

# Diagnóstico del devanado terciario de un autotransformador de subestación

## *Diagnosis of the tertiary winding of a substation autotransformer*

Ramón Pérez Hernández<sup>I</sup>, Orestes Hernández Areu<sup>II,\*</sup>

<sup>I</sup>Empresa de Construcciones de la Industria Eléctrica (ECIE), La Habana, Cuba

<sup>II</sup>Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

\*Autor de la correspondencia: [orestesh@electrica.cujae.edu.cu](mailto:orestesh@electrica.cujae.edu.cu)

Recibido: 27 de noviembre de 2023      Aprobado: 27 de enero de 2024

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

### RESUMEN/ ABSTRACT

Este artículo presenta los resultados del Análisis de Respuesta al Barrido de Frecuencia como método de diagnóstico del devanado terciario de un autotransformador que, desde hace algún tiempo, ha estado presentando puntos calientes en la tornillería que une la carcasa o campana con la base de la cuba. Este fenómeno se estuvo monitoreando con ayuda de imágenes infrarrojas que confirmaron un calentamiento anormal. A este equipo se le aplicó el método de SFRA para confirmar o descartar las posibles causas del defecto. Se emplearon las configuraciones de admitancia de circuito abierto y de cortocircuito. Las comparaciones de las funciones transferenciales de respuesta se hicieron entre fases del mismo devanado terciario y para el análisis de los resultados se aplicó la Norma China DL/T 911-2004. Se comprobó que, existe una deformación obvia en este devanado y que el calentamiento excesivo de la tornillería, no está causada por esta deformación.

**Palabras clave:** SFRA, detección de falla, autotransformador.

*This article presents the results of the Frequency Sweep Response Analysis as a diagnostic method for the tertiary winding of an autotransformer that, for some time, has been presenting hot spots in the screws that join the casing or bell with the base of the tank. This phenomenon was monitored with the help of infrared images that confirmed abnormal heating. The SFRA method was applied to this equipment to confirm or rule out the possible causes of the defect. The open-circuit and short-circuit admittance configurations were used. Comparisons of the transfer response functions were made between phases of the same tertiary winding and the Chinese Standard DL/T 911-2004 was applied for the analysis of the results. It was found that there is an obvious deformation in this winding and that the excessive heating of the screws is not caused by this deformation.*

**Keywords** – SFRA, failure detection, autotransformer.

### INTRODUCCIÓN

El Análisis de la Respuesta al Barrido de Frecuencia se utiliza como herramienta de diagnóstico de transformadores que por alguna razón han estado sometidos a estrés eléctrico o mecánico. Sobre este método se ha publicado extensamente desde el año 2002. Ya en 2003 S. Ryder [1], publica un método para diagnosticar fallas en transformadores, a través del análisis de la respuesta en el dominio de la frecuencia. Así en el año 2018, en [2], A. Kamalaselvan y R. Muthaiah publican que el estrés eléctrico es un resultado de fenómenos transitorios en los sistemas de potencia que pueden originar cortocircuitos entre conductores de los devanados y el sistema aislante.

Cómo citar este artículo:

Ramón Pérez Hernández y Orestes Hernández Areu. Diagnóstico del devanado terciario de un autotransformador de subestación. Ingeniería Energética. 2024. 45 (1), enero/abril. ISSN 1815-5901.

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

Esto es cierto, también el estrés mecánico que pudiera verificarse durante el proceso de transportación e instalación de los transformadores, es fuente de deformaciones en los equipos. O. Hernández y otros en 2018; [3], plantean que los parámetros asociados a la geometría de un transformador cambian cuando hay algún tipo de deformación o desplazamiento en las bobinas o en el núcleo magnético. Puede ampliarse que, en muchas ocasiones, pueden ocurrir variaciones en algunas magnitudes de diseño sin apreciarse deformaciones. En 2019, O. Hernández y otros [4], dicen que el Análisis de la Respuesta al Barrido de Frecuencia (SFRA) necesita de un criterio experto para la interpretación de los resultados. Ya en estos momentos, están documentados métodos matemáticos para interpretar los resultados. A. A. Alawady y otros en 2020 [5], aclaran que, mediante el análisis de diferentes respuestas de las mediciones, se detectan las fallas y la gravedad de las mismas.

En 2020 A. A. Alawady y otros [6-8], coinciden en que las respuestas que se obtienen consisten en funciones de transferencia de tensión entre los devanados para una gama de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz dividida en cuatro regiones. Este criterio se puede ampliar con que se pueden obtener funciones de transferencia de impedancia o admitancia. En 2020 N. F. M. Yasid y otros [9], aseveran que la respuesta del devanado de un autotransformador puede ser afectada por el devanado terciario, debido al efecto de acoplamiento entre los devanados. Debe argumentarse que, por el mismo efecto de acoplamiento, la respuesta del devanado terciario puede ser afectada por el devanado principal.

Salem Mgamal Al-Ameri y otros en 2021 [10], aseguran que el Análisis de la Respuesta al Barrido de Frecuencia tiene ventajas sobre otros métodos de diagnóstico, por ser más sensible en la detección de anomalías en la parte activa del transformador. A esto hay que agregar que en estos momentos están patentados equipos de SFRA para realizar este ensayo en línea, compitiendo favorablemente con métodos fuera de línea, como la medición de la corriente magnetizante y la medición de las capacitancias del devanado. Coincidiendo con los autores anteriores, R. E. Álvarez, en 2017 [11] y J. D. Zorrilla en 2020 [12], aseveran que este método es capaz de detectar indicios de problemas, donde otras técnicas son incapaces.

En 2024, R Pérez y O. Hernández [13], concluyen que la aparición de resonancias en las altas frecuencias de las respuestas de SFRA pudieran ser resultado de las diferencias que existen en la distribución física de las barras que conectan la bobina de regulación y el conmutador en cada fase y las salidas a los terminales de media tensión. Debe apuntarse que este mismo efecto puede aparecer en las respuestas del devanado terciario, cuando este se emplea para alimentar carga, lo cual exige un análisis cuidadoso para no interpretar erróneamente los resultados. El presente artículo está referido a un autotransformador de potencia de tres devanados que, desde hace algún tiempo, ha estado presentando puntos calientes en la tornillería que une la carcasa o campana con la base de la cuba. Este fenómeno se ha estado monitoreando con ayuda de imágenes infrarrojas que confirman un calentamiento anormal. A este equipo se le aplicó el método de SFRA para confirmar o descartar las posibles causas del defecto.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El autotransformador de referencia es un equipo de una subestación de 250 MVA, 220/110 kV, tiene un devanado terciario en delta de 11 kV. En la figura 1, se pueden observar cuatro imágenes donde se aprecia un incremento de la temperatura en los tornillos que se encuentran frente a las bobinas alojadas en la columna de la fase C por el lado donde se encuentran los aisladores de alta tensión del autotransformador (imagen 1). En la imagen 2, de la misma figura, ocurre el mismo defecto, pero frente a la columna de la fase B, también por el lado donde se encuentran los aisladores de alta tensión. En este último se alcanzan temperaturas superiores a los 90 °C.

En las imágenes 3 y 4, se puede observar el mismo resultado, pero por los lados donde se encuentran los aisladores de media y baja tensión, respectivamente.

Las altas temperaturas en la tornillería son un indicio de algún defecto en el autotransformador que se puede atribuir a uno de los dos factores siguientes:

1. Deficiente puesta a tierra entre la carcasa y la cuba, debido al deterioro de los tornillos a causa de un extenso proceso de oxidación.

Desplazamiento anormal de alguna bobina, que provoque una dispersión anormal del flujo magnético, fuera de las trayectorias normales, causando la circulación de corrientes por la carcasa y el calentamiento de aquellas partes donde encuentre una alta resistencia eléctrica de la tornillería

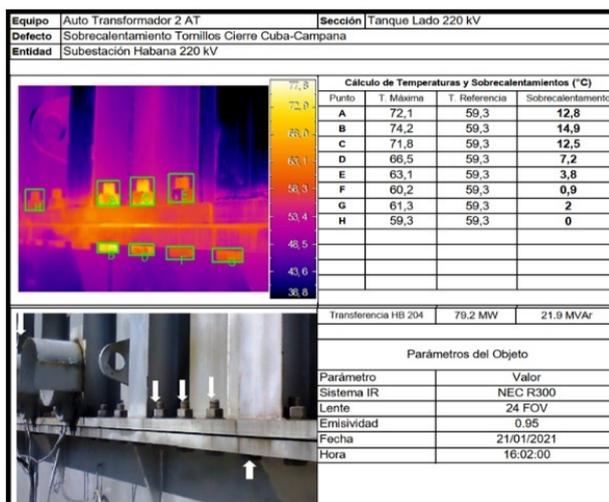


Imagen 1. Calentamiento de la tornillería por el lado de 220 kV, frente a la fase C

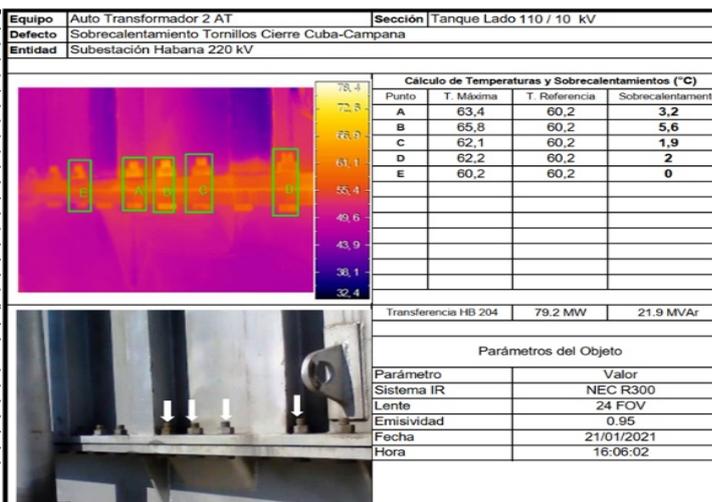


Imagen 3. Calentamiento de la tornillería por el lado de 110 kV, frente a la fase C



Imagen 2. Calentamiento de la tornillería por el lado de 220 kV, frente a la fase B

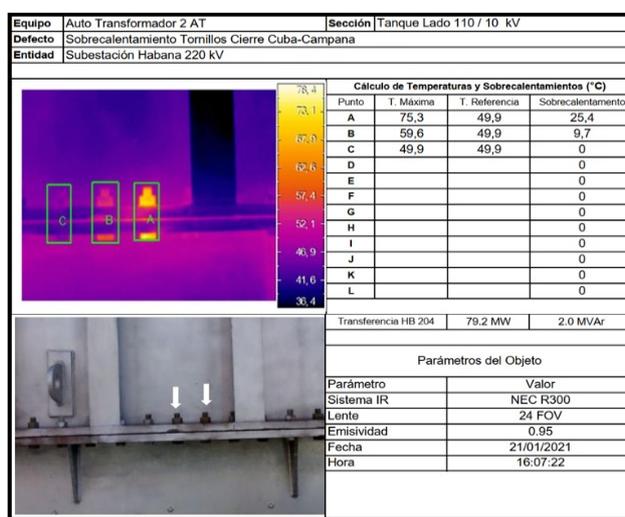


Imagen 4. Calentamiento de la tornillería por el lado de 110 kV, frente a la fase

Fig. 1. Imágenes donde se aprecia un incremento de la temperatura en los tornillos que unen la carcasa o campana con la cuba del autotransformador

### Métodos estadísticos para analizar los resultados de la técnica de SFRA

Existen varios métodos para evaluar los resultados del método de SFRA, entre estos, se pueden citar:

- Método Grupal de manejo de datos mediante Redes Neuronales Artificiales [14].
- Modelo de Árbol de Decisión y Red Neuronal Completamente Conectada [15].
- Índice de Calidad de respuesta de frecuencia para evaluar la condición mecánica de los devanados del transformador [16].
- Coefficiente de Correlación [17,18].
- Desviación Estándar y otros [19,20].

El método de los Coeficientes de Correlación de la Norma DL/T-911-2004, fue empleado para la interpretación de los resultados de los ensayos. Este método calcula los coeficientes de correlación  $R$  entre las funciones de transferencia de las respuestas para realizar para determinar las posibles deformaciones de los devanados.

En la tabla 1, se muestra la relación entre el Factor de Correlación  $R$  y el grado de deformación del devanado, para bandas de frecuencia:  $R_{LF}$  (1kHz-100 kHz),  $R_{MF}$  (100kHz-600 kHz) y  $R_{HF}$  (600kHz-1 MHz).

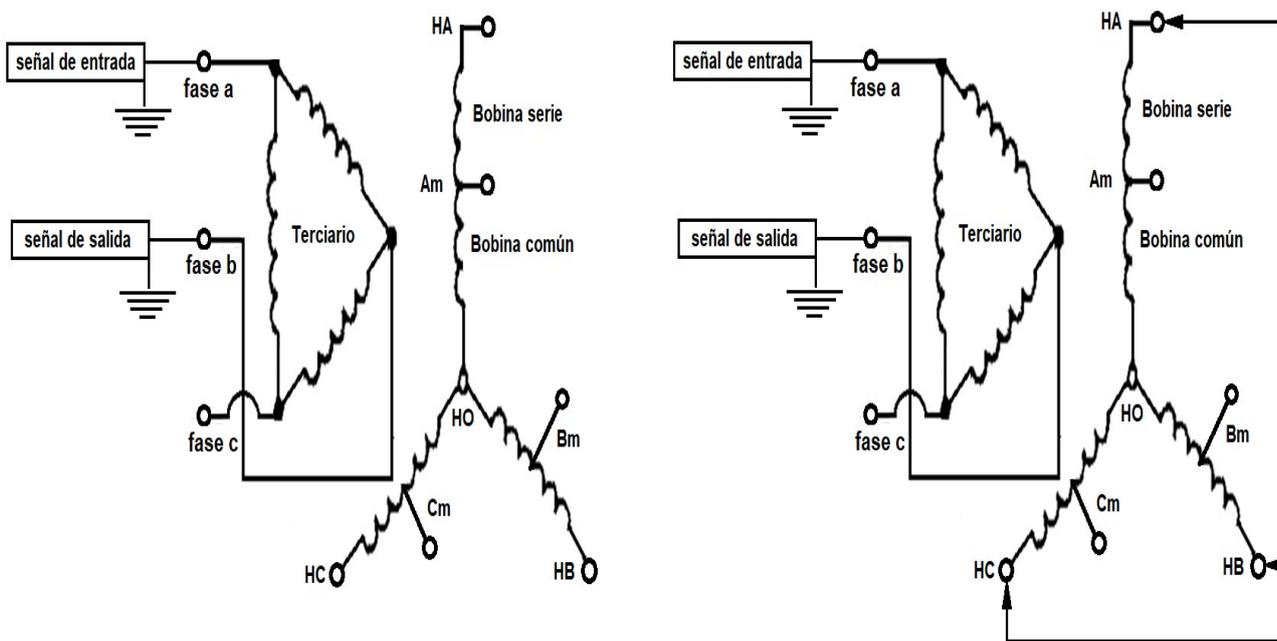
**Tabla 1.** Relación entre el Coeficiente de Correlación R y el grado de deformación del devanado según la Norma China DL/T 911-2004

Grado de Deformación	$R_{LF}$	$R_{MF}$	$R_{HF}$
Bobina Normal	$R_{LF} \geq 2,0$	$R_{MF} \geq 1,0$	$R_{HF} \geq 0,6$
Deformación ligera	$2,0 > R_{LF} \geq 1,0$	$1,0 > R_{MF} \geq 0,6$	
Deformación obvia	$1,0 > R_{LF} \geq 0,6$	$R_{MF} < 0,6$	
Deformación seria	$R_{LF} < 0,6$		

**Ensayos SFRA e Interpretación de los resultados**

Entre las configuraciones de ensayo posibles del SFRA está la de Admitancia de Circuito Abierto ( $Y_o$ ) y la de Admitancia de Cortocircuito ( $Y_{cc}$ ). La configuración de  $Y_o$  se ejecuta desde el extremo de un devanado al otro extremo. En uno de terminales, se inyecta la señal de entrada y por otro terminal, se mide la señal de salida o respuesta. Los terminales de los otros devanados, se dejan flotando [21]. Ver figura 2 a.

La configuración de  $Y_{cc}$  se ejecuta también desde el extremo de un devanado a otro extremo. Los terminales de los otros devanados, se ponen en cortocircuito [21]. Ver figura 2 b. En este artículo, se presentan los resultados obtenidos con la configuración admitancia de circuito abierto ( $Y_o$ ) y admitancia de cortocircuito ( $Y_{cc}$ ) en los devanados terciarios.



a) Configuración Admitancia de Circuito Abierto ( $Y_o$ )

b) Configuración Admitancia de Cortocircuito ( $Y_{cc}$ )

**Fig. 2.** Configuraciones de (a) Admitancia de Circuito Abierto ( $Y_o$ ) y de (b) Admitancia de Cortocircuito ( $Y_{cc}$ )

**Ensayo de admitancia de circuito abierto a las bobinas del devanado terciario**

Se aplicó la señal entre los terminales a - b (fase b), b - c (fase c) y c - a (fase a), teniendo en cuenta el grupo la conexión en Delta del devanado. Los terminales de las fases A, B y C de alta tensión se encuentran al vacío. Ver figura 2 a. Las pruebas de admitancia de circuito abierto del devanado terciario ofrecen los resultados que aparecen en la figura. 3 y la tabla 2. La referencia es la fase a.

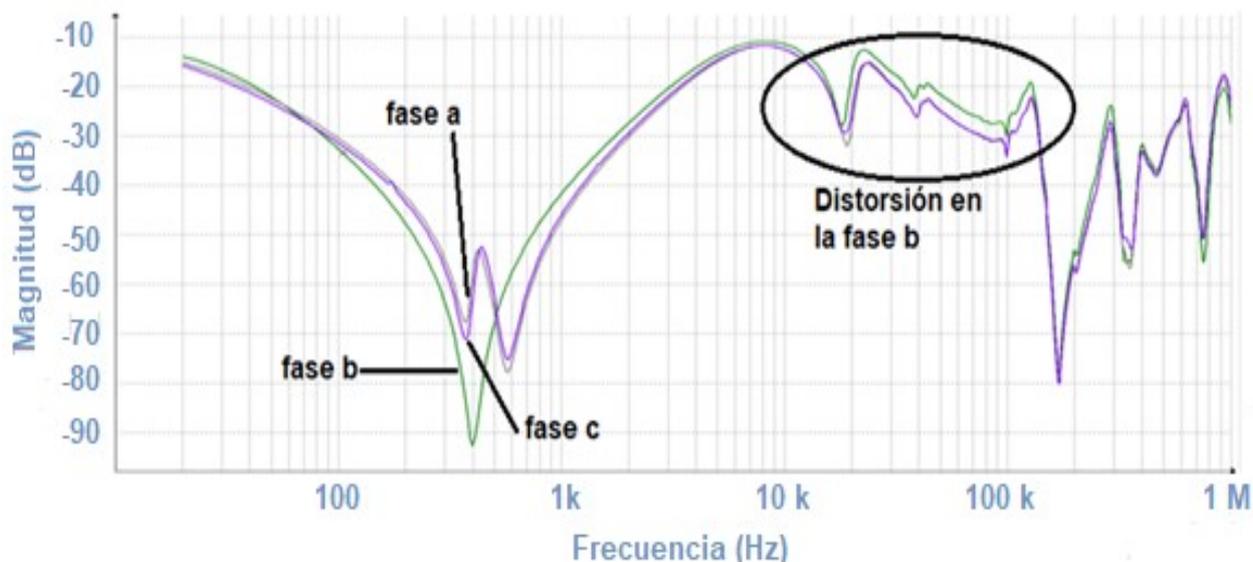


Fig. 3. Curva amplitud - frecuencia de admitancia de circuito abierto en el devanado terciario del autotransformador

Tabla 2. Resultados del factor de correlación en las respuestas del devanado terciario para la gama de bajas ( $R_{LF}$ ), medias ( $R_{MF}$ ) y altas frecuencias ( $R_{HF}$ )

Medición	Fase	$R_{LF}$	$R_{MF}$	$R_{HF}$	Grado de Deformación
Entrada por a, medición por b	b	0.77	1.35	2.05	Deformación Obvia
Entrada por b, medición por c	c	1.29	1.97	2.06	Deformación ligera
Entrada por c, medición por a	a	0.81	1.16	2.40	Deformación Obvia

Llama la atención dos aspectos:

- En la banda bajas frecuencias desde 20 a 100 kHz aparece la fase b con deformación obvia, según los resultados obtenidos en los coeficientes de correlación de la tabla 2. Por la forma de la curva, refleja una deformación axial “telescoping” o alargamiento [7], comparada con la fase a, de referencia.
- También la fase a arrojó un grado de deformación obvia.
- Este resultado evidencia que entre los terminales a y b del devanado, ocurrió un cortocircuito bifásico, en una zona entre el interruptor automático de baja tensión y los terminales de las bobinas del terciario del autotransformador.
- Hay que tener en cuenta que, en estos niveles de tensión (11 kV), las corrientes de cortocircuito son muy altas, del orden de los 20 kA y por muy rápido que actúe la protección diferencial, los resultados pueden afectar la estructura mecánica de las bobinas.
- En la gama de frecuencias entre 20 Hz y la primera resonancia, la curva característica de la fase b en condiciones normales debería ubicarse por debajo de las curvas de las fases a y c, ya que este es un autotransformador con circuito magnético de tres columnas (tipo “núcleo”), por tanto, la curva característica es más inductiva en esta fase.

Esto está dado a que, en condiciones normales, al flujo magnético se le opone una menor reluctancia en su recorrido, lo que hace que la impedancia magnética  $Z_m$  sea mayor que en las fases restantes. A pesar de esto, desde los 20 Hz hasta los 60 Hz, la curva sube por encima de las curvas a y c, lo que evidencia que en la columna de la fase b existe un cambio en su estructura mecánica, lo que ha incidido en un aumento de la reluctancia. Este fenómeno está relacionado con el evento de cortocircuito antes mencionado, por lo que se recomienda hacer una prueba corriente de excitación y gases disueltos para confirmar o descartar una posible deformación y calentamiento en la zona.

### Ensayo de admitancia de cortocircuito a las bobinas del devanado terciario

Se aplicó la señal entre los terminales a - b (fase b), b - c (fase c) y c - a (fase a), teniendo en cuenta el grupo la conexión en Delta del devanado. Los terminales de las fases A, B y C de alta tensión se encuentran cortocircuitados. Ver figura 2 b. Las pruebas de admitancia de cortocircuito del devanado terciario ofrecen los resultados que aparecen en la figura 4.

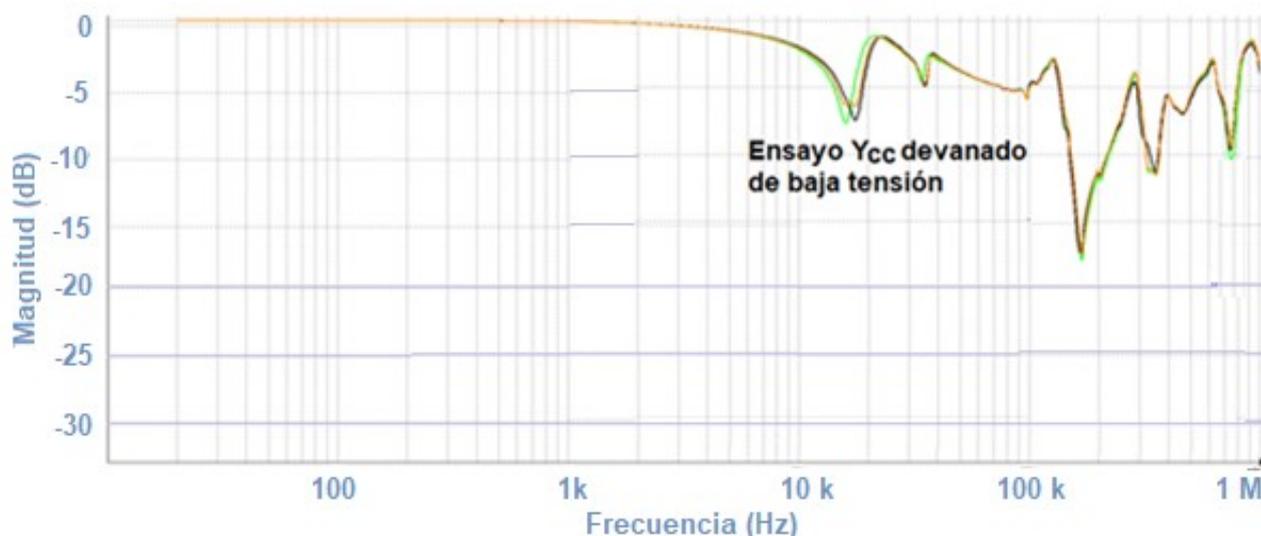


Fig. 4. Curva amplitud - frecuencia de admitancia de cortocircuito en el devanado terciario del autotransformador

Con esta configuración se ensaya la reactancia de dispersión  $X_d$  en las fases del devanado terciario. Como se puede apreciar en la figura 4, en las frecuencias entre 10 Hz y 10 kHz, donde se hace representativa la reactancia de dispersión, las curvas magnitud- frecuencia, muestran que este parámetro no ha sido afectado, aspecto importante que ofrece una idea de que los devanados no han sufrido deformaciones radiales, que son las más propensas a modificar el camino del flujo de dispersión. Las curvas coinciden y las diferencias de magnitud en dB no son superiores a  $\pm 3$  dB, por lo que se puede asegurar que no tampoco deformación axial en esta fase [22,23]. Los resultados obtenidos evidencian que la causa del calentamiento excesivo de la tornillería que une la base con la campana de la cuba, no tiene su causa en la deformación de los devanados terciarios, ya que el flujo de dispersión no ha variado, por lo que debe prestarse atención a un posible problema de falta de puesta a tierra.

### CONCLUSIONES

1. Según los resultados de la medición de admitancia de circuito abierto en la fase b del devanado terciario, existe en esta una deformación obvia.
2. Es necesario realizar una prueba de corriente de excitación y de gases disueltos, para corroborar el defecto detectado en la columna de la fase b.
3. Se comprobó mediante el ensayo de admitancia de cortocircuito, que el defecto de calentamiento excesivo de la tornillería del autotransformador, no se corresponde con una variación de la reactancia de dispersión.
4. Debe investigarse si el defecto de calentamiento excesivo de la tornillería del autotransformador está ligado a un fenómeno de puesta a tierra entre la campana y la base de la cuba.
5. El autotransformador puede continuar en servicio, aunque es necesario efectuar otras pruebas de diagnóstico.

### REFERENCIAS

- [1] Ryder S., "Methods for comparing frequency response analysis measurements," Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.02CH37316), Boston, MA, USA, 2002, p. 187-190, DOI 10.1109/ELINSL.2002.995909. ISBN 0-7803-7337-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/995909>
- [2] Kamal aselvan A., MuthaiahR., "Condition Assessment and Diagnosis of Winding Insulation in Static and Rotating Machines Using Frequency Response Analysis-A Survey". International Journal of Pure and Applied Mathematics. vol. 119, n. 10, 2018, p. 445-462. ISSN 1311-8080 (printed version); ISSN 1314-3395 (on-line version). Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Condition-Assessment-and-Diagnosis-of-Winding-in-A/d0f2bc2ea83c828c25cf9583ad36eac5968b0d80>

- [3] Hernández Areu, O., *et al*, “Diagnosis of faults in power transformers through the interpretation of FRA testing with artificial intelligence,” in 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2018). Ixtapa, Mexico, p. 1–5. ISSN 2573-0770. ISBN 978-1-5386-5935-9. Disponible en: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Diagnosis+of+faults+in+power+transformers+through+the+interpretation+of+FRA+testing+with+artificial+intelligence>. DOI:10.1109/ROPEC.2018.8661467
- [4] Hernández Areu, O., *et al*, “Herramienta para el diagnóstico automático de fallas en transformadores de potencia a través de la respuesta en frecuencia con inteligencia artificial”. XIV Congreso de Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico 2019. Guadalajara, México. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/322071219>
- [5] Alawady A. A., *et al*, “Phase to phase fault detection of 3-phase induction motor using FRA technique”. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). September 2020, vol. 11, n. 3, p. 1241-1248. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds.v11.i3.p.1241-1248. Disponible en: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/20814>
- [6] Al-ameri S., *et al*, "Frequency response analysis for transformer tap changer damage detection," International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), vol. 11, n. 1, p. 350–358, 2020. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp350-358. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/339606594\\_Frequency\\_response\\_analysis\\_for\\_transformer\\_tap\\_changer\\_damage\\_detection](https://www.researchgate.net/publication/339606594_Frequency_response_analysis_for_transformer_tap_changer_damage_detection)
- [7] Yasid N. F. M., *et al*, "Interpretation of sweep frequency response analysis traces on inter-turn short circuit fault," International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), vol. 11, n. 1, p. 309–316, 2020. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds.v11.i1.p.309-316. Disponible en: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/20477>
- [8] Alawady A. A., *et al*, “Frequency response analysis technique for induction motor short circuit faults detection”. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). September 2020, vol. 11, n. 3, p. 1653-1659. ISSN 2088-8694, DOI 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1653-1659. Disponible en: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/20811>
- [9] N. F. M. Yasid, A. A. Alawady, *et al*, "The Effect of short circuit fault in three-phase core-typed transformer," International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). March 2020, vol. 11, n. 1, p. 409-416. ISSN 2088-8694. DOI 10.11591/ijpeds.v11.i1.p.409-416. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/b7ff/df9f0f553440158062fd4d26b92f7a6c144d.pdf>
- [10] Al-ameri S., *et al*, “Application of Frequency Response Analysis Technique to Detect Transformer Tap Changer Faults”. Appl. Sci. 2021, vol. 11, n. 7, e3128. ISSN 2076-3417. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app11073128>
- [11] 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. Disponible en: <https://app.box.com/s/gdnmhmkkoblo622h4v9j2pwvd5xlgvx8>
- [12] Zorrilla J. D., *et al*, “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. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200184>
- [13] Pérez Hernández R., Hernández Areu O., “Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia”. Ingeniería Energética. Enero-abril 2024, vol. 45, n. 1, e2403, Ingeniería Energética. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>
- [14] Elahi O., *et al*, “Diagnosing disk-space variation in distribution power transformer windings using group method of Data Handling Artificial Neural Networks”. Energies 2022, vol. 15, n. 23, e8885. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en15238885>
- [15] Zhenhua L., *et al*, “Fault Diagnosis of Transformer Windings Based on Decision Tree and Fully Connected Neural Network”. Energies 2021, vol. 14, n. 6, e1531. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en14061531>
- [16] Kornatowski E. and Banaszak S., “Frequency response quality index for assessing the mechanical condition of transformer windings”. Energies 2020, vol. 13, n. 1, e29; DOI 10.3390/en13010029. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/29>
- [17] Samimi M.H. and Tenbohlen S, “FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art”. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017, vol. 89, p. 115-125. ISSN 0142-0615. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516316994>
- [18] Behjat V., Mahvi M., “Statistical approach for interpretation of power transformers frequency response analysis results” IET Science, Measurement & Technology. May 2015, vol. 9, n. 3, p. 367 - 375. ISSN 1751-8822. doi:10.1049/iet-smt.2014.0097. Disponible en: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-smt.2014.0097>

- [19] Ryder S., "Diagnosing transformer faults using frequency response analysis," in IEEE Electrical Insulation Magazine, March-April 2003, vol. 19, n. 2, p. 16-22, DOI 10.1109/MEI.2003.1192032. ISSN 0883-7554. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1192032>
- [20] Ryder S., "Methods for comparing frequency response analysis measurements," Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.02CH37316), Boston, MA, USA, 2002, p. 187-190, DOI 10.1109/ELINSL.2002.995909. ISBN 0-7803-7337-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/995909>
- [21] Peñafiel, S., Otero, P., & Pérez, F., "Diagnóstico del Estado de Transformadores de Distribución Mediante el Ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia". Revista Técnica Energía, 2023, vol. 20, n. 1, p. 26–32. ISSN 2602-8492. Disponible en: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.581>
- [22] Pleite G., *et al.*, "Obtención de la respuesta en frecuencia en transformadores estando en servicio". Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 2017, vol. 25, n. 1, p. 59-69. ISSN 0718-3305. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000100059>
- [23] Hernández Areu, O., *et al.*, "Casos de estudio de diagnóstico por SFRA a dos transformadores de potencia de tres devanados". Revista Ingeniería Energética, Mayo/agosto 2022, vol. 43, n. 2, e0706, ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Ramón Pérez Hernández:** <https://orcid.org/0009-0002-7722-5059>

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

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

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.