



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

Grupo de Estudio de Transformadores, Reactores, Materiales y Tecnologías Emergentes – GTM

**LA TÉCNICA DE SFRA Y SU EVALUACIÓN PRÁCTICA – UN ESTUDIO BASADO EN MEDICIONES Y
MODELOS**

**Daniel C. P.
Araujo***
Treetech Sistemas
Digitais Ltda.

UFMG –
Universidade
Federal de Minas
Gerais

**Marcos E. G.
Alves**

Treetech Sistemas
Digitais Ltda.

**José L.
Silvino**

UFMG –
Universidade
Federal de Minas
Gerais

**Peterson de
Resende**

UFMG –
Universidade
Federal de Minas
Gerais

**Breno D.
Rodrigues**

UFMG –
Universidade
Federal de Minas
Gerais

RESUMEN

Cuando un transformador es sometido a corrientes elevadas provocadas por cortocircuito, los esfuerzos electromecánicos internos pueden provocar alteraciones geométricas en los devanados como deformaciones y desplazamientos. Esas deformaciones son perjudiciales, pues disminuyen la capacidad del transformador de soportar cortocircuitos y surtos de tensión, disminuyen su vida útil y precipitan fallas que pueden sacarlo de operación.

Las alteraciones mecánicas en el interior del transformador resultan en un cambio de las inductancias y capacitancias internas.

Utilizando frecuencias variadas para la excitación del transformador es posible acentuar los efectos inductivos y capacitivos y de esa forma mejorar la sensibilidad de las mediciones. Los ensayos de respuesta en frecuencia miden las impedancias terminales y las relaciones de transformación del transformador por medio de una barradura en un rango de frecuencias y obtiene las funciones de transferencia del equipo para el dominio de la frecuencia que son firmas del equipo.

Analizando las firmas del transformador por medio de comparaciones es posible detectar alguna falla debido a deformaciones en el devanado, desplazamiento del núcleo, cortocircuito entre espiras o hasta el envejecimiento de los materiales dieléctricos.

PALABRAS CLAVE: Fallas mecánicas, Respuesta en frecuencia, Barradura de frecuencia, FRA, Función de transferencia, Diagnósticos de transformadores, Impedancia terminal, sFRA, Sistemas especialistas.

1.0 - INTRODUCCIÓN

Cuando un transformador es sometido a corrientes elevadas provocadas por cortocircuito, los esfuerzos electromecánicos internos pueden provocar alteraciones geométricas en los devanados como deformaciones y desplazamientos. Esas deformaciones son perjudiciales, pues disminuyen la capacidad del transformador de soportar cortocircuito y surtos de tensión, disminuyen su vida útil y precipitan fallas que pueden sacarlo de operación (1). Las alteraciones mecánicas en el interior del transformador resultan en un cambio de las inductancias y capacitancias internas.

De entre las técnicas existentes para evaluación del estado operacional de transformadores de potencia, solamente pruebas específicas como el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) son sensibles a problemas más localizados, causados en gran parte por deformación de los devanados debido a estreses mecánicos.

(*) Rua José Alvim, 100 – Centro – Atibaia – São Paulo – Brasil
Email: carrijo@cpdee.ufmg.com.br

Utilizando frecuencias variadas para la excitación del transformador es posible acentuar los efectos inductivos y capacitivos y de esa forma mejorar la sensibilidad de las mediciones. Los ensayos de respuesta en frecuencia miden las impedancias terminales y las relaciones de transformación del transformador por medio de una barradura en un rango de frecuencias y obtiene las funciones de transferencia del equipo para el dominio de la frecuencia que son firmas del equipo. Analizando las firmas del transformador por medio de comparaciones es posible detectar alguna falla debido a deformaciones en el devanado, desplazamiento del núcleo, cortocircuito entre espiras o hasta el envejecimiento de los materiales dieléctricos.

Como formas variantes de la prueba de respuesta en frecuencia, existen las pruebas de tensión-tensión y las mediciones de impedancia terminal. La medición de la relación de transformación para diversas frecuencias puede ser realizada aplicándose una señal senoidal con frecuencia variable dentro de un determinado rango a uno de los devanados del transformador y midiendo la transferencia de esa señal para otro devanado. Ese tipo de medición permite evaluar las amplificaciones (resonancias) y atenuaciones en valores normalizados, indicando la frecuencia donde ocurren.

Las pruebas de medición de impedancia terminal buscan describir la impedancia de cada devanado del transformador conforme varía la frecuencia de la señal senoidal aplicada, obteniendo una curva de módulo y una de fase que representarían una firma del transformador, una imagen de las condiciones constructivas internas en el instante de realización de la prueba, así como ocurre con las pruebas de tensión-tensión.

Inicialmente, las pruebas realizadas utilizaban 2 MHz como frecuencia máxima. Posteriormente, se aumentó la frecuencia máxima de barradura para 10 MHz para que una plena caracterización del transformador fuera hecha en un rango mayor de frecuencias.

2.0 - DEFORMACIONES EN LOS DEVANADOS, NÚCLEO Y FALLAS MECÁNICAS

Las alteraciones geométricas que pueden ser comúnmente observadas en los devanados como consecuencia de los esfuerzos mecánicos descritos anteriormente son las deformaciones radiales, axiales y los desplazamientos. Aunque no causen, en general, directamente una falla que pueda retirar el transformador de operación, tales desplazamientos contribuyen para la degradación de características de proyecto responsables por el funcionamiento seguro en condiciones de régimen.

La deformación axial es un desplazamiento que se manifiesta en el sentido de apartar o comprimir las espiras entre sí, en el mismo sentido del eje del devanado. Puede provocar la torsión de los conductores de las bobinas, lo que degrada el papel aislante en su superficie, además de comprometer los espaciadores y demás elementos de sustentación del devanado, por aplastamiento. La disminución de la rigidez mecánica del conjunto tiene el efecto de permitir el desplazamiento del devanado, vibraciones y fatiga de conexiones, reduciendo la capacidad del transformador en soportar corrientes de cortocircuitos y surtos de tensión. La Figura 1 ilustra cómo se procesa ese tipo de deformación.

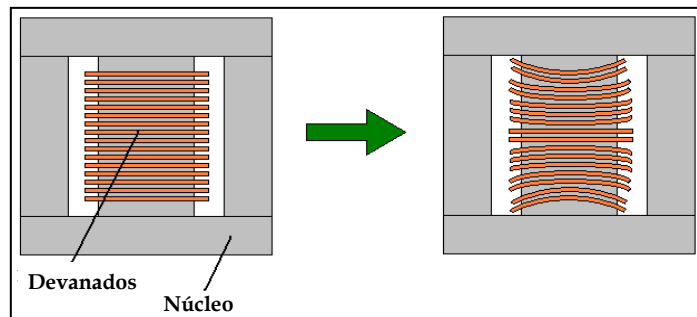


Figura 1 – Esquema de cómo se procesa la deformación axial de un devanado.

La deformación radial es aquella que se procesa en el sentido de apartar los conductores externo e interno de los devanados de alta y baja tensión en la dirección radial. Cuando el transformador es construido con los devanados de alta y baja superpuestos, la tendencia es la compresión del devanado interno en dirección al núcleo y la expansión del devanado externo en dirección al tanque. En ese tipo de deformación, se observa el estiramiento del papel aislante de la superficie de los conductores en función de la distensión, lo que degrada el aislamiento y reduce la soportabilidad a surtos de tensión.

Además, la reducción de la distancia entre el devanado interno y el núcleo reduce los niveles de aislamiento y altera la distribución de campo eléctrico interno, lo que puede aumentar el estrés en puntos específicos del aislamiento. Esa deformación contribuye también para que se aflojen las ataduras, con la disminución de la rigidez mecánica del conjunto y fatiga de conexiones y partes de sustentación. La Figura 2 ilustra cómo se procesa la deformación radial en un devanado.

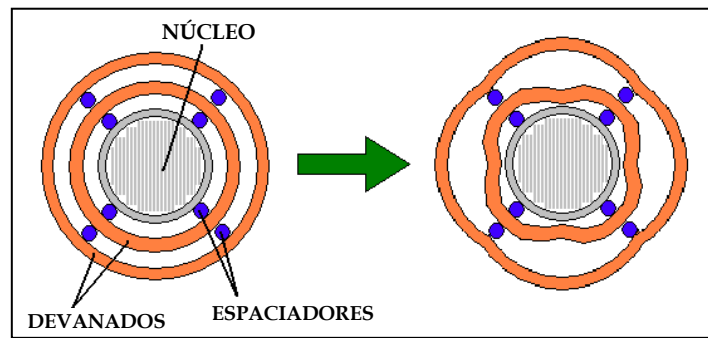


Figura 2: Esquema de una deformación radial en un devanado.

En situaciones donde las estructuras de sustentación y fijación ya están fatigadas lo suficiente, las fuerzas mecánicas a las cuales los devanados están expuestos pueden ser suficientes para provocar el movimiento del conjunto de espiras como un todo, configurando un desplazamiento. En esos casos se observa que el devanado se encuentra fuera de su eje. Las consecuencias de ese tipo de alteración geométrica son las mismas citadas para los otros tipos de desplazamientos, como las reducciones de las distancias mínimas de aislamiento y la generación de vibraciones. La Figura 3 ilustra como un desplazamiento de bobina se procesa.

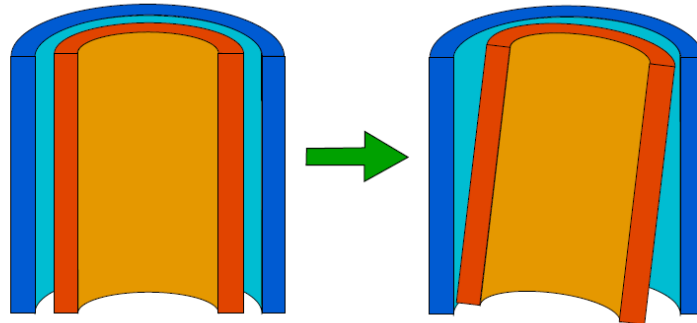


Figura 3 – Diagrama ilustrativo de un desplazamiento de bobina en un transformador de potencia (2).

Además de los desplazamientos de devanados sometidos a las fuerzas mecánicas, se puede observar, con menos frecuencia, los desplazamientos de partes del núcleo magnético. Debido a la alta robustez mecánica, los esfuerzos en general observados sobre el núcleo del transformador como resultado de esfuerzos eléctricos no son capaces de provocar alteraciones visibles. Entretanto, impactos mecánicos en consecuencia del transporte pueden provocar alteraciones en la geometría del núcleo del transformador que pueden traducirse en estreses del aislamiento y estructuras de fijación, permitiendo vibraciones y la reducción de la vida útil del transformador a medida que facilitan otros procesos degenerativos, como los propios desplazamientos de devanados.

El transformador de potencia es proyectado de forma que el conjunto sea capaz de soportar las fuerzas mecánicas provenientes del funcionamiento nominal en seguridad. Aún así, algunos esfuerzos eléctricos en funcionamiento pueden superar el límite máximo de soportabilidad o generar fatiga. De entre tales esfuerzos están, principalmente, las corrientes de cortocircuito y energizaciones. Otro tipo de esfuerzo que puede resultar en un desplazamiento o falla mecánica son los accidentes en el transporte.

Las corrientes de cortocircuito son las principales responsables por desplazamientos mecánicos de origen eléctrico, debido a la alta intensidad de las corrientes involucradas. Como la impedancia de corto puede ser muy baja, la corriente de corto que circula por los devanados del transformador puede alcanzar niveles elevadísimos, de decenas de veces la corriente nominal. Aunque la duración de tales corrientes sea, en general, baja, debido a la actuación de las protecciones del sistema, la alta amplitud de la corriente puede ocasionar la acción de fuerzas magnéticas de alta intensidad y corta duración, lo suficiente para fatigar las estructuras de sustentación, o hasta provocar un desplazamiento en sí.

Además de esas, existen las corrientes de energización, durante operaciones de maniobra, también conocidas como corrientes de *inrush*. Pueden ser generadas en el momento de la energización del transformador cuando la tensión aplicada no está en fase con la tensión inducida, lo que genera la circulación de corrientes elevadas como consecuencia de la saturación del material ferromagnético del núcleo. Tales corrientes tienen duración relativamente corta y su amplitud no ultrapasa, en general, cerca de ocho veces la corriente nominal, pero son responsables por gran parte de la fatiga mecánica del material de sustentación y fijación en virtud de su frecuencia elevada de ocurrencia a lo largo de la vida útil del transformador.

Los impactos mecánicos ocurridos en el transformador durante el transporte son otro tipo de causa de alteraciones mecánicas que pueden ser citadas. Debido a sus dimensiones elevadas y su peso, las dificultades inherentes a su transporte desde la fábrica hasta la subestación pueden someter el transformador a impactos que pueden ser suficientes para desplazar devanados o deformar el núcleo del transformador.

2.1 Caracterización del Transformador en el Dominio de la Frecuencia

La asociación de las capacitancias e inductancias internas del transformador forma una compleja red de impedancias. Esas grandezas (capacitancias e inductancias) son fuertemente dependientes de la geometría del devanado y de las constantes dieléctricas y magnéticas de los materiales usados en la construcción del equipo. La Figura 4 ilustra la identificación de las capacitancias parasitas que surgen de la construcción de los transformadores de potencia.

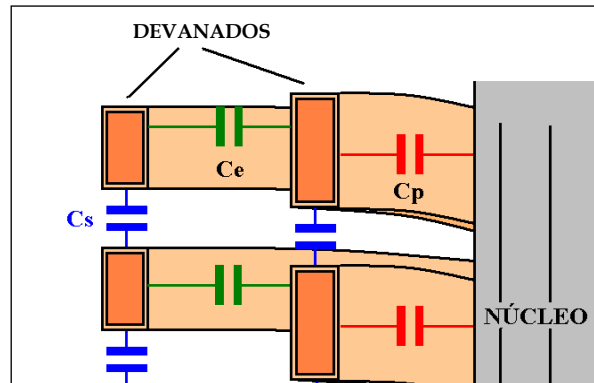


Figura 4 – Diagrama ilustrativo de la distribución de capacitancias internas.

En un largo rango de frecuencias se puede verificar que el comportamiento de la impedancia resultante es típicamente no lineal y que los efectos capacitivos pueden volverse más expresivos que los efectos inductivos en determinadas frecuencias de resonancia. En la Figura 5 se puede observar un comportamiento típico de la impedancia terminal de un devanado de un transformador de potencia a lo largo de un ancho rango de frecuencias.

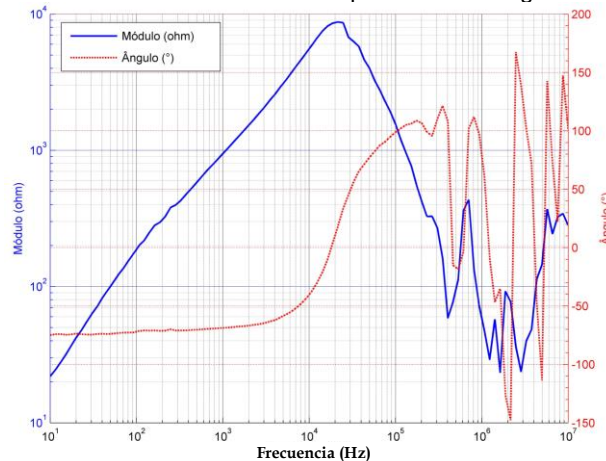


Figura 5 – Curva típica de un ensayo de medición de impedancia terminal.

Ese comportamiento debe ser llevado en consideración en el estudio de fenómenos transitorios y descargas de impulsos atmosféricos que pueden actuar sobre el sistema, pues ellos generan disturbios con tensiones elevadas en anchos rangos de frecuencias. Cuando ocurren fallas mecánicas en el interior del transformador hay una alteración en la geometría de los devanados y consecuentemente una alteración en la distribución de las capacitancias e inductancias internas. Como consecuencia de esas alteraciones, se espera observar también una alteración significativa en las curvas de impedancia terminal y relación de transformación para los devanados del transformador en el dominio de la frecuencia, principio en que se basan los estudios que tienen como objetivo obtener una metodología de diagnóstico de fallas mecánicas en transformadores de potencia vía FRA.

3.0 - ENSAYOS DE DESPLAZAMIENTO DE NÚCLEO

Los ensayos de desplazamiento de núcleo realizados en este ítem buscaron verificar el impacto causado por la variación de la geometría del núcleo del transformador y la sensibilidad de las pruebas de FRA a tales modificaciones. Las alteraciones en la disposición de los devanados (eventualmente oriundas de solicitaciones mecánicas extremas en condiciones de corto) o del núcleo (golpes en el transporte, por ejemplo) pueden iniciar procesos de falla. Al mismo tiempo, tales alteraciones modifican también la distribución de capacitancias parásitos en el transformador y se espera poder reconocer tales modificaciones a través de alteraciones en las curvas de FRA.

El transformador utilizado para los ensayos posee núcleo envuelto, con sus placas expuestas y prensadas. Una primera prueba de desplazamiento de núcleo buscó verificar la sensibilidad del ensayo a través de una alteración sutil: aflojar las placas que prensan el núcleo del transformador, conforme mostrado en la Figura 6 y en la Figura 7, promoviendo un breve alejamiento entre placas consecutivas y la aproximación de las espiras en relación con la masa.



Figura 6 – Proceso de alejamiento de las placas del núcleo del transformador.



Figura 7 – Detalle de las láminas del núcleo.

Se pudo notar, a través de los resultados verificados en la Figura 8 y en la Figura 9, que aunque con una alteración muy sutil en la geometría del núcleo fue posible identificar desvíos en las curvas, con destaque para las curvas de impedancia terminal

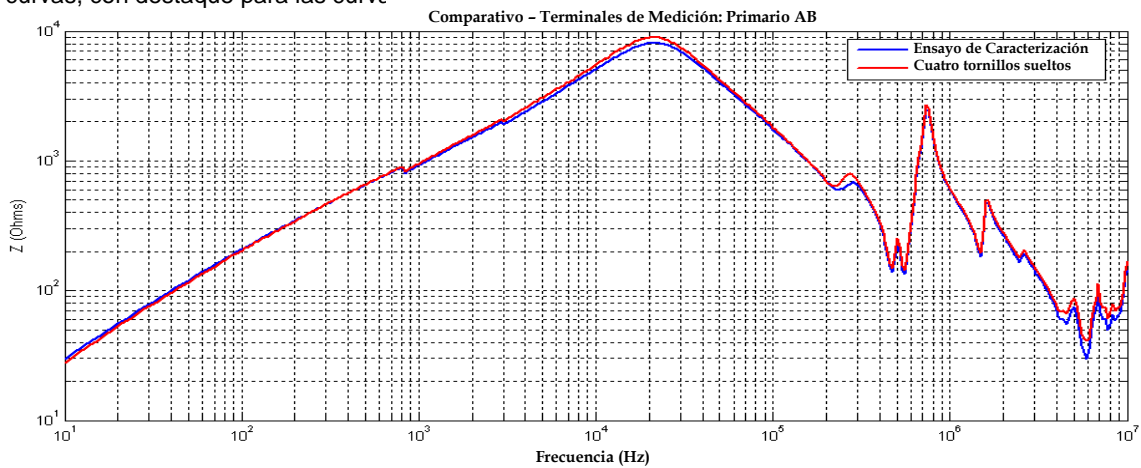


Figura 8 – Resultados de la medición de impedancia terminal sin los tornillos de sustentación de las placas.

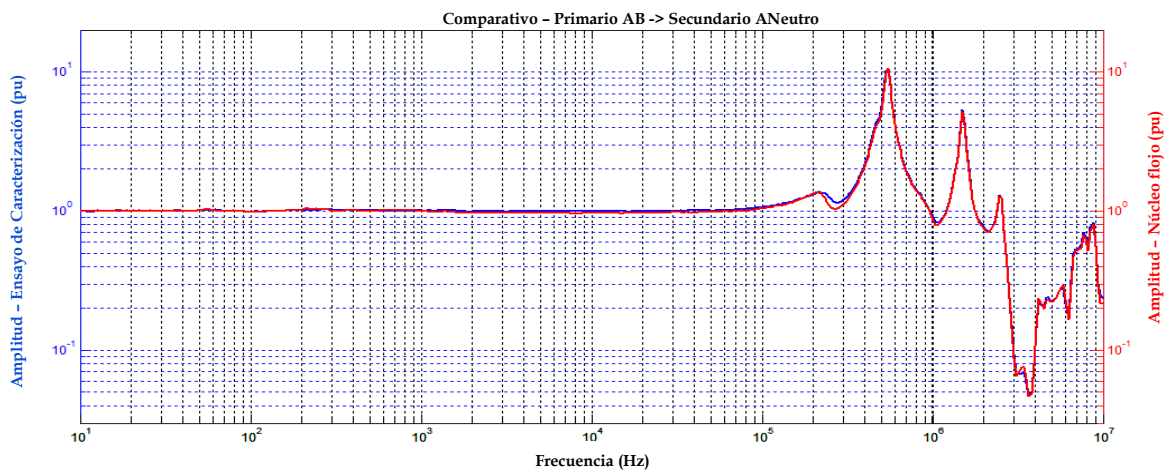
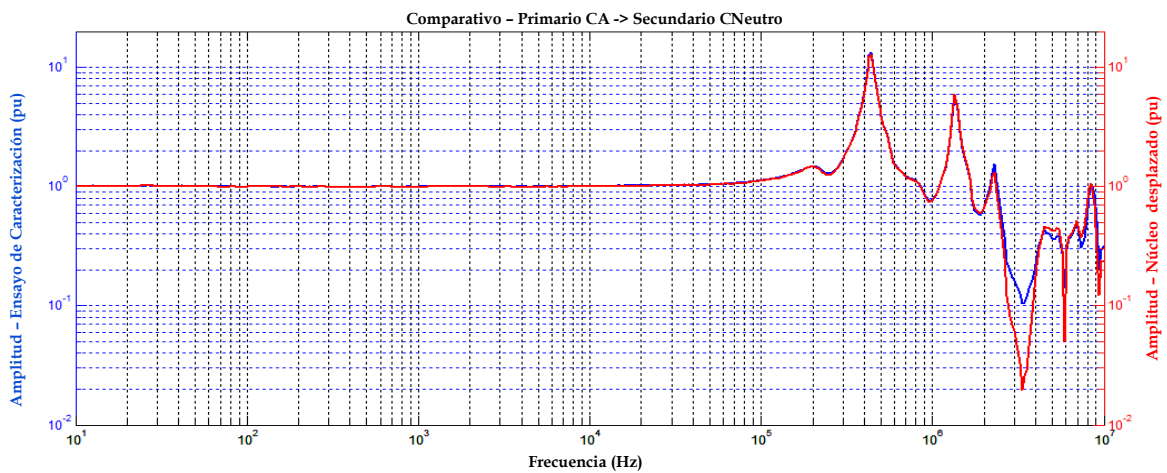
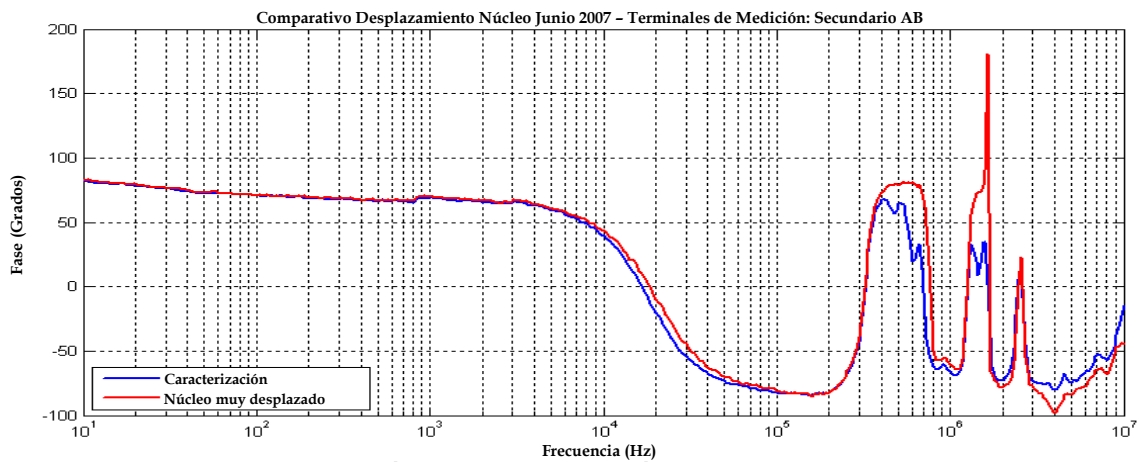
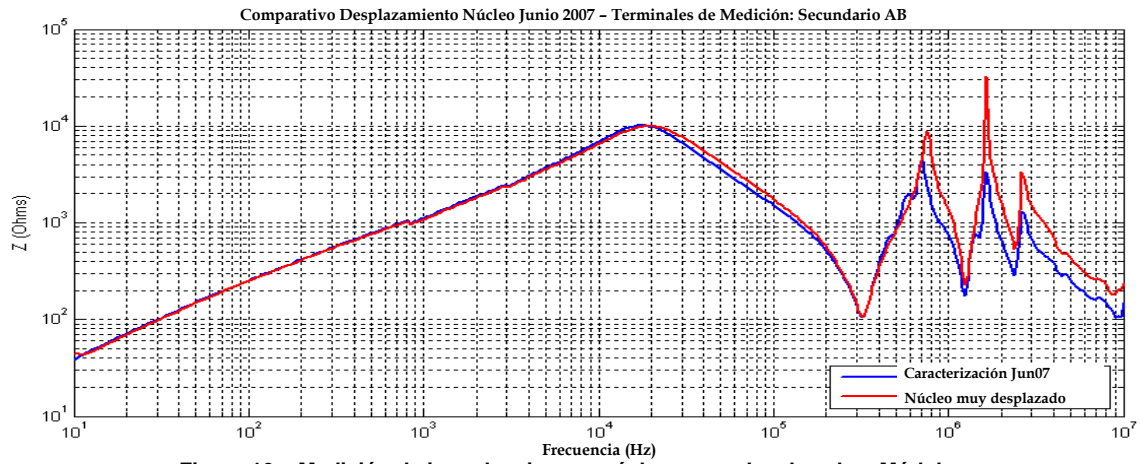


Figura 9 – Resultados de la medición de relación de transformación sin los tornillos de sustentación de las placas. Cuando el desplazamiento impuesto a las placas del núcleo es aún mayor, se nota que el desvío observado en las curvas de FRA es más expresivo, conforme visualizado en la Figura 10, Figura 11 y en la

Figura 12.



Los resultados anteriores sugieren que la metodología de ensayo adoptada es sensible a desplazamientos de núcleo o bobinas, amparada por la excelente repetibilidad alcanzada en los ensayos realizados, una vez que, remontado el transformador con el prensado de las placas, las curvas de FRA vuelven a coincidir con aquellas referentes al estado original antes de la falla (Figura 13). Ese resultado ampara un futuro diagnóstico de falla mecánica con más seguridad.

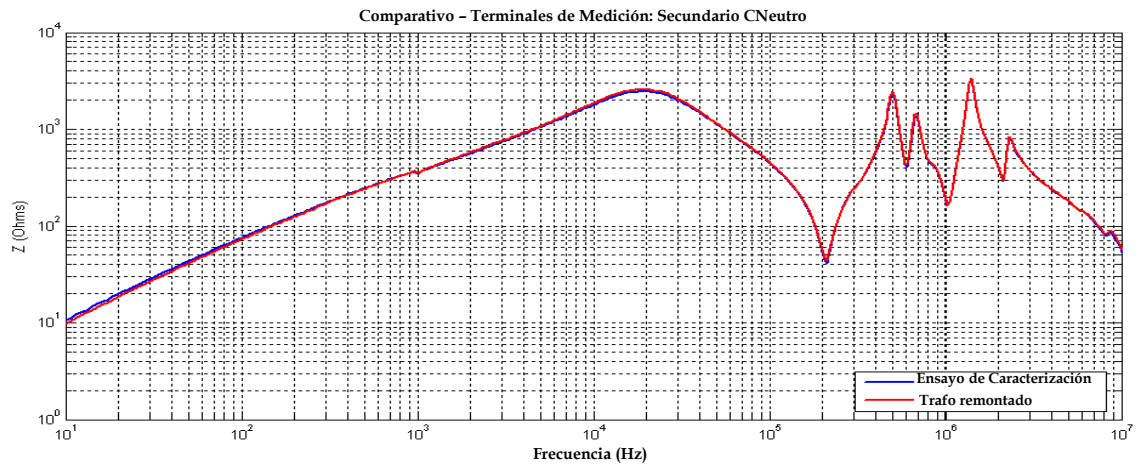


Figura 13 – Resultados de la medición de impedancia terminal con el transformador remontado.

4.0 - CONCLUSIONES

Además de la cuestión de la sensibilidad del ensayo de FRA a las fallas inducidas, se nota que los patrones de falla observados se repiten para el caso estudiado, con mayor o menor intensidad. Tal observación es fundamental para la concretización de una metodología de diagnóstico eficaz vía FRA. Un estudio más amplio, involucrando la creación de un extenso banco de datos con mediciones en transformadores de diversos portes y en condiciones de laboratorio y campo, puede subsidiar la elaboración de una metodología de diagnóstico que, asociada a una metodología de ensayo bien definida, puede ser bastante útil como herramienta. Eso permitiría tener más seguridad en la toma de decisión a medida que vuelve más confiable el diagnóstico obtenido.

5.0 - BIBLIOGRAFÍA

1. **Araujo, Daniel Carrijo Polonio.** *Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaio de Resposta em Freqüência em Transformadores de Potência.* Belo Horizonte: UFMG, 2009. Dissertação de Mestrado.
2. **Aguiar, Ezequiel Rabelo de.** *Análise de Resposta em Freqüência Aplicada em Transformadores de Potência.* Belo Horizonte: UFMG, 2007. Dissertação de Mestrado.