

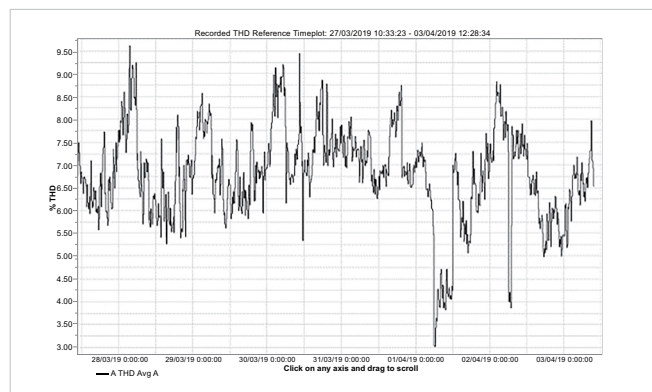


Figura 20. Distorsión armónica de corriente THDI fase A.

La Figura 21 muestra una distorsión armónica total en corriente que varía entre 3.80 % y 11.85 %. Según la norma de 2012, la THDI permitida para la industria maquiladora es de hasta 20 %. Aunque estos valores están dentro de ese rango, se acercan al límite superior, lo que podría ocasionar problemas en algunos equipos eléctricos sensibles a armónicas y afectar la operación industrial. Por ello, se recomienda un monitoreo constante de la THDI y tomar medidas para reducirlo si se aproxima al límite máximo.

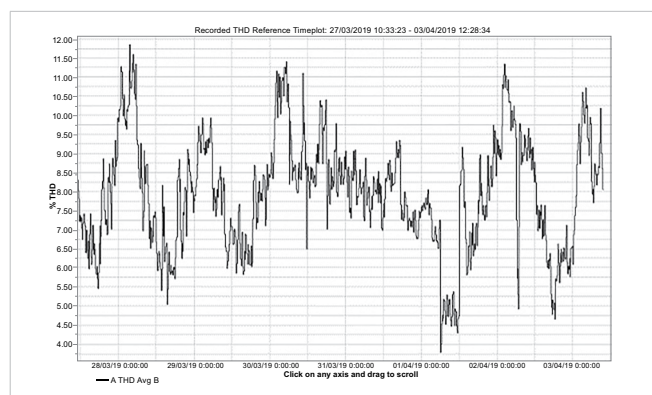


Figura 21. Distorsión armónica de corriente THDI fase B.

La Figura 22 muestra una distorsión armónica total en corriente que varía entre 2.95 % y 10.64 %, con un perfil similar al de fases anteriores. Según la norma de 2012 [3], la THDI en una industria maquiladora no debe exceder el 20 %. Con estos valores, la industria está dentro del rango permitido, lo que sugiere una calidad de energía aceptable para la mayoría de las cargas no sensibles a armónicas. Sin embargo, algunos equipos sensibles podrían enfrentar problemas, por lo que se recomienda un monitoreo continuo de la THDI y tomar medidas si se acerca al límite superior. En general, la operación de la industria maquiladora no debería verse afectada significativamente por la THDI en este rango.

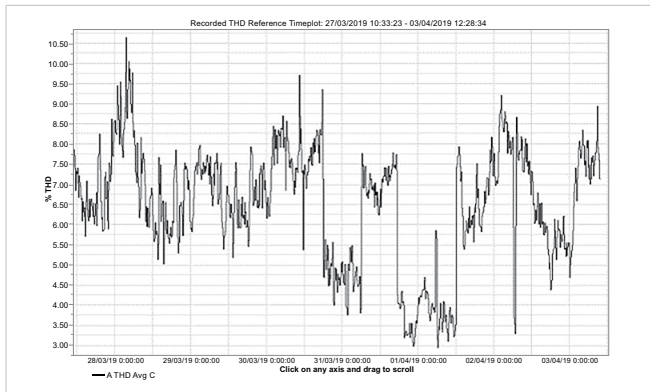


Figura 22. Distorsión armónica de corriente THDI fase C.

POTENCIA REAL

La Figura 23 muestra que la máxima potencia real total registrada es de 227 kW. Según los cálculos, esta potencia es adecuada, ya que el voltaje promedio es de 277 V y la corriente promedio de 319.86 A, con un factor de potencia de 0.80, indicando que la carga es principalmente resistiva e inductiva, lo cual es aceptable para la calidad de energía. Además, la THDI del 7.5 % se encuentra dentro del límite permitido por la norma de 2012 para la industria maquiladora, lo que sugiere que no hay problemas significativos de distorsión armónica. En conclusión, la potencia real de 227 kW cumple con las normas de calidad de energía eléctrica en una industria maquiladora.

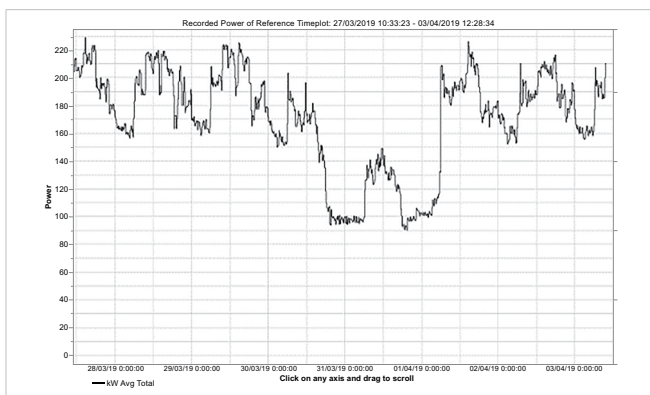


Figura 23. Potencia real en kW.

POTENCIA APARENTE

En la Figura 24 se observa que se registra una potencia activa máxima de 331.69 kVA, con un promedio de 277 V y 319.86 A, un factor de potencia de 0.80 y un THDI de 7.5 %. Se calcula la potencia aparente del sistema maquilador en las ecuaciones (1) y (3) y resultados (2) y (4):

$$\text{potencia aparente} = \text{voltaje} * \text{corriente} \quad (1)$$

$$\text{potencia aparente} = 277 \text{ V} * 319.86 \text{ A} = 88.60 \text{ kVA} \quad (2)$$

Dado que la potencia real es de 227 kW, el factor de potencia se calcula como sigue:

$$\text{factor de potencia} = \frac{\text{potencia real}}{\text{potencia aparente}} \quad (3)$$

$$\frac{227 \text{ kW}}{88.60 \text{ kVA}} = 0.256 \quad (4)$$

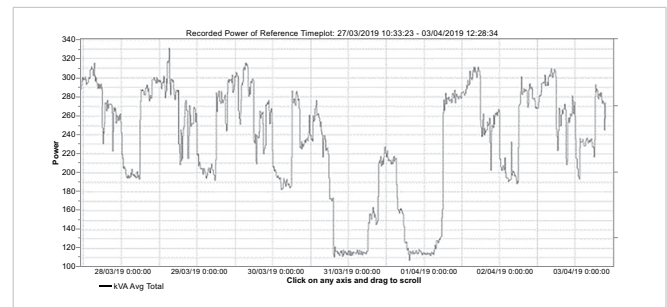


Figura 24. Potencia aparente total en kW.

Este valor indica un consumo significativo de energía reactiva, sugiriendo una sobrecarga en el suministro eléctrico. La THDI está dentro del límite permitido del 20 % según la norma mexicana de calidad de energía eléctrica de 2012 [3].

La potencia aparente es de 88.60 kVA y la potencia real es de 227 kW, lo cual es adecuado para una carga industrial maquiladora. Sin embargo, el factor de potencia de 0.256 sugiere una sobrecarga en el suministro eléctrico, lo que podría afectar el costo y la eficiencia del suministro de energía.

POTENCIA REACTIVA

La Figura 25 muestra que la demanda de potencia reactiva varía entre 90.32 kVAR y 248.99 kVAR. Con valores de 277 V, 319.86 A, un factor de potencia de 0.80 y un THDI de 7.5 %, se calcula una potencia aparente de 399.78 kVA. Dado que la potencia aparente de 331.69 kVA es inferior a la calculada, se concluye que es suficiente para la carga de la industria maquiladora.

La potencia reactiva indica que la carga es altamente inductiva, lo que podría provocar problemas en la red eléctrica, como caídas de voltaje y sobrecalentamiento

de transformadores. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas para corregir el factor de potencia y reducir la potencia reactiva, utilizando bancos de capacitores o técnicas de control, para mejorar la eficiencia y calidad de la energía eléctrica.

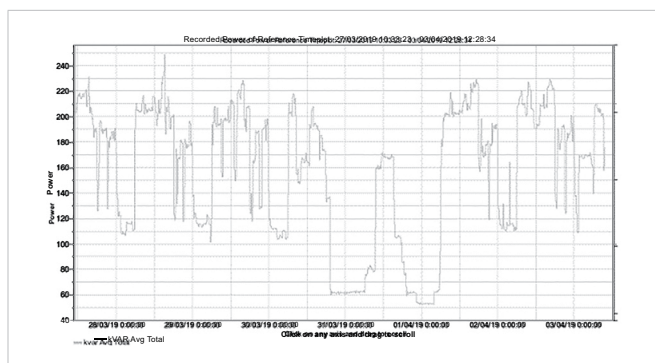


Figura 25. Potencia reactiva total en total en kVAR.

FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se muestra variable entre el 60 % y el 90 % como se muestra en la Figura 26, lo que sugiere una carga eléctrica con componentes inductivos y/o capacitivos. Un factor de potencia de 1 (100 %) indica una carga puramente resistiva, sin elementos inductivos o capacitivos.

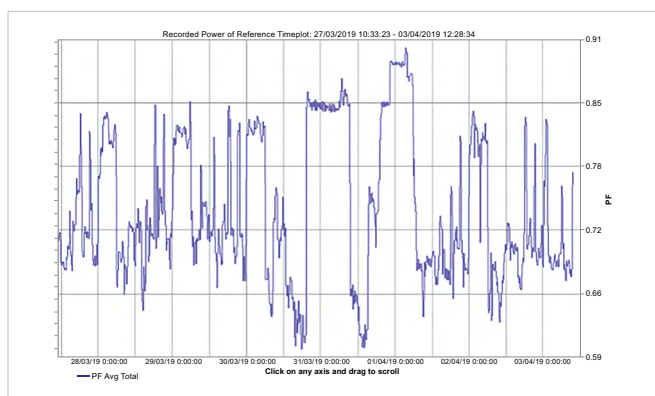


Figura 26. Factor de potencia.

Si el factor de potencia es menor que 1, implica la presencia de carga inductiva, lo que puede causar caídas de voltaje y sobrecargas en el sistema.

Por otro lado, un factor mayor que 1 indica carga capacitiva, lo que podría elevar el voltaje y sobrecargar el sistema. En general, se busca mantener un factor de potencia cercano a 1 para optimizar el uso de energía y prevenir problemas eléctricos.

IV. CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre la calidad de la energía eléctrica en una industria maquiladora de Ciudad Juárez ha permitido identificar y evaluar diversos parámetros que afectan el suministro eléctrico. Los hallazgos indican que, en general, la calidad de la energía cumple con los rangos aceptables establecidos por las normas mexicanas en términos de frecuencia, voltaje y distorsión armónica. Sin embargo, se detectó que el factor de potencia se encuentra fuera de los límites recomendados, lo que puede impactar negativamente en la eficiencia energética y en los costos operativos de la maquiladora.

La identificación de problemas como fluctuaciones de voltaje, armónicos y desequilibrios de fases resalta la importancia de realizar estudios periódicos de calidad de la energía. Las recomendaciones propuestas, que incluyen la instalación de capacitores y equipos de control, son esenciales para mejorar el factor de potencia y, por ende, la eficiencia del sistema eléctrico.

Las futuras líneas de investigación derivadas de los resultados de esta investigación se mencionan a continuación:

Monitoreo continuo: implementar sistemas de monitoreo continuo de la calidad de la energía en tiempo real para detectar y corregir problemas de manera proactiva. Esto podría incluir el uso de tecnologías avanzadas como IoT (Internet de las Cosas) para la recopilación de datos.

Impacto de la energía renovable: investigar cómo la integración de fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, afecta la calidad de la energía en la maquiladora. Esto es especialmente relevante en el contexto de la transición hacia energías más sostenibles.

Efectos de la carga no lineal: profundizar en el análisis de cómo las cargas no lineales, que son comunes en entornos industriales, afectan la calidad de la energía y proponer soluciones específicas para mitigar sus efectos.

Estudios comparativos: realizar estudios comparativos entre diferentes maquiladoras para identificar mejores prácticas y estrategias efectivas en la gestión de la calidad de la energía.

Normativas y regulaciones: investigar el impacto de las normativas y regulaciones en la calidad de la energía, así como la efectividad de su implementación en una industria maquiladora.

Estas líneas de investigación no solo contribuirán a mejorar la calidad de la energía en una industria maquiladora, sino que también ayudarán a fomentar un uso más eficiente y sostenible de los recursos energéticos en la región.

REFERENCIAS

- [1] X. Liang, “Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, n.º 2, pp. 855-866, mar.-abr. 2017, doi: [10.1109/TIA.2016.2626253](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253).
- [2] S. Ahmad, A. Iqbal, I. Ashraf y M. Meraj, “Improved power quality operation of symmetrical and asymmetrical multilevel inverter using invasive weed optimization technique”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3323-3336, 2022, doi: [10.1016/j.egyr.2022.01.122](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.122).
- [3] *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización)*. Ciudad de México: Gobierno de México, 2019. Accedido: sept. 24, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512096/NOM-001-SEDE-2012.pdf>
- [4] O. H. Abdalla, S. Elmasry, M. I. El Korfolly e I. Htita, “Harmonic Analysis of an Arc Furnace Load Based on the IEEE 519-2014 Standard”, *2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, El Cairo, Egipto, 2022, pp. 1-7, doi: [10.1109/MEPCON55441.2022.10021725](https://doi.org/10.1109/MEPCON55441.2022.10021725).
- [5] E. Stano y S. Wiak, “The Accuracy of Evaluation of the Requirements of the Standards IEC 61000-3-2 (12) with the Application of the Wideband Current Transducer”, *Sensors*, vol. 24, n.º 11, p. 3693, 2024, doi: [10.3390/s24113693](https://doi.org/10.3390/s24113693).
- [6] S. Barcón, R. G. Cepeda e I. Martínez, *Calidad de la energía: factor de potencia y filtrado de armónicas*. McGraw-Hill Educación, 2012.
- [7] L. A. Flores, M. D. Cossío y D. C. Salas, “Naturaleza y alcance jurídico del Código de Red, en el sistema eléctrico mexicano”, *EDUTECH*, vol. 26, n.º 27, pp. 101-121, 2020, doi: [10.58299/edu.v26i27.263](https://doi.org/10.58299/edu.v26i27.263).
- [8] *Resolución RES/550/2021 de la Comisión Reguladora de Energía por la que se expiden las Disposiciones Administrativas de Carácter General que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red*. Ciudad de México: Gobierno de México, 2021. Accedido: sept. 24, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5639920&fecha=31/12/2021#gsc.tab=0
- [9] G. E. Harper, *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. Editorial Limusa, 2006.
- [10] F. García, “Economía circular en la industria de la moda: avances y valorización del PET. Análisis de la huella de carbono”, trabajo fin de grado, Universidad de Cantabria, 2020. Accedido: sept. 24, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10902/19160>
- [11] Fluke, “Registrador Trifásico de Calidad Eléctrica Fluke 1750”, fluke.com. <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/1750> (accedido: sept. 24, 2023).
- [12] A. E. Legarreta, J. A. Bortolin, y J. H. Figueroa “An IEC 61000-4-30 class a—Power quality monitor: Development and performance analysis”, en *11th Int. Conf. on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2011, pp. 1-6, doi: [10.1109/EPQU.2011.6128813](https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128813).
- [13] Dranetz, “Power Xplorer / Power Guide / Power Visa”, dranetz.com, 2008. https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/PX5_PG_PV_QuickReference_RevC.pdf (accedido: oct. 23, 2024).
- [14] *Norma Oficial Mexicana NOM-113-STPS-1994, Calzado de protección*. Ciudad de México: Gobierno de México, 1996. Accedido: oct. 23, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.himfg.edu.mx/descargas/documentos/transparencia/pot/fraccion_xiv/166norma22.pdf
- [15] *Proyecto de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-116-STPS-1994, Seguridad-Respiradores purificadores de aire contra partículas nocivas, para quedar como PROY-NOM-116-STPS-2009, Respiradores purificadores de aire de presión negativa contra partículas nocivas-Especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México:

Gobierno de México, 2009. Accedido: oct. 23, 2024. [En línea]. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5110840

[16] Norma Oficial Mexicana NOM-115-STPS-1994, *Cascos de protección-Especificaciones, métodos de prueba y clasificación*. Ciudad de México: Gobierno de México, 1996. Accedido: oct. 23, 2024. [En línea]. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/stps/stps115.pdf>

[17] Norma Oficial Mexicana NOM-017-STPS-2008, *Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo*. Ciudad de México: Gobierno de México, 2008. Accedido: oct. 23, 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/nom-017.pdf>

RECONOCIMIENTOS

El autor principal expresa su más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el invaluable apoyo brindado durante la realización de este trabajo. Gracias a la beca otorgada bajo el CVU 1338349, fue posible llevar a cabo esta investigación con dedicación plena y acceder a los recursos técnicos y académicos necesarios para cumplir los objetivos propuestos.