

Metodología para transmisión de trazabilidad de THDi en Analizadores de Calidad de Energía

Methodology for transmitting THDi traceability in Power Quality Analyzers

Francisco Vladimir Espín Villacrés¹, Carlos Andrés Velásquez Flores¹,
Paola Lizet Andrade Cadena²

- ¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito – Ecuador.
E – mail: francisco.espin@geoenergia.gob.ec, carlos.velasquez@geoenergia.gob.ec
- ² Universidad Estatal de Milagro. Quito – Ecuador. E – mail: plac912@yahoo.es

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: : 24-08-2024

Fecha de aceptación: 30-07-2025

Resumen

Los equipos frecuentemente empleados para el monitoreo de la distorsión de las ondas de voltaje y corriente se denominan analizadores de calidad de energía y cada vez son más importantes debido a la incorporación de cargas no lineales a las redes de distribución.

A nivel regional, no existen laboratorios que hayan demostrado la competencia técnica en la calibración de estos equipos. Es importante que los analizadores de redes, o cualquier otro equipo empleado, justifiquen la trazabilidad de sus medidas debido a que esto permite demostrar la confiabilidad, comparabilidad y validez de los resultados. El trabajo propone distorsionar la onda de corriente con un atenuador de flujo luminoso, este dispositivo funciona recortando la alimentación de voltaje y esto posibilita tomar medidas de THDi en 10 posiciones distintas.

La transmisión de la trazabilidad es realizada desde un analizador de referencia (AR) hacia un analizador bajo calibración (ABC). Para estimar la incertidumbre de las mediciones del ABC, se desarrolla un modelo matemático acogiendo las recomendaciones establecidas por la guía para la estimación de incertidumbres (GUM, por sus siglas en inglés) del Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). Los resultados muestran que es posible la distorsión de la onda de corriente en un rango de THDi entre 8 % y 120 %, identificándose una incertidumbre expandida de 1.06e-6.

Palabras clave: Analizador de redes, cartas de control, distorsión armónica total, incertidumbre, trazabilidad.

Abstract

The equipment commonly used for monitoring voltage and current waveform distortion is known as a power quality analyzer. These devices are becoming increasingly important due to the incorporation of non-linear loads into distribution networks.

At the regional level, there are no laboratories that have demonstrated technical competence in calibrating these devices. It is essential that network analyzers—or any other equipment used—justify the traceability of their measurements, as this allows for the demonstration of the reliability, comparability, and validity of the results. This work proposes distorting the current waveform using a luminous flux attenuator, a device that operates by clipping the voltage supply, enabling the measurement of THDi at ten different positions.

Traceability is transmitted from a reference analyzer (AR) to an analyzer under calibration (AUC). To estimate the measurement uncertainty of the AUC, a mathematical model is developed based on the recommendations established by the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) from the International Bureau of Weights and Measures (BIPM).

The results show that it is possible to distort the current waveform within a THDi range of 8 % to 120 %, with an identified expanded uncertainty of 1.06e-6.

Keywords: Control charts, power quality, total harmonic distortion, traceability, uncertainty.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la calidad de la energía eléctrica ha cobrado una importancia creciente en los últimos años [1], [2], [3], impulsado por la proliferación de cargas no lineales y la integración de fuentes de energía renovable en las redes de distribución. Estos elementos introducen distorsiones armónicas en las ondas de tensión y corriente, siendo el Índice de Distorsión Armónica Total (THDi) un parámetro clave para cuantificar la calidad de la corriente [4].

La medición precisa y confiable del THDi es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos, evitar pérdidas energéticas y cumplir con las normativas vigentes [5]. En este contexto, la trazabilidad metrológica de las mediciones de THDi en analizadores de calidad de energía se convierte en un aspecto crucial para asegurar la validez y comparabilidad de los resultados obtenidos [6].

Actualmente, existen varios trabajos que buscan desarrollar equipos tomando en cuenta la desviación de sus mediciones, es así que, en [7] se propone una calibración mediante pulsos y se encuentra el error entre dos equipos. Otro trabajo [5], busca definir la trazabilidad a partir de dos modelos de medición de pérdidas de línea, aquí, se desarrollan modelos de circuitos para potencia aparente efectiva monofásica y trifásica y se encuentra la incertidumbre del método propuesto. En el artículo [8], se realiza una contrastación entre el equipo desarrollado y un equipo profesional, se demuestra el error entre mediciones de corriente con carga resistiva, previo a tomar mediciones de THDi, sin embargo, no menciona o garantiza la trazabilidad de THDi en las mediciones.

El presente trabajo expone una metodología para transmitir la trazabilidad mediante el desarrollo de un modelo matemático que posibilite conocer la dispersión de las mediciones de THDi con su incertidumbre asociada. Este parámetro es necesario para declarar la conformidad de un producto conforme lo recomendado por el BIPM. Esta metodología podría ser acogida por organismos o entidades para verificar que los resultados de THDi emitidos por un analizador sean confiables y gracias al conocimiento de su incertidumbre tomar decisiones informadas. Esto va de la mano con la industria de analizadores de calidad de energía que ofrece una amplia gama de equipos con diversas funcionalidades y precisiones en la medición de parámetros como el THDi [9]. Sin embargo, la información detallada sobre las metodologías internas de cálculo y los procedimientos de calibración que garantizan la trazabilidad de estas mediciones no siempre es transparente o fácilmente accesible para el usuario final [10], dado que los laboratorios desarrollan internamente modelos matemáticos que son aplicados a las calibraciones de los equipos, los cuales son

generalmente ajustados de acuerdo a sus condiciones propias e incluyen la experiencia ganada y el cambio o modificación de equipos y personal durante el desarrollo del proceso de calibración y transmisión de trazabilidad. Esto dificulta la evaluación objetiva de la fiabilidad de los datos proporcionados por los analizadores y limita la capacidad de establecer comparaciones consistentes entre diferentes equipos y mediciones realizadas en distintos momentos o ubicaciones [11].

La confiabilidad de las mediciones de estos equipos sirve para verificar la energía eléctrica suministrada al usuario final ya que debe cumplir con parámetros establecidos en normativas o regulaciones. En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) es el organismo técnico administrativo encargado del ejercicio de la potestad estatal de regular y controlar las actividades relacionadas con el servicio público de energía eléctrica y el servicio de alumbrado público general, precautelando los intereses del consumidor o usuario final. Es así que, mediante la regulación de ARCONEL 002/20 [12], se establecen los parámetros como: indicadores, índices y límites de calidad, que debe cumplir el suministro de energía eléctrica, esto forma parte de lo que generalmente se denomina calidad de energía.

El mantenimiento y actualización de las normativas van de la mano con el hecho de que los dispositivos electrónicos domésticos son más sensibles a la calidad de energía debido a que utilizan sistemas de control con microprocesadores y estos son sensibles a variaciones en su alimentación [13]. Los parámetros de calidad de producto considerados en la Regulación ARCONEL 002/20 para bajo voltaje son: nivel de voltaje, perturbación rápida de voltaje (Flicker), distorsión armónica de voltaje y desequilibrio de voltaje.

Por otra parte, en las redes de distribución ingresan cada vez, en mayor proporción, cargas no lineales, lo que representa un desafío desde el punto de vista de calidad de suministro eléctrico. Las entidades encargadas de la generación, transporte, distribución y control de las redes eléctricas deben monitorear que la entrega del suministro cumpla con los requisitos de calidad, mientras que, de manera paralela, las redes eléctricas se encuentran con mayores perturbaciones. A nivel nacional, es importante conocer la calidad de mediciones de estos parámetros, especialmente para entidades como la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) que abarca varias distribuidoras de energía, o la Empresa Eléctrica Quito, entre otras y a nivel de transmisión a CELEC EP Transelectric.

Desde el punto de vista del consumidor, se debe conocer que las cargas no lineales como las que se encuentran en iluminación LED, generación eólica, sistemas fotovoltaicos, cargadores para

electromovilidad, entre otras, son causantes de efectos adversos en las redes y su incidencia puede observarse, siendo una de sus consecuencias, la distorsión de la onda de corriente. A pesar de que este parámetro actualmente no está dentro de la regulación nacional, a nivel internacional existen restricciones en cuanto a valores máximos para la distorsión de corriente, según el orden de armónico y se la calcula con base en la demanda máxima del sistema; por ejemplo, a nivel residencial en [14] se establece un máximo de 5 %. Para el presente estudio, se emplea el THDi para dar trazabilidad al ABC debido a que, mediante este parámetro, también es factible medir la distorsión de corriente a demanda máxima del sistema.

Varios estudios se enfocan en las consecuencias de cargas no lineales dentro de los sistemas de distribución [15], [16][17], demostrando su impacto en la calidad de energía, estimando que las pérdidas técnicas pueden incrementarse hasta en un 20 % [17] [18], debido principalmente a la generación de armónicos.

Los armónicos son definidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 5000:2013 [19] como una onda sinusoidal de voltaje o corriente cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema, siendo su principal efecto, la desviación, en estado estable, de una onda sinusoidal ideal.

Esta desviación puede acarrear consecuencias; entre las principales, calentamiento y falla de bancos de capacitores, transformadores y motores. Incremento de pérdidas en el núcleo y devanados de equipos, operación inadecuada de sistemas de protección y circuitos de control, imprecisión durante la operación de equipos de medición, daño en circuitos electrónicos.

Los analizadores de calidad de energía son los equipos que mayormente se emplean para identificar la presencia de armónicos en el suministro de energía eléctrica, sin embargo, a nivel regional se presenta el inconveniente que son pocos los laboratorios que han demostrado competencia técnica para realizar su calibración y consecuentemente su trazabilidad [20].

Las decisiones en cuanto a la intervención en las redes deben ser tomadas bajo el conocimiento que las mediciones son trazables, garantizando que los resultados de medida de un analizador son relacionados hacia una sucesión de patrones y/o calibraciones y que son considerados en la estimación de la incertidumbre de las mediciones.

La precisión en la medición del THDi se ve directamente afectada por la etapa de muestreo y el posterior procesamiento de la señal de corriente. La frecuencia de muestreo, la resolución del convertidor analógico, a digital (ADC) y la duración de la ventana de observación son parámetros críticos que influyen en

la capacidad del analizador para capturar con fidelidad las componentes armónicas de la señal [21]. Un muestreo insuficiente puede llevar al fenómeno de aliasing, donde las componentes de alta frecuencia se interpretan erróneamente como componentes de baja frecuencia, distorsionando el cálculo del THDi.

Asimismo, el algoritmo utilizado para el cálculo del THDi, típicamente basado en la Transformada de Fourier Discreta (DFT, siglas en inglés), requiere un número adecuado de muestras para ofrecer una representación precisa del espectro armónico [22]. Las ventanas de ponderación aplicadas a la señal muestreada antes de la DFT también juegan un papel importante en la reducción de fugas espectrales y la mejora de la exactitud en la determinación de las amplitudes de las armónicas.

La trazabilidad metrológica del THDi implica establecer una cadena ininterrumpida de comparaciones con patrones de referencia reconocidos internacionalmente, pudiendo la frecuencia ser calibrada mediante un reloj atómico, que también son empleados para definir el segundo en el Sistema Internacional de Unidades (SI) [11]. Para el THDi, esto se traduce en la necesidad de calibrar los analizadores de calidad de energía utilizando señales de corriente con contenido armónico conocido y trazable. Los laboratorios de metrología desarrollan patrones de referencia que simulan señales de corriente distorsionadas con THDi y componentes armónicas específicas con incertidumbres de medición bien definidas. La calibración de los analizadores se realiza comparando sus mediciones con estos patrones, lo que permite determinar y corregir posibles errores sistemáticos y establecer la incertidumbre asociada a las mediciones del equipo.

La implementación de una metodología robusta para la transmisión de la trazabilidad del THDi en analizadores de calidad de energía requiere la definición de procedimientos claros y estandarizados.

Estos procedimientos deben abarcar desde la etapa de diseño y fabricación del analizador [23], incluyendo la selección de componentes con características metrológicas adecuadas y la implementación de algoritmos de cálculo precisos, hasta la etapa de verificación y calibración, asegurando la conexión ininterrumpida con patrones de referencia trazables [24].

Asimismo, es fundamental establecer protocolos para la documentación y el reporte de la trazabilidad, permitiendo a los usuarios finales comprender y confiar en la validez de las mediciones de THDi realizadas.

La calibración para THD en los analizadores, por lo general, se realiza sumando ondas sinusoidales de

diferente frecuencia múltiplos de la fundamental con un generador de señales, siendo estos equipos de costos elevados, lo cual presenta mayores dificultades para conocer el estado real de los analizadores de calidad de energía cuando se desea medir THD.

La garantía de la trazabilidad metrológica en la medición del THDi por analizadores de calidad de energía es un desafío relevante en el campo de la calidad de la energía eléctrica [9].

El desarrollo y la implementación de una metodología específica para la transmisión de esta trazabilidad, que abarque aspectos técnicos, procedimentales y de documentación, contribuirá significativamente a mejorar la fiabilidad, la comparabilidad y la aceptación de las mediciones de THDi, facilitando la toma de decisiones informadas para la gestión eficiente y segura de los sistemas eléctricos.

El presente trabajo desarrolla una metodología para transferir la trazabilidad en THDi a partir de un analizador calibrado en un laboratorio con competencia técnica. Para distorsionar la forma de onda de corriente se emplea un atenuador (dimmer) para lámparas LED. Se compara los resultados entre en analizador bajo calibración (ABC) y el calibrado o de referencia (AR).

Con las mediciones de THDi tomadas entre los dos equipos, se encuentra la diferencia entre mediciones. A continuación, se estima la incertidumbre de medición del equipo empleando la metodología señalada en la guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM, por sus siglas en inglés) [25] y que es recomendada por el BIPM. Finalmente, se realiza un control del proceso de calibración mediante cartas de control sobre el ABC.

Los resultados muestran que es posible obtener para un analizador de calidad de energía la curva de trazabilidad en THDi entre 120 % y 8 %. Es posible estimar su incertidumbre de medición siguiendo las recomendaciones de la GUM.

2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El procedimiento, que comúnmente emplean los laboratorios para calibrar los analizadores de redes, consiste en distorsionar la onda de corriente bajo condiciones controladas para conocer de antemano el THDi. La metodología propuesta consiste en comparar los resultados de dos equipos midiendo simultáneamente THDi

La distorsión armónica total de corriente (THDi) es calculada como:

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (1)$$

En donde I_1 es la magnitud de la componente fundamental (corriente rms), I_h es la magnitud de la

corriente armónica individual y h es el orden del armónico.

El AR debe ser un equipo que cumpla los requisitos exigidos de trazabilidad [26]. Tanto el AR como el ABC son clase A, conforme los requerimientos establecidos en la IEC [27].

El presente trabajo contempla distorsionar la forma de onda corriente conectando una carga resistiva en serie con un atenuador de flujo luminoso de lámparas LED marca Veto, de esta manera, la única fuente de generación de armónicos será el atenuador.

Para alimentar el circuito, se emplea una fuente de voltaje marca Sensing modelo LSP de 15kVA de capacidad y una estabilidad de voltaje menor al 2 %. Se conoce que la generación de armónicos de esta fuente de voltaje es menor a 1 % medido en vacío, por lo que no tendrá incidencia significativa sobre las mediciones de THDi.

El AR y el ABC son conectados al mismo punto y se los deja estabilizar durante una hora.

La presente metodología parte del supuesto que el AR cumple con la política de trazabilidad de ILAC [26]. El AR es marca Metrel modelo MI 282, mientras que el ABC es marca Sonel modelo PQM 711, los dos equipos son clase A, conforme los requerimientos establecidos en la IEC [27]

Se realiza la dimerización en 10 posiciones, tomando lecturas de la distorsión armónica total de corriente (THDi) de manera simultánea entre el AR y el ABC. Estas medidas son normalizadas en cada punto k de la posición del atenuador.

Una vez obtenidas las mediciones de THDi del AR y el ABC, se obtiene la diferencia (d) entre ellas, esta diferencia es conocida como el error de medida.

Un diagrama de flujo de la metodología propuesta se encuentra en la Figura 1. Puede observarse las actividades para desarrollar el proceso de transmisión de trazabilidad y evaluación con cartas de control.

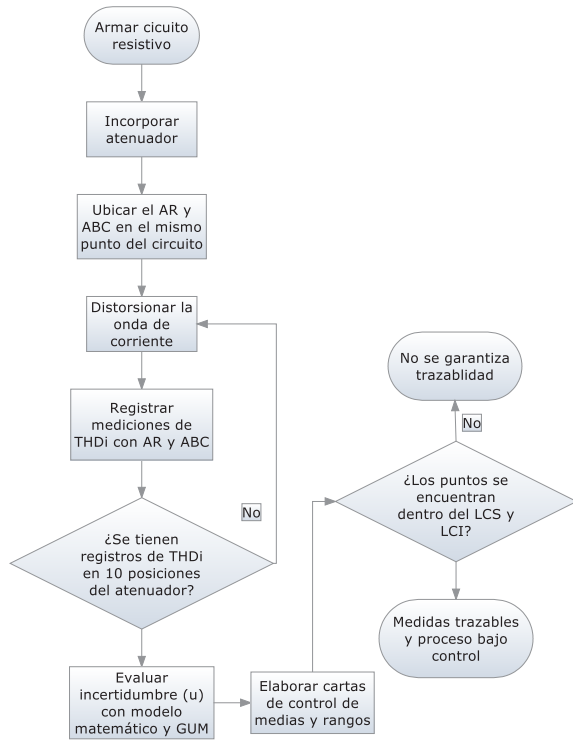


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

3. MODELO DE INCERTIDUMBRE

La incertidumbre de medición es un parámetro fundamental que acompaña a todo resultado de una medición [28], incluyendo el THDi. Estima la dispersión de los valores medidos que podrían ser razonablemente atribuidos a la magnitud que se desea medir e incluye componentes de las limitaciones inherentes al proceso de medición y a los equipos utilizados. La declaración de la incertidumbre es esencial para interpretar correctamente los resultados del THDi, ya que permite establecer un intervalo dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero con una probabilidad. Sin la evaluación y el reporte de la incertidumbre, las mediciones de THDi carecen de un contexto completo y su utilidad para la toma de decisiones, la comparación con límites normativos o la evaluación del desempeño de equipos se ve significativamente limitada. Por lo tanto, la metodología para la transmisión de la trazabilidad del THDi debe integrar de manera robusta la estimación y la propagación de la incertidumbre a lo largo de toda la cadena de medición, desde los patrones de referencia hasta el analizador de calidad de energía y finalmente al usuario.

El modelo, parte del fundamento de la calibración de un equipo; es decir, corresponde a su medida mostrada más una corrección, que es obtenida generalmente mediante el contraste contra una referencia, en este caso, cada analizador (AR y ABC) tendrá su medida de

THDi y su corrección asociada. Las medidas obtenidas con el ABC, con su corrección, serán iguales a las lecturas del AR con su corrección, estableciéndose el siguiente modelo matemático:

$$THDi_{ABC} + c_{ABC} = THDi_{AR} + c_{AR} \quad (2)$$

De donde se obtiene que

$$THDi_{ABC} = THDi_{AR} + c_{AR} - c_{ABC} \quad (3)$$

En donde c_{ABC} y c_{AR} son los factores de corrección de las mediciones del ABC y AR.

La GUM señala que la incertidumbre típica combinada para magnitudes no correlacionadas, como es el presente caso, es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada, dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial THDi_{ABC}}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (4)$$

En donde cada $u(x_i)$ se refiere a la incertidumbre típica evaluada con cada una de las fuentes de incertidumbre consideradas en el modelo matemático ecuación (2).

Aplicando la ecuación (4), se encuentran los coeficientes de sensibilidad correspondientes al modelo matemático propuesto

$$\frac{\partial THDi_{ABC}}{\partial THDi_{AR}} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial THDi_{ABC}}{\partial c_{AR}} = 1 \quad ; \quad \frac{\partial THDi_{ABC}}{\partial c_{ABC}} = -1 \quad (6)$$

3.1. Evaluación de las Fuentes de Incertidumbre del Modelo

La incertidumbre debido a las mediciones, para el ABC, se considera como la variación típica experimental en base a sus desviaciones estándar (*desv*) y cantidad de medidas (*n*), es decir:

$$(u(THDi_{ABC}))^2 = \left(\frac{desv(THDi_{ABC})}{\sqrt{n_{ABC}}} \right)^2 \quad (7)$$

El AR presenta fuentes de incertidumbre que, para garantizar la trazabilidad metrológica, deben ser consideradas para ser transferidas al ABC:

$$(u(THDi_{AR}))^2 = \left(\frac{desv(THDi_{AR})}{\sqrt{n_{AR}}} \right)^2 + \left(\frac{U_{CalTHD}}{k} \right)^2 \quad (8)$$

La incertidumbre $U(c_{AlTHD})$ corresponde a la incertidumbre expandida reportada con un factor de cobertura *k* y se encuentra reportado en el certificado de calibración, siendo 2 generalmente este valor por

corresponder a un nivel de confianza aproximado del 95 %.

Con respecto a las incertidumbres asociadas a los factores de corrección, para el AR se toma su error o corrección según se encuentre reportado en el certificado de calibración y se considera como $\left(\frac{u_{CAR}}{\sqrt{3}}\right)^2$, este se identifica como el error o corrección que presentó el equipo durante su calibración en un laboratorio con mejores capacidades metrológicas y se encuentra plasmado en su certificado de calibración.

Para asignar el valor de la incertidumbre de la corrección se propone considerar el valor más cercano de corrección correspondiente al THDi que sea medido. Conforme lo expuesto por la GUM, cuando se desea estimar valores entre los límites inferior y superior de las correcciones, como es el presente caso, se puede emplear una función de distribución de probabilidad rectangular, dado que se asume que el valor de la corrección se encuentra con igual probabilidad de ser seleccionada dentro del intervalo elegido.

Mientras que la incertidumbre asociada al factor de corrección del ABC se la tomará considerando la dispersión de las correcciones, de manera que:

$$\left(u_{C_{ABC}}\right)^2 = \left(\frac{\text{desv}(C_{ABC})}{\sqrt{n_{C_{ABC}}}}\right)^2 \quad (9)$$

Al combinar cuadráticamente todos estos factores, siguiendo la ecuación (4), se obtendrá la incertidumbre de medición de los THDi medidos con el ABC.

3.2. Cartas de control en el ABC

Se conoce que las mediciones obtenidas pueden considerarse como las salidas de un proceso de calibración. Para verificar que las medidas obtenidas con esta metodología se encuentren controladas, se implementará un control estadístico del proceso, utilizándose cartas de control sobre el ABC, de esta forma se podrá identificar cualquier punto o tendencia en las lecturas del equipo y que pudiera influir en los resultados de la metodología propuesta.

En el contexto de la trazabilidad del THDi en analizadores de calidad de energía, las cartas de control pueden aplicarse al seguimiento de los resultados de las calibraciones periódicas de los analizadores. Al graficar los valores del THDi medidos por el analizador en respuesta a un patrón de referencia trazable, junto con los límites de control superior e inferior calculados a partir de la variabilidad histórica del proceso de calibración, se puede identificar si el analizador mantiene su precisión y estabilidad dentro de los límites aceptables. Puntos fuera de los límites de control o patrones no aleatorios en los datos pueden

indicar la necesidad de una investigación y posible ajuste o recalibración del analizador, asegurando así, que la trazabilidad de las mediciones de THDi se mantenga a lo largo del tiempo y se eviten desviaciones significativas que comprometan la fiabilidad de los datos proporcionados.

Las cartas de control permiten identificar de manera gráfica si algún punto sale del proceso de medición.

En el presente caso, se empleará las cartas de control de medias y rangos una vez fueron normalizados los datos en cada posición k del atenuador.

Primero, se debe identificar el valor de tendencia central de cada grupo, para lo cual:

$$\overline{\text{THD}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{THD}_i \quad (10)$$

En donde $\overline{\text{THD}}$ es la media de cada grupo de medición de THDi, a continuación, se encuentra la media de todos los grupos $\overline{\overline{\text{THD}}}$, la cual se identifica en la gráfica como línea central.

$$\overline{\overline{\text{THD}}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overline{\text{THD}}_k \quad (11)$$

De manera semejante, se debe calcular los rangos de cada grupo:

$$R_i = V_{\text{Max}_i} - V_{\text{min}_i} \quad (12)$$

A continuación, se calcula el rango medio de todos los grupos, que será la línea central para esta gráfica:

$$\overline{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i \quad (13)$$

Posteriormente se establecen los límites de control superior (LCS) e inferior (LCI) de las medias de la siguiente manera:

$$\text{LCS} = \overline{\overline{\text{THD}}} + A_2 \overline{R} \quad (14)$$

$$\text{LCI} = \overline{\overline{\text{THD}}} - A_3 \overline{R} \quad (15)$$

De igual manera, se establecen los límites de control superior (LCS) e inferior (LCI) para los rangos, para lo cual:

$$\text{LCS} = D_4 \overline{R} \quad (16)$$

$$\text{LCI} = D_3 \overline{R} \quad (17)$$

Los valores A_2 , A_3 , D_3 y D_4 , son coeficientes determinados por el tamaño de la cantidad de medidas tomadas por cada grupo y se encuentran en las tablas de textos de estadística por ejemplo en [29], [30].

4. RESULTADOS

La metodología para transferir la trazabilidad se aplicará sobre un equipo (ABC) del Laboratorio de Luminotecnia del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). Adicionalmente el laboratorio mantiene un equipo (AR) que fue calibrado en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), que es el laboratorio nacional de metrología de México. Tanto el AR como el ABC son clase A, conforme los requerimientos establecidos en la IEC [27].

Los dos equipos fueron conectados de manera simultánea y configurados para tomar 34 medidas por cada analizador en cada una de las diez posiciones del atenuador de intensidades luminosas. En la figura 2 se presentan como ejemplo cuatro mediciones con su correspondiente distorsión de onda y espectro armónico.

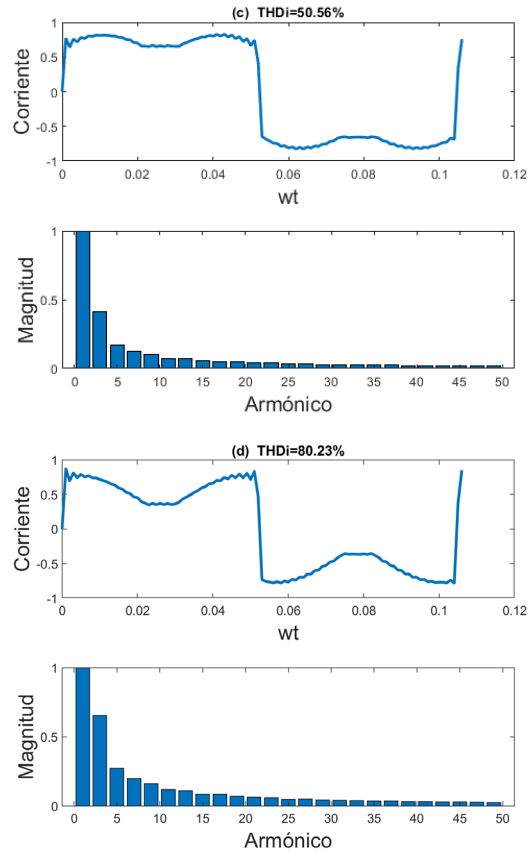
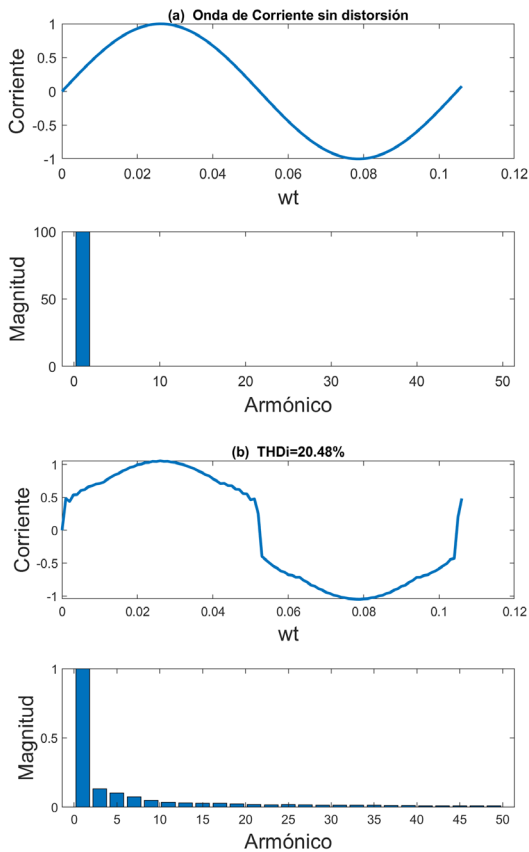


Figura 2: Onda deformada y su correspondiente espectro armónico para cuatro distorsiones del atenuador.

En cada punto del atenuador se promedian las mediciones y se las normaliza para el tratamiento de los datos. Las diferencias entre los dos valores de THDI de los analizadores son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Mediciones de THDI del AR y ABC

Media AR	Media ABC	AR-ABC	Desv Est AR	Desv Est ABC
1,00	1,00	6,66e-16	1,43e-3	9,88e-4
1,00	1,00	-1,71e-5	1,99e-3	7,51e-4
9,99e-1	9,99e-1	-2,07e-4	1,44e-3	4,69e-4
1,00	9,99e-1	8,43e-6	7,92e-4	4,82e-4
1,00	1,00	5,41e-5	5,09e-4	4,38e-4
1,00	1,00	-2,08e-4	1,06e-3	8,28e-4
9,99e-1	9,99e-1	1,79e-4	1,51e-3	1,33e-3
9,99e-1	9,99e-1	7,32e-5	2,93e-3	7,99e-4
9,99e-1	9,99e-1	-2,83e-4	3,79e-3	9,71e-4
9,98e-1	1,00	-1,78e-3	9,76e-3	7,61e-4

Debido a la semejanza entre los valores de los analizadores se presenta las mediciones normalizadas hasta con dos cifras decimales para visualizar de mejor manera la diferencia entre los datos.

A continuación, se evalúa la incertidumbre de medición, con base en el modelo matemático propuesto, ecuación (3), cada una de las fuentes que contribuyen a la estimación de incertidumbre se presenta en la tabla 1.

Se conoce que en el certificado de calibración del AR en uno de los puntos de calibración (THDi=34,422) presenta una incertidumbre expandida de $U=0,012$ con un factor de cobertura $k=2$.

Aplicando la ecuación (4), se detalla el presupuesto de incertidumbre, se toma como ejemplo un THDi= 80 % correspondiente a una posición $k=9$.

Tabla 2: Presupuesto de incertidumbre de THDi del ABC

Fuente de incertidumbre	Incertidumbre típica $u(x_i)$	$ c_i = \frac{\partial THD_{AB}}{\partial x_i}$	$c_i \cdot u_i$	$(c_i \cdot u_i)^2$
Variación típica experimental del AR y calibración	672.5e-6	1	672.5e-6	452.3e-9
Variación típica experimental del ABC	166.5e-6	1	166.5e-6	27.7e-9
Corrección AR	-163.3e-6	1	163.3e-6	26.7e-9
Corrección ABC	166.5e-6	1	166.5e-6	27.7e-9

Los coeficientes de sensibilidad fueron obtenidos aplicando las ecuaciones (5) y (6).

La incertidumbre combinada para el THDi medido por el ABC expresada en porcentaje es de $534.4e-9$ y su incertidumbre expandida bajo un factor de cobertura $k=2$ es de $U=1.07e-6$ expresado en porcentaje de THDi normalizado.

La carta de control de medias para el ABC fue elaborada con los siguientes factores, con base en la ecuación (11), línea central de $999.99 e-3$ para el LCS de 1.001 con la ecuación (14) y el LCI de $999.49e-3$ con la ecuación (15). En la figura 3 se presenta el cuadro de control para medias.

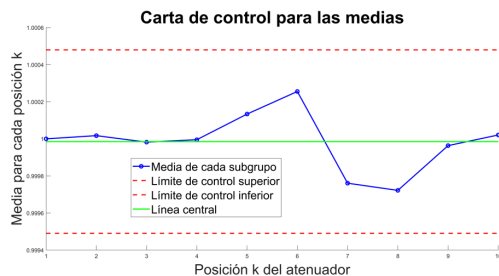


Figura 3: Carta de control para las medias de cada posición del atenuador.

La carta de control de rangos para el ABC fue elaborada con los siguientes factores, con base en la ecuación (13) línea central de $3.23e-3$ para el LCS de $4.98e-3$ con la ecuación (16) y el LCI de $1.45e-3$ con la

ecuación (17). En la figura 4 se presenta el cuadro de control para rangos

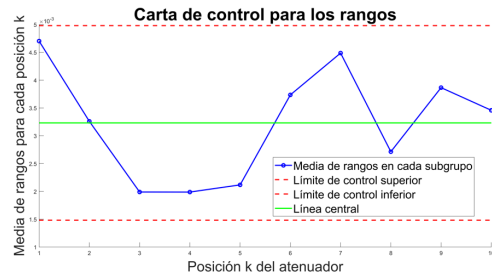


Figura 4: Carta de control para los rangos de cada posición del atenuador.

5. RESULTADOS

Mediante el regulador comercial de intensidad luminosa, se pudo deformar la onda de corriente, desde 8 % a 120 %, tomando 10 puntos de medición en este intervalo. El THDi asociado a esta desviación de la forma de onda, es semejante entre los dos analizadores empleados, la distorsión en corriente es ocasionada por la electrónica interna del dispositivo. Para disminuir inestabilidades durante su operación y que sean atribuibles a la carga que alimenta, se conectó a una carga puramente resistiva, de esta manera la distorsión de la onda de corriente es debida exclusivamente al atenuador de flujo luminoso.

Para realizar el procesamiento de los datos se normaliza las mediciones en cada una de las posiciones del atenuador, resultando valores semejantes, por este motivo se presentan los resultados hasta con tres decimales.

Dentro de las fuentes de incertidumbre se incluyen la incertidumbre del AR y su factor de corrección. La variabilidad del AR y el ABC son consideradas también como fuentes de incertidumbre, se observa que el ABC presenta una menor dispersión en sus mediciones respecto al AR. Estas variaciones son consideradas dentro de la variación experimental, formando parte de la estimación de incertidumbre.

Las cartas de control de medias y rangos muestran que todos los puntos de medición están dentro de los límites de control, lo que indica que el proceso de transmisión de trazabilidad al ABC es estable. Las gráficas de control permiten visualizar las fluctuaciones en el proceso, estos cambios son aleatorios y no muestran tendencias en el rango de medición de los THDi.

La metodología permite una transmisión de la trazabilidad metrológica desde el AR hacia el ABC, ya que considera, en el modelo matemático, la incertidumbre del AR y el factor de corrección que fueron obtenidos en un laboratorio de mejores

condiciones metrológicas. El modelo incluye la repetibilidad de las mediciones mediante el error estándar. Esto último tanto para el AR como para el ABC.

La metodología propuesta está bajo control, conforme las cartas de medias y rangos. El modelo y su estimación de incertidumbre puede ser acogido y complementar estudios en los cuales se realice la contrastación entre el diseño de un equipo y un equipo profesional y sea necesario verificar la trazabilidad de las medidas como es el caso de [7], [31], [32]

Estudios semejantes contrastan mediciones entre un valor de referencia que puede ser emitido por un equipo profesional y un valor medido o calculado, sin garantizar la trazabilidad de las mediciones, esto puede ocasionar el transferir el sesgo del equipo de referencia. Con el presente estudio, a partir de la calibración del AR, se garantiza mantener una cadena ininterrumpida de mediciones hacia el SI, esta metodología puede replicarse de tal manera que permitirá estimar la incertidumbre de medición de analizadores para evaluar la conformidad a través de mediciones confiables. Estudiar varias marcas y modelos de atenuadores de flujo luminoso, permite seleccionar aquel que presente mayor estabilidad para cada posición de medición de THDi. La principal ventaja radica en un mejor control en el proceso de contraste, reflejándose en una gráfica de rangos que tienda a ser más plana.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología expuesta puede aplicarse para transferir la trazabilidad en THDi de un AR hacia un ABC. El modelo, parte de la calibración de un AR, utiliza el factor de corrección expresada en su certificado de calibración y es parte de la combinación cuadrática como fuente de incertidumbre y, de esta forma, se transfiere la trazabilidad a las mediciones efectuadas por el ABC.

El trabajo presenta una metodología que permite identificar la incertidumbre asociada a las mediciones de THDi. Estos valores se alcanzan gracias a la distorsión de corriente efectuada con un atenuador de flujo luminoso, los resultados indican la factibilidad para mantener la trazabilidad cuando existe la distorsión armónica entre el 8 % y 120 %.

El modelo desarrollado por el laboratorio fue establecido conforme las recomendaciones de la GUM. Los resultados demuestran que es posible pasar la trazabilidad hacia un ABC, identificándose una incertidumbre de calibración durante todo este proceso, el valor de incertidumbre es expresada en porcentaje de THDi.

Todos los puntos de distorsión armónica se encuentran dentro de los límites de control, lo que demuestra que el proceso de transmisión de trazabilidad se encuentra bajo control y es replicable, esto aplica para el análisis de medias y rangos.

La metodología propuesta presenta una menor variabilidad en las medias de THDi, mientras que por el contrario, se presenta una mayor variabilidad en rangos, esto debido a una mayor dispersión de las mediciones entre el valor máximo y mínimo registrado. Como resultado el gráfico de control de rangos en los puntos de atenuación 1, 3, 5 y 7 se encuentran cercanos al límite de control. Para la aplicación de la metodología se recomienda realizar un seguimiento más exhaustivo a esta última gráfica para verificar que las mediciones del analizador se encuentren dentro de los límites establecidos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Brusil, F. Espín, and C. Velásquez, "Effect of temperature in electrical magnitudes of LED and HPS luminaires," *International journal of electrical and computer engineering systems*, vol. 12, no. 4, pp. 225–234, Nov. 2021, doi: 10.32985/ijeces.12.4.6.
- [2] C. Velasquez, M. Á. Castro, F. Rodríguez, and F. Espín, "Mathematical model for heat transfer and stabilization of LED lamps for measurements in a laboratory.," in *Mathematical Modelling in Engineering & Human Behaviour (MME&HB2022)*, J. R. Torregrosa, J. C. Cortés, A. Hervás, A. Vidal-Ferrándiz, and E. López-Navarro, Eds., Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, Nov. 2022, pp. 274–278. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://imm.webs.upv.es/jornadas/2022/home.html>
- [3] C. Velásquez, F. Espín, F. Rodríguez, and M. Á. Castro, "Heat transfer modeling in road lighting LED luminaire," *AIP Conf Proc*, vol. 2872, no. 1, Sep. 2023, doi: 10.1063/5.0163374/2913465.
- [4] C. Velásquez, F. Espín, M. Á. Castro, and F. Rodríguez, "Energy Efficiency in Public Lighting Systems Friendly to the Environment and Protected Areas," *Sustainability*, vol. 16, no. 12, p. 5113, Jun. 2024, doi: 10.3390/SU16125113.
- [5] Y. Luo, J. Yang, F. Li, B. Qian, and X. Feng, "Theory of Quantity Value Traceability of Effective Apparent Power and Evaluation Method of Uncertainty," *Energies* 2025, Vol. 18, Page 3214, vol. 18, no. 12, p. 3214, Jun. 2025, doi: 10.3390/EN18123214.
- [6] C. Velásquez, D. Juiña, F. Iturra, B. Silva, and D. Barona, "Methodology for Declaration of Conformity Under ISO/IEC 17025 Associating Confidence Levels and Risk Analysis," in *Innovation and Research – Smart Technologies & Systems*, M. Z. Vizueté, M.

- [6] Botto-Tobar, S. Casillas, C. Gonzalez, C. Sánchez, G. Gomes, and B. Durakovic, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 30–42. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-63437-6_3
- [7] Y. Wang, W. Yu, C. Zhang, L. Ye, W. Wei, and Z. Yang, “Design of On-Site Calibration Device for Electricity Meter Based on Pulse Detection,” *Inventions* 2025, Vol. 10, Page 6, vol. 10, no. 1, p. 6, Jan. 2025, doi: 10.3390/INVENTIONS10010006.
- [8] I. M. B. Neto et al., “THDI Measurement System of Home Energy Signal Based on IoT,” 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2018 - Proceedings, pp. 180–185, Aug. 2018, doi: 10.1109/METROI4.2018.8428311.
- [9] C. Brusil, H. Arcos, F. Espin, and C. Velasquez, “Analysis of Harmonic Distortion of LED Luminaires Connected to Utility Grid,” in 2020 IEEE ANDESCON, IEEE, Oct. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272004.
- [10] D. Juiña, B. Silva, and C. Velásquez, “Análisis de riesgo de la declaración de conformidad de la potencia de luminarias a un nivel determinado de confianza,” *Killkana Técnica*, vol. 7, no. 1, pp. 46–60, Jan. 2024, doi: 10.26871/killkanatecnica.v7i1.1465.
- [11] C. Velásquez, M. Á. Castro, and F. Rodríguez, “Analysis of a reinterpretation of gray models applied to measuring laboratory equipment uncertainties,” in *Modelling for Engineering & Human Behaviour* 2021, J. R. Torregrosa, J. C. Cortés, J. A. Hervás, A. Vidal-Ferrándiz, and E. López-Navarro, Eds., Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, Nov. 2021, pp. 252–255.
- [12] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,” 2023.
- [13] D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso, “Issues in the characterization of power quality instruments,” *Measurement*, vol. 43, no. 8, pp. 1069–1076, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2010.03.010.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE 519 Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.”
- [15] P. Rodríguez-Pajarón, A. Hernández, and J. V. Milanović, “Probabilistic assessment of the impact of electric vehicles and nonlinear loads on power quality in residential networks,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 129, p. 106807, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.106807.
- [16] H. Farooq, C. Zhou, M. E. Farrag, and M. Ejaz, “Investigating the impacts of distributed generation on an electrical distribution system already stressed by non-linear domestic loads,” *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2012, doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307367.
- [17] Ł. Michalec, M. Jasiński, T. Sikorski, Z. Leonowicz, Ł. Jasiński, and V. Suresh, “Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network—Review and Case Study,” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 3665, vol. 14, no. 12, p. 3665, Jun. 2021, doi: 10.3390/EN14123665.
- [18] S. M. Salam, M. I. Uddin, and M. R. Bin Moinuddin, “Impact Analysis of Large Number of Non-Linear Lighting Loads on Power Quality in Distribution Network,” 2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology, EICT 2019, Dec. 2019, doi: 10.1109/EICT48899.2019.9068811.
- [19] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “NTC 5000:2013. Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales.” Bogotá, 2013.
- [20] R. De la Bastida, C. Velásquez, and F. Espín, “Influencia de la automatización de ensayos de flujo luminoso total en el cálculo de incertidumbre combinada y en el tiempo de ejecución del ensayo,” *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 1, pp. 71–78, Oct. 2018, doi: 10.29166/revfig.v1i1.880.
- [21] P. Li, J. Wang, H. Yang, Z. Li, H. Jiang, and N. Lv, “Analysis of Harmonic Impedance and Harmonic Current Exceeding Standard in Wind Farm,” *Proceedings - 2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, ACPEE 2024*, pp. 218–222, 2024, doi: 10.1109/ACPEE60788.2024.10532751.
- [22] Z. Hu, Y. Han, A. S. Zalhaf, S. Zhou, E. Zhao, and P. Yang, “Harmonic Sources Modeling and Characterization in Modern Power Systems: A Comprehensive Overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 218, p. 109234, May 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
- [23] ISO/IEC, “ISO / IEC Directives Part 2,” 2021.
- [24] F. Espín, E. Manzano, C. Velásquez, C. Chasi, and P. Andrade, “Modeling Variability in the Readings of an 8-channel Color Sensor and Its Uncertainty Estimation,” in *Innovation and Research – Smart Technologies & Systems*, M. Z. Vizuete, M. Botto-Tobar, S. Casillas, C. Gonzalez, C. Sánchez, G. Gomes, and B. Durakovic, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 155–166. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-63437-6_13

- [25] JCGM, "Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement Évaluation des données de mesure-Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure," 2008, Accessed: Aug. 25, 2021. [Online]. Available: www.bipm.org
- [26] Inspection bodies, proficiency testing providers and reference material producers the global association for the accreditation of laboratories, "ILAC-P10:07/2020 Policy on Metrological Traceability of Measurement Results," 2020.
- [27] International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods," 2021.
- [28] C. Velasquez, M. A. Castro, F. Rodriguez, F. Espin, and N. Falconi, "Optimization of the Calibration Interval of a Luminous Flux Measurement System in HID and SSL Lamps Using a Gray Model Approximation," in 2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE, Oct. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/ETCM53643.2021.9590764.
- [29] S. K. Kimothi, *The Uncertainty of Measurements*, 1st ed. American Society For Quality Control, 2002.
- [30] H. Kume, *Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad*, 1st ed. Tokio: Editorial Norma, 1992.
- [31] T. Rymarczyk, E. Korzeniewska, A. Wantuch, and M. Olesiak, "Effect of LED Lighting on Selected Quality Parameters of Electricity," *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 1582, vol. 23, no. 3, p. 1582, Feb. 2023, doi: 10.3390/S23031582.
- [32] P. Tzvetkov, K. Galabov, A. Serov, and I. Kodjabashev, "Power quality analyzers calibration on total harmonics distortion of voltage and current by reference square waveform signal," 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2021 - Proceedings, Jul. 2021, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9502997.