

Casos de estudio de diagnóstico por SFRA a dos transformadores de potencia de tres devanados

Case study of diagnosis by SFRA to two power transformers with three windings

Orestes Hernández Areu^I, Dailen García del Sol^I, Ernesto Díaz Alfonso^I, Juan Carlos Olivares Galván^{II}

^IUniversidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba

^{II}Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, México

*Autor de correspondencia: orestesh@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: 4 de abril de 2022

Aprobado: 7 de junio de 2022

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

El diagnóstico de los transformadores ha sido un tema al que se ha prestado mucha atención debido a la importancia que reviste en el fin de aumentar el tiempo de vida y la calidad de la explotación de los mismos. Existen publicaciones sobre técnicas cuyos objetivos son predecir el estado de estas máquinas. Una de las pruebas que se emplea para diagnosticar, defectos mecánicos en estos equipos, es el “Análisis de Respuesta al Barrido de Frecuencia” (SFRA). En este artículo se presentan los ensayos de SFRA realizados a dos transformadores de tres devanados en subestaciones de subtransmisión. Se hace un análisis de cada caso a partir de las repuestas y resultados obtenidos, constatándose que en las descripciones de los patrones de repuestas de SFRA que hacen las normas para los modos de falla, se aprecia ambigüedad y se hace difícil discriminar entre un modo de falla, otro o percibir si hay más de uno presente.

Palabras clave: transformadores, diagnóstico de transformadores, SFRA.

The diagnosis of transformers has been a subject to which much attention has been paid due to the importance it has in order to increase their life time and the quality of their exploitation. There are publications on techniques whose objectives are to predict the state of these machines. One of the tests used to diagnose mechanical defects in this equipment is the "Sweep Frequency Response Analysis" (SFRA). This article presents the SFRA tests carried out on two three-winding transformers in subtransmission substations. An analysis of each case is made based on the answers and results obtained, confirming that in the descriptions of the SFRA response patterns that make the standards for failure modes, there is ambiguity and it is difficult to discriminate between a mode of fails, another or perceive if more than one is present.

Key words: transformers, transformer diagnostics, SFRA

INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades del mantenimiento periódico preventivo o predictivo basado en la condición de los transformadores de potencia, se realizan determinadas pruebas de diagnóstico, con el objetivo de supervisar su funcionamiento o estado técnico. Los costos de la actividad de supervisión del funcionamiento de un transformador a través del diagnóstico resultan económicos en comparación con los costos que ocasiona una avería o la interrupción del suministro eléctrico. El proceso de diagnóstico y mantenimiento comienza a partir de mediciones que pueden llevarse a cabo en el lugar del proceso o fuera de él, con el equipo desenergizado o con energía de forma general. Los transformadores de potencia se diseñan para resistir tensiones normales de operación, las sobretensiones a las que pueden estar expuestos, los esfuerzos térmicos a que estarán sometidos según sus características de carga y los esfuerzos electrodinámicos debidos a los cortocircuitos externos.

Cómo citar este artículo:

Orestes Hernández Areu, *et al.* Casos de estudio de diagnóstico por SFRA a dos transformadores de potencia de tres devanados. Ingeniería Energética, 2022, 43(2), mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

En su interior pueden generarse desplazamientos o daños durante el transporte de las máquinas si la estructura mecánica de los devanados y núcleo no están sujetos suficientemente. Cuando un transformador ha sufrido alguna situación anómala, es necesario verificar su estado para estar conscientes de su capacidad residual para resistir los esfuerzos y contingencias a que podrá verse sometido nuevamente. Estas situaciones anómalas, tienden a generar distintas condiciones de estrés en la unidad que, si bien no causan una falla inmediata, van actuando y deteriorando progresivamente su integridad hasta producir daños irreparables. También es importante que estos daños sean detectados a tiempo para planificar mantenimientos correctivos [1]. Una de las pruebas de diagnóstico para detectar estos defectos, es el análisis de respuesta al barrido frecuencia SFRA, (Sweep Frequency Response Analysis), la cual evalúa las deformaciones o desplazamiento en las bobinas o núcleo que se lleguen a presentar en el transformador; dicha prueba se realiza con el transformador fuera de servicio, lo que implica que no se realice con frecuencia y solo se haga en los mantenimientos o cuando se tenga cierta sospecha de un posible fallo en el equipo [2].

MATERIALES Y MÉTODOS

El método SFRA en transformadores se realiza inyectando por un terminal una señal de frecuencia variable o con un ancho de banda amplio obteniendo la respuesta a esta excitación en un terminal distinto, por lo cual se considera al transformador como un modelo de parámetros distribuidos, resistivos (R), inductivos (L) y capacitivos (C). Se obtiene la función de transferencia de esta red RLC mediante la relación de las señales de excitación y de respuesta. Cualquier cambio en el interior del transformador cambiará la red RLC que lo representa [3]. La señal de excitación es una onda sinusoidal de baja amplitud (generalmente de amplitud de 1 a 20V), que se aplica a un terminal del transformador con un barrido de frecuencia (con un rango de Hertz a Mega Hertz), la función de transferencia se obtiene de la relación salida / entrada, para varias frecuencias [3].

La respuesta gráfica obtenida en el dominio de la frecuencia, es comparada con otra respuesta obtenida en condiciones similares, para detectar alguna diferencia que evidencie alteración en la red RLC. Para la comparación gráfica, se hace necesario disponer de las medidas de referencia de fábrica del equipo, o del propio equipo con evidencias de que está en buen estado, o equipos similares. Sin embargo, también es posible detectar una falla comparando entre sí las curvas obtenidas de las tres fases de un transformador trifásico, sin necesidad de disponer de curvas de referencia [4 - 6].

En este artículo se presentan los resultados de los ensayos a dos transformadores de subestaciones de subtransmisión de 110 kV, comparando entre sí las curvas obtenidas de las tres fases de cada máquina.

Los transformadores en cuestión, fueron:

- a) Transformador 1, cuyos datos nominales son: 25/25/8 MVA; 110/34,5/6,6 kV. Y/Y/Δ. Devanado terciario accesible.
- b) Transformador 2, cuyos datos nominales son: 25/25/6 MVA; 110/34,5/6,0 kV. Y/Y/Δ. Devanado terciario no accesible.

El ensayo se realizó con un equipo analizador de barrido de frecuencia y se empleó el procedimiento que se establece en [7]. Las mediciones se realizaron a través de los dos terminales de cada devanado para obtener la respuesta de frecuencia de extremo a extremo en forma de magnitud en dB vs. frecuencia, de acuerdo a la ecuación (1).

$$\text{Magnitud} = 20 \log \frac{V_{\text{medida}}}{V_{\text{referencia}}} \quad (1)$$

Donde:

$V_{\text{referencia}}$: tensión de la fuente, inyectada a uno de los terminales del devanado.

V_{medida} : tensión medida en el otro extremo del devanado.

En teoría, la tensión V_{medida} es una réplica de la respuesta de corriente en el extremo del devanado, a la tensión inyectada en el otro extremo del devanado. Por lo tanto, la respuesta de extremo a extremo del devanado se puede considerar como la admitancia "virtual" del devanado [7].

Una de las limitantes de la técnica de respuesta en frecuencia en los transformadores es que su interpretación para la obtención de un diagnóstico confiable, necesita de investigaciones más avanzadas dado que todavía no se toman decisiones a partir de sus mediciones, es decir que el ensayo de SFRA es una técnica complementaria [8].

Los problemas pueden ser presumidos a partir de la existencia de los siguientes criterios [7, 9, 10]:

- a) Variación en toda la forma de la respuesta de frecuencia.
- b) Variación en el número de resonancias (picos máximos) o anti - resonancias (picos mínimos).
- c) Cambios en la posición de las frecuencias de resonancias.

A baja frecuencia (por debajo de 2 kHz), está presente el efecto del núcleo. La respuesta comienza con una magnitud decreciente de -20dB/década. Esto se debe a la inductancia magnetizante del núcleo. Esto es seguido por un mínimo que ocurre debido a la resonancia en serie entre la inductancia magnetizante del núcleo y la capacitancia total del transformador. La fase B tendrá una respuesta claramente diferente de las otras dos debido a la diferencia en trayectoria de la reluctancia magnética de la rama central de un núcleo de tres ramas. Entre 2 kHz y 20 kHz, está presente la interacción entre los devanados. La respuesta se ve influida por cómo se conectan y terminan los devanados (estrella o delta abierta o cerrada) y los neutros (flotando o a tierra).

Desde 20 kHz hasta 1 MHz, la estructura del devanado influirá en gran medida en la respuesta. En este rango de frecuencia hay menos resonancias y anti - resonancias y una tendencia de aumento principalmente capacitiva, debido a la alta capacitancia en serie del devanado de AT. Más allá de la frecuencia de 1 MHz, la tendencia de la respuesta de frecuencia es irregular y compleja, influenciada por los cables de derivación y los cables de conexión a tierra [7, 9, 10].

Para la identificación de los posibles defectos se utilizaron los criterios de modo de fallas planteados en las publicaciones [7, 9, 10]. Ejemplo de los cuales se muestran a continuación:

a) Defectos del núcleo.

Las fallas por defectos en el núcleo provocan cambios en el circuito magnético. Los defectos del núcleo pueden incluir laminaciones del núcleo quemadas, laminaciones del núcleo en cortocircuito, puesta a tierra del núcleo múltiple/involuntaria, puesta a tierra del núcleo perdida y dislocaciones de juntas.

En el rango 20 Hz – 10 kHz; las respuestas de las pruebas de circuito abierto se ven afectadas en las regiones por debajo de 10 kHz. Se debe dar menos peso al cambio, porque la identificación de defectos en el núcleo a veces puede quedar enmascarada por los efectos de la magnetización residual. Si la respuesta a circuito abierto, tiene la forma de una respuesta de cortocircuito, esto podría indicar un defecto en el núcleo. En las respuestas a las pruebas de cortocircuito, todas las fases deben ser similares.

En el rango de 5 kHz – 100 kHz; las respuestas de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito, pueden cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia.

En el rango de 50 kHz – 1 MHz; las respuestas de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito en este rango no se ven afectadas. Sin embargo, si la falla se debe a un problema de conexión a tierra del núcleo, pueden aparecer cambios de resonancia en la parte superior de este rango.

En el rango mayor a 1 MHz; Si la falla se debe a un problema de conexión a tierra del núcleo, pueden aparecer cambios de resonancia en este rango.

b) Deformación radial del devanado.

En el rango de 20 Hz – 10 kHz; las respuestas de las pruebas de circuito abierto no se ven afectadas. Las respuestas a las pruebas de cortocircuito resultan en un aumento de la impedancia. El trazo de FRA para la fase afectada generalmente exhibe una ligera atenuación dentro de la región de caída inductiva.

En el rango de 5 kHz – 100 kHz; las respuestas a las pruebas de circuito abierto y cortocircuito pueden cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia dependiendo de la severidad de la deformación. Sin embargo, este cambio es mínimo y difícil de identificar. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero aún es posible que los efectos se transfieran a los otros devanados.

En el rango de 50 kHz – 1 MHz la deformación radial es más obvia. Las respuestas de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito pueden cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia dependiendo de la severidad de la deformación. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero aún es posible que los efectos se transfieran a los otros devanados.

Rango mayor a 1 MHz; Este rango generalmente no se ve afectado. Sin embargo, la deformación severa puede extenderse dentro de este rango.

c) Deformación axial del devanado.

En el rango de 20 Hz – 10 kHz las respuestas de las pruebas de circuito abierto, generalmente no se ven afectadas. Las respuestas de las pruebas de cortocircuito, resultan en un cambio en la impedancia. La traza FRA para el devanado afectado provoca una diferencia entre fases o resultados anteriores en la región de caída inductiva.

En el rango de 5 kHz – 100 kHz la deformación axial es más obvia. Las respuestas de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito pueden cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia dependiendo de la severidad de la deformación. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero aún es posible que los efectos se transfieran a los otros devanados.

En el rango de 50 kHz – 1 MHz las respuestas de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito pueden cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia según la gravedad de la deformación. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero aún es posible que los efectos se transfieran a los otros devanados.

En el rango mayor a 1 MHz, la respuesta a la deformación del devanado axial es impredecible tanto en pruebas de circuito abierto como en cortocircuito

d) Movimiento del devanado por stress electrodinámico o del transporte.

En el rango de 20 Hz – 10 kHz. Esta región generalmente no se ve afectada durante el movimiento de devanados.

En el rango 5 kHz – 100 kHz; las respuestas pueden cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia dependiendo de la magnitud del movimiento. Los cambios serán mayores para la fase afectada.

En el rango de 50 kHz – 1 MHz Esta región generalmente no se ve afectada durante el movimiento de devanados, sin embargo, los cambios en la capacitancia longitudinal pueden causar cambios de resonancia en la parte superior de este rango.

Rango mayor a 1 MHz; los cambios en la capacitancia longitudinal pueden causar cambios de resonancia

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Resultados del SFRA del transformador 1 (devanado terciario accesible)

En la figura 1, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 1 cuando se alimentaron secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se midió por el neutro con los devanados secundario y terciarios abiertos y el cambiador de derivaciones en el máximo. La temperatura de los devanados era 50,0°C.

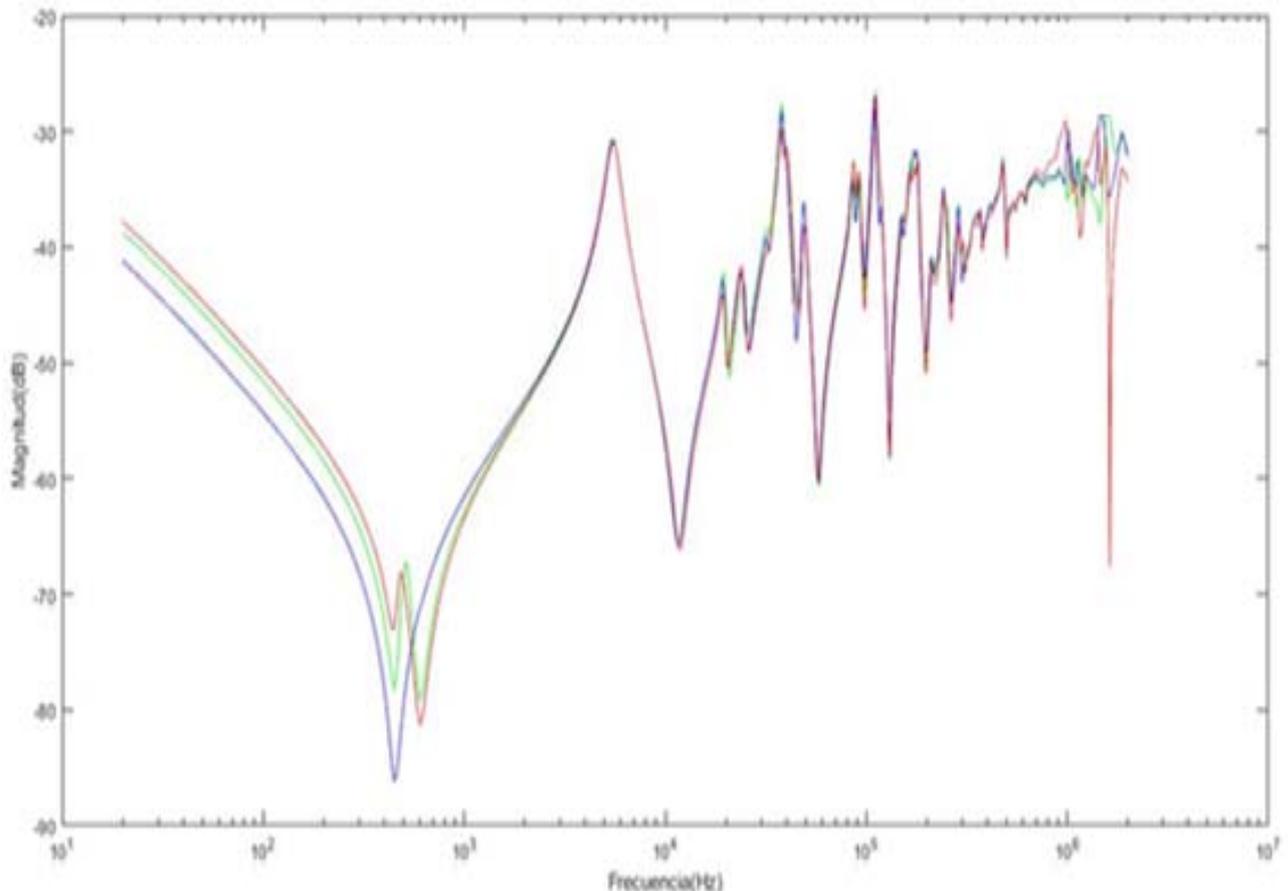


Fig. 1. Alimentación por el primario, medición en el neutro, secundario y terciarios abiertos y cambiador de derivaciones en el máximo

De acuerdo a [7], las respuestas de la figura, pudieran ser indicios de problemas de conexión a tierra del núcleo o en los conductores de las derivaciones del “cambia taps”, teniendo en cuenta que aparecen alteraciones en el rango mayor a 1 MHz. También existe la probabilidad de deformación radial de la fase “W”, ya que este modo de falla es más obvio en el rango de 50 kHz – 1 MHz, y en caso de deformación severa, puede extenderse a más de 1 MHz. En la figura 2, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 1 cuando se alimentaron secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se midió por el neutro con los devanados secundario y terciarios, abiertos y el cambiador de derivaciones en el mínimo (no interviene en la medición). La temperatura de los devanados era 50,0°C.

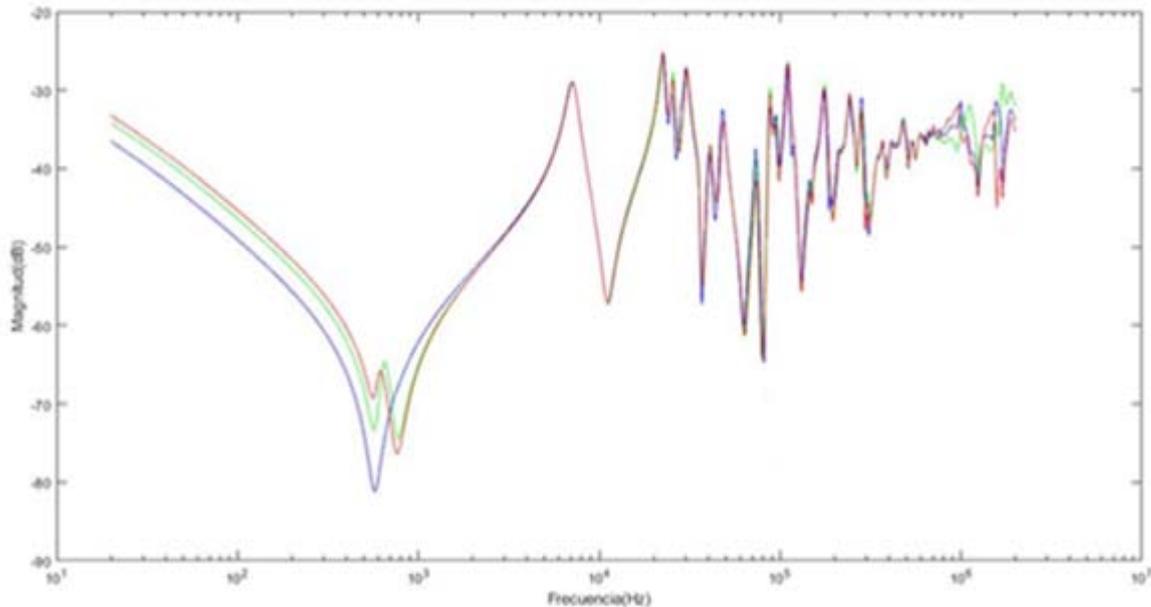


Fig. 2. Alimentación por el primario, medición en el neutro, secundario y terciario abiertos y cambiador de derivaciones en el mínimo

Ahora, al eliminarse el “cambia taps”, varió la respuesta, fundamentalmente en el rango mayor a 1 MHz. Esto indica que tal vez el problema está relacionado con las derivaciones y no con la conexión a tierra del núcleo. También sigue presente la probabilidad de deformación radial de la fase “W”. En la figura 3, se muestran los resultados de las respuestas del transformador 1 cuando se alimentaron secuencialmente las fases u (trazo verde), v (trazo azul) y w (trazo rojo) del devanado secundario y se midió por el neutro con el devanado primario y terciario, abiertos.

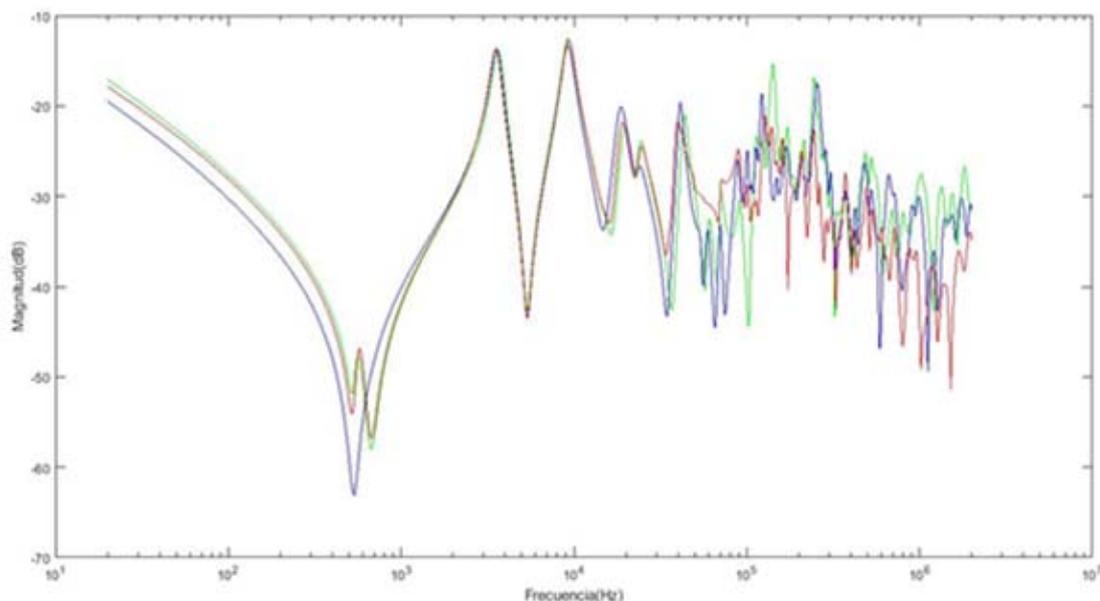


Fig. 3. Alimentación por el secundario, medición en el neutro, primario y terciario abiertos

En esta figura tampoco se descarta la probabilidad de la deformación radial ya que el rango de más de 50 kHz tiene suficientes alteraciones que la justifican. En la figura 4, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 1 cuando se alimentan secuencialmente las fases u (trazo verde), v (trazo azul) y w (trazo rojo) del devanado terciario, se mide por v, w y u respectivamente, con los devanados primario y secundario abiertos.

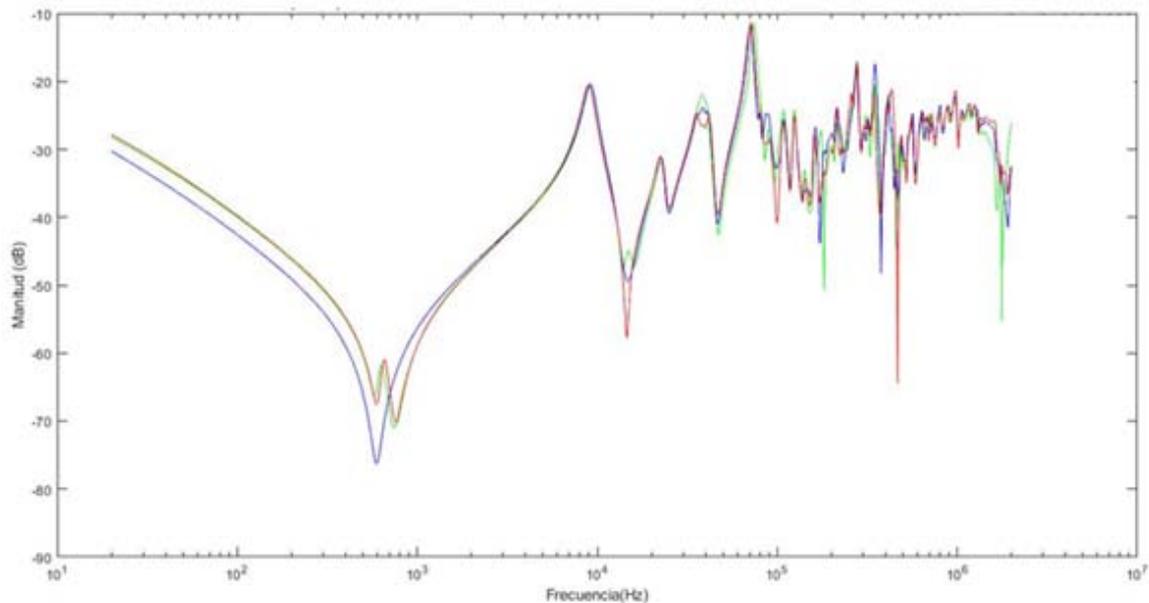


Fig. 4. Alimentación por el terciario, medición en el terciario, primario y secundario abiertos

Se observan cambios en las resonancias a partir de 10 kHz, acentuados después de 100 kHz, con énfasis en la fase “W”, lo cual es consistente que el análisis de las anteriores respuestas de SFRA. En la figura 5, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 1 cuando se alimentan secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se mide por el neutro con el devanado secundario en cortocircuito y el cambiador de derivaciones en el máximo.

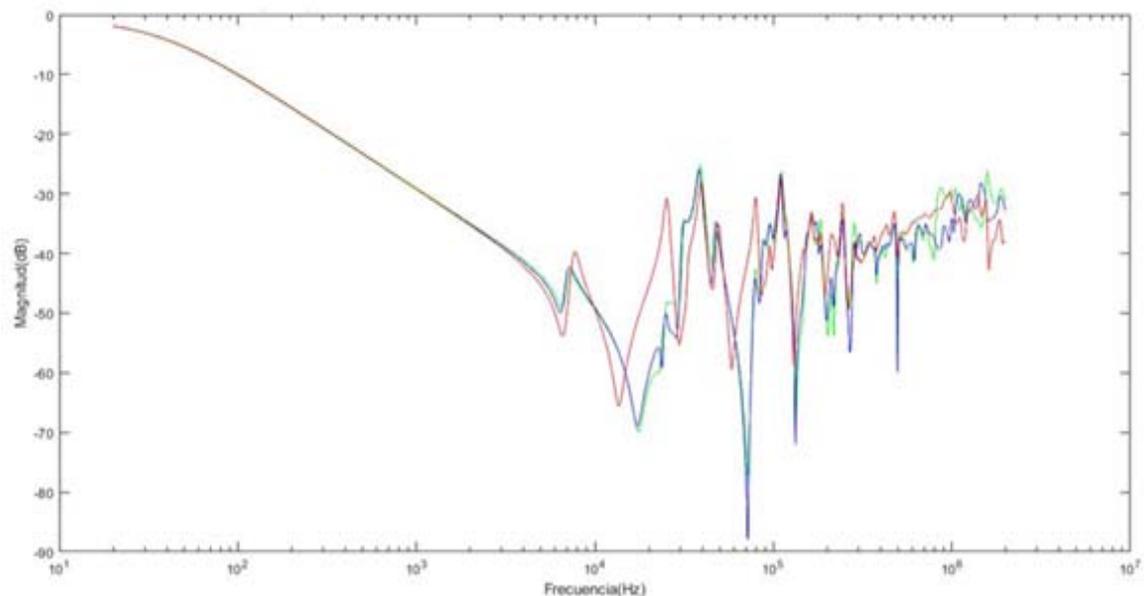


Fig. 5. Alimentación por el primario, medición en el neutro, secundario en cortocircuito y cambiador de derivaciones en el máximo

El trazo de FRA para la fase “W” exhibe una ligera atenuación dentro de la región de caída inductiva. La probabilidad de deformación radial sigue siendo alta en la fase “W”, reflejándose en las demás fases también. En la figura 6, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 1 cuando se alimentan secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se mide por el neutro con el devanado terciario en cortocircuito y el cambiador de derivaciones en el máximo.

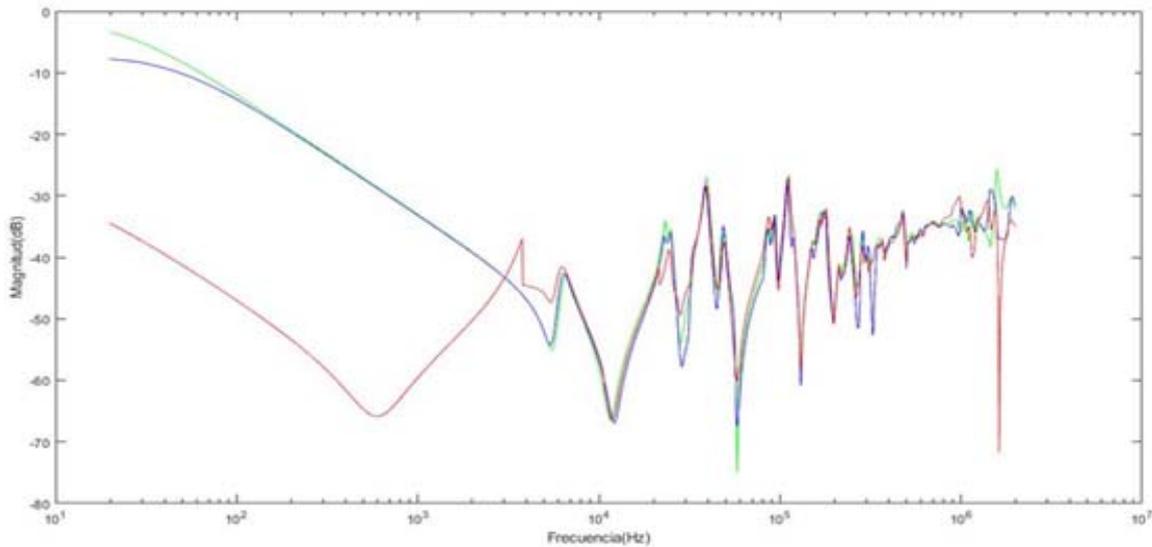


Fig. 6. Alimentación por el primario, medición en el neutro, terciario en cortocircuito y cambiador de derivaciones en el máximo

El trazo de FRA para la fase “W” presenta una atenuación notable dentro de la región de caída inductiva. La probabilidad de deformación radial sigue siendo alta en esta fase, reflejándose en las demás también. Además, en el rango de 5 – 100 kHz, las alteraciones son mayores para el devanado afectado y sus efectos se transfieren a los otros devanados

Resultados del SFRA del transformador 2 (devanado terciario no accesible)

En la figura 7, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 2 cuando se alimentaron secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se midió por el neutro con el devanado secundario abierto y el cambiador de derivaciones en el máximo. La temperatura de los devanados era 44,0°C.

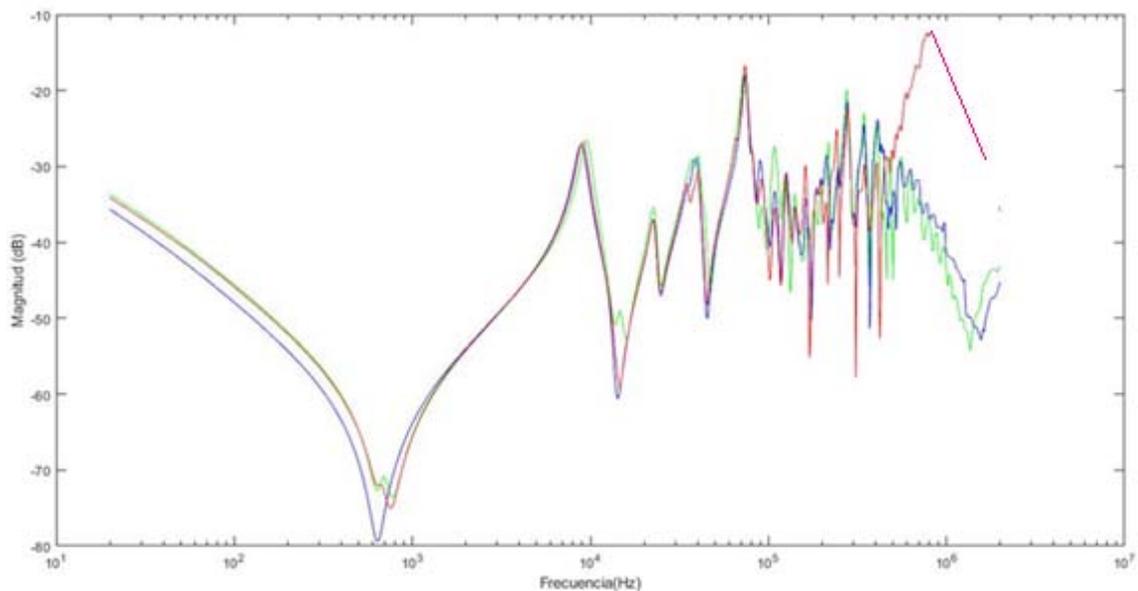


Fig. 7. Alimentación por el primario, medición en el neutro, secundario abierto y cambiador de derivaciones en el máximo

Las respuestas de la figura, pudieran ser indicios de problemas de conexión a tierra del núcleo o en los conductores de las derivaciones del “cambia taps”, teniendo en cuenta que aparecen alteraciones en el rango mayor a 1 MHz.

También existe la probabilidad de deformación radial en alguna fase”, ya que en el rango de 50 kHz – 1 MHz hay cambios notables y casi a 1 MHz se produce una nueva resonancia de la fase “W”. No se descarta la deformación axial ni el movimiento del devanado porque entre 5 y 100 kHz la deformación axial es más obvia, cambiando las repuestas y produciendo nuevos picos y valles de resonancia, como se aprecia en la fase “U”.

En la figura 8, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 2 cuando se alimentan secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se mide por el neutro con el devanado secundario abierto y el cambiador de derivaciones en el mínimo.

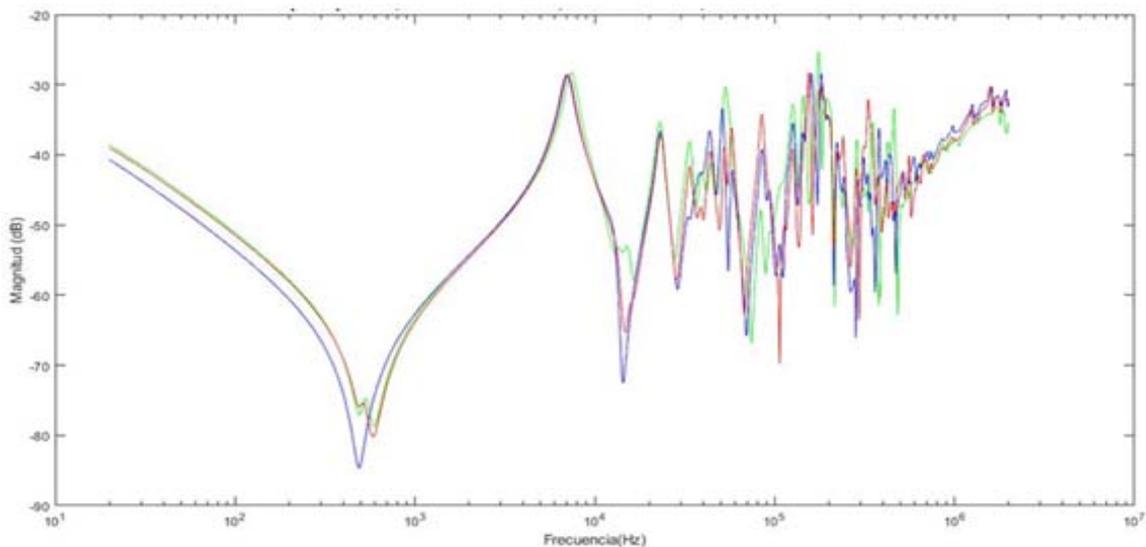


Fig. 8. Alimentación por el primario, medición en el neutro, secundario abierto y cambiador de derivaciones en el mínimo

Ahora, al eliminarse el “cambia taps”, varió la respuesta, fundamentalmente en el rango mayor a 1 MHz. Esto indica que tal vez el problema está relacionado con las derivaciones y no con la conexión a tierra del núcleo. También sigue presente la probabilidad de deformación radial o axial. En la figura 9, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 2 cuando se alimentan secuencialmente las fases u (trazo verde), v (trazo azul) y w (trazo rojo) del devanado secundario y se mide por el neutro con el devanado primario abierto.

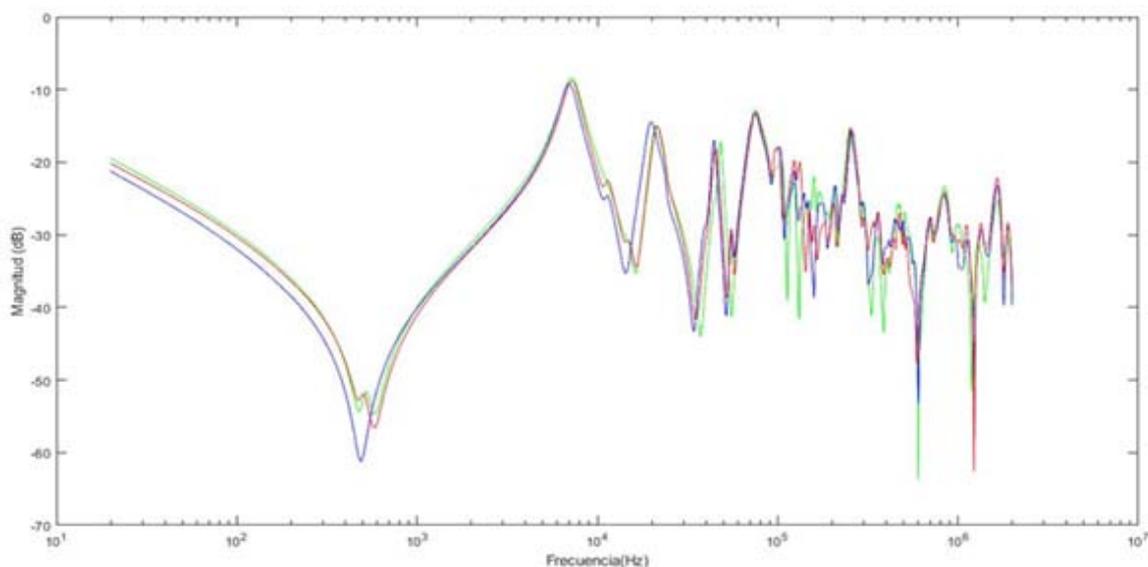


Fig. 9. Alimentación por el secundario, medición en el neutro, primario abierto

Aquí se hace evidente que, de 10 kHz a 1 MHz y más, hay diferencias notables entre las respuestas, por lo que la sospecha de deformación radial o axial sigue presente.

En la figura 10, se muestran las respuestas obtenidas del transformador 2 cuando se alimentan secuencialmente las fases U (trazo verde), V (trazo azul) y W (trazo rojo) del devanado primario y se mide por el neutro con el devanado secundario en cortocircuito y el cambiador de derivaciones en el máximo.

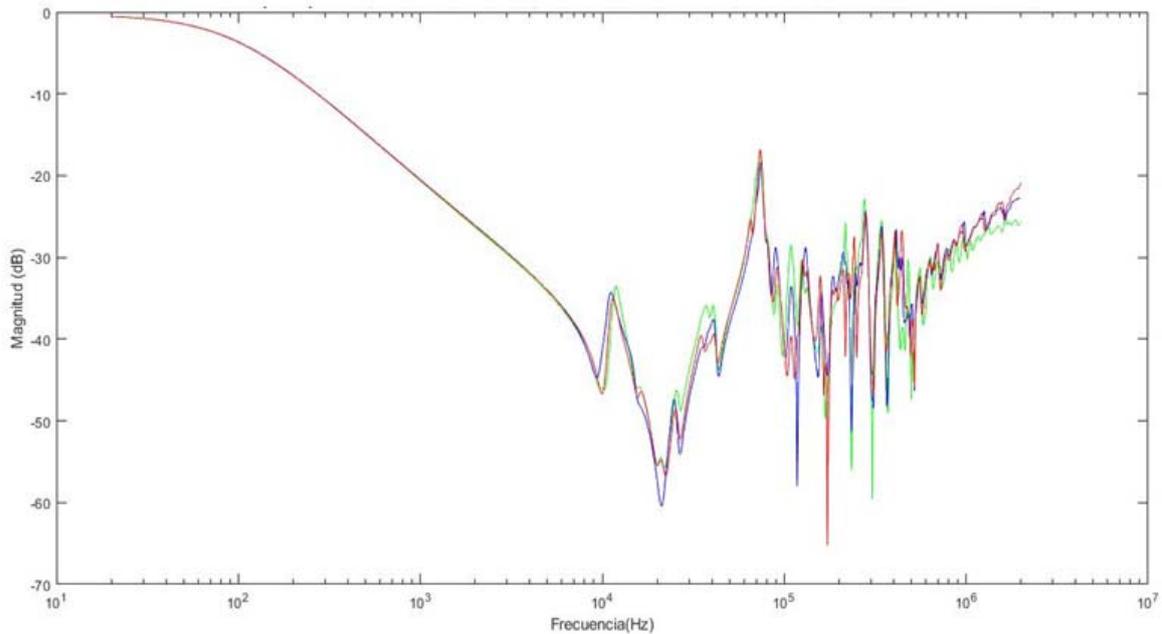


Fig. 10. Alimentación por el primario, medición en el neutro, secundario en cortocircuito y cambiador de derivaciones en el máximo

Ahora, sin la influencia del núcleo magnético, sigue tomando fuerza el criterio de que pudiera haber deformación radial o axial de alguna fase, ya que en el rango de 10 kHz en adelante hay cambios notables, extendiéndose a más allá de 1 MHz.

CONCLUSIONES

1. En el transformador 1 es posible que existan problemas en los conductores del cambiador de derivaciones, así como deformación radial en la fase “W” del devanado.
2. En el transformador 2 las alteraciones en las regiones de 5 a 100 kHz y de 50 kHz a 1 MHz, permiten presumir que pudiera haber deformación radial o axial de alguna fase. También puede ser que tenga problemas en los conductores del cambiador de derivaciones.
3. En las descripciones de los patrones de respuestas de SFRA que hacen las normas, para los modos de falla, se aprecia ambigüedad y muchas veces se hace difícil discriminar entre un modo de falla, otro o percibir si hay más de uno presente.
4. No es segura la sentencia de si algún cambio en la comparación de respuestas entre fases o transformadores similares, corresponde con un defecto o es un cambio lógico y aceptable para dos especímenes distintos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Departamento y la brigada de linieros de Subestaciones Eléctricas de la Organización Básica Eléctrica de la provincia de Villa Clara en Cuba, por su apoyo en la ejecución de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1]. MAYORA Hernán, *et al.* “Efectos de la condición del núcleo magnético en las respuestas del análisis de respuesta en frecuencia”. En XVIII ERIAC Décimo Oitavo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRE. A2 – TRANSFORMADORES, Foz do Iguaçu, Brasil, 13 a 23 de mayo de 2019, p. 8. . ISBN: 978-85-906780-1-4. [Consultado el 12 de abril de 2022]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/75454>
- [2]. ALVAREZ, R. E. y Rodríguez S. “Efectos de cortocircuito en transformadores verificados con el análisis de respuesta en frecuencia”. En XVII ERIAC Décimo Séptimo Encuentro Regional Ibero-americano de CIGRE. A2 – TRANSFORMADORES, Ciudad del Este, Paraguay, 21 a 23 de mayo de 2017, p. 8. [Consultado el 13 de abril de 2022]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/64627/Documento_completo.pdf?sequence=1
- [3]. TIBANLOMBO, Víctor, *et al.* “Evaluación del Estado del Aislamiento en Transformadores a partir de Mediciones IFRA de Alto Voltaje”. Revista Politécnica, febrero - abril 2020, vol. 45, n 1, p. 39 - 48. ISSN 2477-8990. [Consultado el 17 de abril de 2022]. Disponible en: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/998

- [4]. ALVAREZ, R. E., *et al.* “Ensayos de respuesta en frecuencia (SFRA). Interpretación y análisis de las configuraciones de ensayo”. En XVII ERIAC Décimo Séptimo Encuentro Regional Ibero-americano de CIGRE. A2 – TRANSFORMADORES, Ciudad del Este, Paraguay, 21 a 23 de mayo de 2017, p. 8. [Consultado el 14 de abril de 2022]. Disponible en: <https://app.box.com/s/gdnmhmmkoblo622h4v9j2pwvd5xlgvx8>
- [5]. ZORRILLA J. D., Céspedes A. y García D. F. “Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica”. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2020, vol. 28, n. 2, p. 184-203. ISSN 0718-3305. [Consultado el 15 de abril de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200184>
- [6]. HERNÁNDEZ O., *et al.* “Design a software for interpretation of SFRA test in power transformers diagnostic”. Conference: Congreso Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico. La Habana, Cuba 2017, p. 1 – 10. ISBN - 978-959-261-572-4. [Consultado el 15 de abril de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322071219_DESIGN_A_SOFTWARE_FOR_RESULTS_INTERPRETATION_OF_SFRA_TEST_IN_POWER_TRANSFORMERS_DIAGNOSTIC
- [7]. IEEE Standard C57.149. “Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers”. IEEE. March, 2013. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6475950>
- [8]. PLEITE G., J., Gómez-Luna, E. y Aponte M., G. “Obtención de la respuesta en frecuencia en transformadores estando en servicio”. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 2017, v. 25, n 1, p. 59-69. ISSN 0718-3305. [Consultado el 17 de abril de 2022]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000100059>
- [9]. Technical Brochure CIGRE 342 WG A2.26, “Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)”, April 2008. Disponible en: <https://e-cigre.org/publication/342-mechanical-condition-assessment-of-transformer-windings-using-frequency-response-analysis-fra>
- [10]. IEC Standard 60076-18. “International Standard: Power transformers. Part 18: Measurement of Frequency Response International Electrotechnical Commission”. Edition 1. July, 2012. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/597>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Orestes Hernández Areu: <https://orcid.org/0000-0002-2672-239X>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los ensayos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Dailen García del Sol: <https://orcid.org/0000-0002-1425-7371>

Participó en la ejecución de los ensayos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Ernesto Díaz Alfonso: <https://orcid.org/0000-0003-1837-058X>

Participó en la ejecución de los ensayos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Juan Carlos Olivares Galván: <https://orcid.org/0000-0002-1935-2669>

Participó en el análisis de los resultados, la revisión crítica del artículo y en la aprobación final del mismo.