



# Técnica de diagnóstico en transformadores por análisis de la respuesta en la frecuencia. Introducción en Cuba

Orestes Hernández    Alain Cápiro  
Divier R. Remedios    Alexander Fernández

Recibido: Octubre del 2007  
Aprobado: Diciembre del 2007

## Resumen / Abstract

Cada día cobra más importancia en el tema de los transformadores, la necesidad de su diagnóstico y la detección de averías o anomalías que pudieran surgir durante su explotación o ensayos eléctricos. Dentro de los métodos para este tipo de diagnóstico, tienen mucha actualidad los de detección de fallas a través del llamado análisis de la respuesta en la frecuencia (FRA). En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas de Cuba, en la implementación y aplicación de estos métodos con el fin de detectar averías o movimientos en los devanados y circuito magnético de los transformadores, durante la explotación de los mismos o durante los ensayos de cortocircuito dinámico o de impulsos.

Palabras clave: Análisis de respuesta en frecuencia, diagnóstico de transformadores, fallas en transformadores

Every day it gets paid more importance in the topic of the transformers, the necessity of the diagnosis of the same ones and the detection of mishaps or anomalies than they could arise during their exploitation or electric rehearsals. Inside the methods for this diagnosis type, they have a lot of present time those of detection of flaws through the call analysis of the response in the frequency (FRA). In this report the results are presented obtained in the Electroenergetical Research and Test Center of Cuba, in the implementation and application of these methods with the purpose of detecting mishaps or movements in those reeled and magnetic circuit of the transformers, during the exploitation of the same ones or during the rehearsals of dynamic short circuit or impulses.

Key words: Answer analysis in frequency, diagnosis of transformers, flaws in transformers

## INTRODUCCIÓN

El método de FRA consiste en la medición de la relación entre la señal de respuesta de un transformador ante una señal de estímulo para un amplio rango de frecuencias y la comparación de los resultados con mediciones de referencia.

Existen dos formas de inyectar el rango de frecuencia necesario, una es inyectando un impulso al devanado

y la otra es haciendo un barrido de frecuencia usando una señal sinusoidal.

La primera variante es algunas veces conocida como método de respuesta a impulso y la segunda como método de barrido de frecuencia (SFRA).

Se puede decir que la principal ventaja del método de respuesta a impulso sobre el método de barrido de

frecuencia es un menor tiempo de medición, aunque es necesario aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT), para llevar los resultados al dominio de la frecuencia.

Las principales ventajas del método de barrido de frecuencia sobre el método de respuesta a impulso son las siguientes:

- Mejor señal con respecto a la relación de ruido.
- Igual o casi igual exactitud y precisión en todo el rango de medición.
- No hay necesidad de aplicación de la FFT.

Estos métodos se basan en asumir que cualquier deformación mecánica puede asociarse con un cambio en el circuito equivalente capacitivo - inductivo y por consiguiente perceptible a través de una función de transformación.

En este artículo, se presentan los primeros resultados obtenidos en Cuba para la introducción del método de diagnóstico de transformadores a partir de su respuesta en el dominio de la frecuencia, utilizando el barrido de frecuencias.

Los primeros pasos para la aplicación de este método de diagnóstico, se están llevando a cabo con equipamiento propio existente en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae) y no a partir del equipamiento que para este fin se comercializa.

#### APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SFRA

La primera tarea que se abordó fue reunir lo que se podría llamar una especie de analizador de redes con las siguientes funciones:

1. Un generador de la señal que se va a inyectar.
2. Un detector de al menos dos canales que digitalice las señales.
3. Una computadora con software capaz de procesar las mediciones y calcular la relación entre las magnitudes de entrada y salida, las diferencias de fase entre estas y plotear los resultados en función de la frecuencia.

En este método, el generador debe proporcionar una onda sinusoidal cuya frecuencia pueda ser programada desde unos pocos herzt hasta 20 MHz. En este proyecto se emplea un generador de señales que tiene las siguientes características:

- Tensión de salida: 0 - 15 V.
- 130 VA de potencia de salida.
- 0 - 200 kHz con variaciones continuas.

En el trabajo se presentan criterios y técnicas de evaluación y simulación de digitalizadores a ser usados en pruebas de impulso.<sup>1-3</sup> Se recomienda el uso de un digitalizador de al menos 10 bits de resolución y una frecuencia de muestreo mayor a 30 MHz, pero para la implementación final de este sistema, se dispuso de un osciloscopio Tektronix TDS 210, cuyas características son: 8 bits de resolución, 60 MHz, tasa máxima de muestreo de 1GS/s y capacidad de 2 500 muestras por canal, que para esta aplicación, demostró satisfacer todas las exigencias.

La prueba consiste en inyectar varias señales sinusoidales de tensión, secuencialmente, a distintas frecuencias, entre un terminal del transformador (terminal de entrada) y el tanque puesto a tierra y recibir su respuesta con respecto a tierra, por otro terminal (terminal de salida), midiendo la relación entre las amplitudes de la señal de tensión del terminal de salida ( $V_o$ ) y la señal de tensión del terminal de entrada ( $V_i$ ) y sus correspondientes diferencias de fase.

El barrido aplicado debe mantener el mismo nivel de tensión para cada frecuencia analizada, de tal manera que se obtengan resultados reproducibles. Por tanto, la misma precisión de las mediciones debe obtenerse en el laboratorio y en el campo.

En este método, que esencialmente es por comparación, resulta útil tener datos de referencia: En particular sería aconsejable tener las pruebas de referencia del transformador nuevo y comparar las mediciones en las diferentes fases de la vida de la máquina.

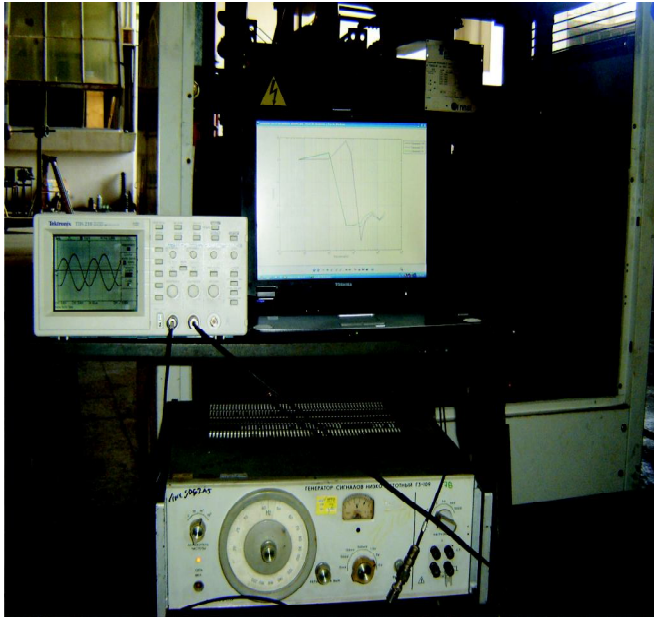
#### CIRCUITO DE MEDICIÓN

Se utilizan tres cables coaxiales para minimizar los efectos de reflexión de ondas, estos cables deben tener igual impedancia y la longitud adecuada para conectar el analizador de redes a los terminales del transformador a prueba. Uno de estos cables es utilizado para llevar la señal entre el terminal de entrada del transformador y la tierra del esquema, otros dos cables son usados para censar la señal de tensión entre el propio terminal de entrada y tierra, y el tercero, para censar la señal de tensión de salida entre el terminal de salida del transformador y tierra.

Debe conectarse una resistencia atenuadora de 1 k  $\Omega$  entre cada terminal que no se esté usando y el tanque del transformador para ayudar a atenuar las oscilaciones de los devanados no excitados y para minimizar las capacitancias parásitas de los bushings.

Como protección a las señales de las líneas y la interferencia externa de frecuencia de potencia en el campo, la alimentación de todo el sistema debe realizarse a través de un transformador de aislamiento, apantallado. Todos los chasis de los instrumentos, el shield de los cables y la pantalla del transformador de aislamiento deben ser conectados a la tierra del tanque del transformador a prueba.

La figura 1 muestra el equipamiento empleado.



**Equipos de medición.**

**1**

## PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES

Las mediciones realizadas para cada frecuencia, son registradas por el osciloscopio en el dominio del tiempo y digitalizadas automáticamente, de aquí se pasan a un computador con un software que toma todos los puntos de las curvas de los oscilogramas y obtiene de cada uno su raíz media cuadrática. Posteriormente obtiene la relación del valor efectivo de la señal de salida con respecto al valor efectivo de la señal de entrada.

Para presentar los resultados, se utilizan diferentes métodos. Se puede mostrar la relación simple de las magnitudes de salida y entrada ( $V_o/V_i$ ) o se puede amplificar este resultado expresando esta relación en decibels o como la mayoría de los autores llaman: La forma módulo-argumento.

El módulo es definido como:

$$K = 20 \log_{10} (V_o / V_i), \quad \text{dB} \quad \dots(1)$$

El módulo es también llamado amplitud, relación de voltajes o ganancia de voltajes.

Usando otra vez la misma notación de la figura 1, el argumento, usualmente llamado fase, es definido por:

$$\phi = \angle (V_o / V_i) \quad \dots(2)$$

Los resultados son usualmente presentados en un gráfico de amplitud y fase contra frecuencia. El gráfico fase-frecuencia no contiene tanta información útil como el gráfico amplitud-frecuencia, por lo que comúnmente no es plotado o analizado.<sup>4</sup>

En los gráficos es posible utilizar escala lineal o logarítmica. La escala logarítmica tiene la ventaja de permitir que toda la información sea presentada en un solo gráfico, con escala lineal es frecuentemente necesario usar gráficos separados para cada década examinada.

Un observador experimentado debe examinar las dos curvas para obtener cualquier diferencia significativa.

Usualmente, se entiende por diferencias significativas las siguientes:

- Cambio en la forma de onda de la curva.
- Creación de nuevas frecuencias de resonancia.
- Eliminación de alguna frecuencia de resonancia existente.
- Desplazamientos de las frecuencias de resonancias existentes.

El principal problema con este método de comparación es que la opinión del experto puede ser subjetiva.

Una alternativa es calcular indicadores estadísticos de la cantidad de coincidencias o no coincidencias entre los dos grupos de mediciones. Esto extrae información de los resultados en todo el rango de frecuencias y es fácilmente aplicable mediante la computación, los métodos más usados son el coeficiente de correlación y la desviación espectral.

## Coeficiente de correlación

La definición matemática del coeficiente de correlación es la siguiente:<sup>4,5</sup>

Si se tiene dos grupos de  $n$  números,  $X \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  y  $Y \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ . El coeficiente de correlación entre estos dos grupos de números es definido por:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}}$$

El coeficiente de correlación se utiliza para evaluar la diferencia entre dos trazas de FRA, representa cuán relacionadas están dos mediciones entre sí. Es una herramienta para cuantificar las diferencias entre dos trazas, de forma numérica y no subjetiva. Se puede calcular para toda la traza de frecuencia obtenida o por décadas, siendo X y Y las magnitudes de entrada y salida y n el número de pares de valores que se muestrean.

Para la mayoría de los devanados, los coeficientes de correlación entre los resultados de un transformador sano, son muy cercanos a la unidad desde 1 kHz hasta 1 MHz. Algunos autores consideran que un coeficiente de correlación de menos de 0,995 0 en este rango de frecuencias, entre mediciones de un mismo devanado, merece investigaciones adicionales.<sup>4</sup>

#### Desviación espectral

La desviación espectral<sup>5</sup> se utiliza para comparar la diferencia de dos mediciones con su media. Representa la distancia promedio de varias señales a la media entre ellas. Es un valor expresado de forma porcentual de manera que mientras más cercano está a cero indica una mejor relación entre las trazas. Entre dos señales se calcula según la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left( \frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right)^2 + \left( \frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right)^2}$$

En la referencia 5 se compara el coeficiente de correlación con la desviación espectral y se demuestra que el coeficiente de correlación es el que presenta mejores resultados.

#### MÉTODOS DE COMPARACIÓN

La comparación de resultados es usualmente hecha ploteando un gráfico de amplitud contra frecuencia para dos grupos de mediciones.

Resulta más conveniente realizar la comparación, utilizando mediciones hechas anteriormente en el mismo devanado. Cuando es apropiado, ambos grupos de mediciones deben ser realizadas en la misma posición del cambiador de derivaciones y con los mismos accesorios, tales como aisladores, etcétera.

Si el transformador es en aceite, debe tener la misma permitividad relativa que tenía previamente.

La permitividad relativa es influenciada por el tipo de

aceite, la humedad relativa (que a su vez es una función de la temperatura y de la humedad absoluta) y el envejecimiento normal.

#### Comparación entre fases de un mismo transformador

Si se sospecha que el aceite ha sido cambiado después de las mediciones previas o que hay cambios significativos en la humedad relativa, entonces deben tomarse precauciones y puede ser prudente hacer comparaciones entre fases que complementen a las comparaciones con las mediciones anteriores.

La comparación entre fases es posible en un transformador trifásico. No obstante, debido a las diferencias en las inductancias de magnetización entre las tres fases, puede haber diferencias entre los resultados del FRA a bajas frecuencias. A medias y altas frecuencias, los resultados usualmente coinciden bastante, aunque no tanto como los resultados obtenidos en el mismo devanado.

Para algunos diseños las coincidencias entre devanados no son tan buenas, debido a diferencias en las configuraciones de los terminales o en los espacios exteriores de los devanados.

#### Comparación entre transformadores gemelos

Esto puede ser particularmente útil en transformadores monofásicos de un banco trifásico. Aquí pueden existir grandes diferencias en los resultados a baja frecuencia, pero a frecuencias más altas los resultados tienden a coincidir muy bien, aunque no tanto como los resultados obtenidos en el mismo devanado.

#### FORMAS DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO

##### Forma de ejecución del SFRA desarrollado en Hydro Toronto<sup>6</sup>

Según los autores E.P. Dick y C.C. Erven se deben agrupar aquellos resultados que se esperan que sean similares por la simetría en las fases del transformador y comparar las respuestas entre las propias fases del equipo, buscando alteraciones que denoten algún problema. De esta forma, proponen:

- Los ensayos realizados inyectando la señal por algún terminal del devanado de AT y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (H-H), enfatizan los efectos producidos por los extremos de los devanados de AT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por algún terminal del devanado de BT y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (X-X), enfatizan los efectos producidos por los extremos de los devanados de BT.
- Los ensayos realizados inyectando la señal por el terminal neutro de un devanado de AT en Y, y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado (H<sub>0</sub>-H), enfatizan los efectos producidos por el interior del propio devanado de AT.

-Los ensayos realizados inyectando la señal por el terminal neutro de un devanado de BT en Y, y obteniendo la respuesta en otro terminal del propio devanado ( $X_0-X$ ), enfatizan los efectos producidos por el interior del propio devanado de BT.

-Los ensayos realizados inyectando la señal por el terminal neutro de un devanado de AT en Y, y obteniendo la respuesta en otro terminal del devanado de BT ( $H_0-X$ ), enfatizan los efectos producidos por el acoplamiento capacitivo entre los devanados de AT y BT.

-Los ensayos realizados inyectando la señal por un terminal del devanado de AT y obteniendo la respuesta por el terminal neutro del devanado de BT en Y ( $H-X_0$ ), enfatizan también, los efectos producidos por el acoplamiento capacitivo entre los devanados de AT y BT.

-Los ensayos realizados inyectando la señal por un terminal del devanado de AT y obteniendo la respuesta por un terminal del devanado de BT ( $H-X$ ), enfatizan también, los efectos producidos por el acoplamiento capacitivo entre los devanados de AT y BT.

### Forma de ejecución del SFRA desarrollado en ABB de Italia<sup>7</sup>

Según los autores M. de Nigris y R. Passaglia, la prueba se realiza considerando dos configuraciones para el devanado que no se está probando:

a) Devanado abierto y flotando. Con esta configuración, puede apreciarse el efecto del acoplamiento mutuo entre las bobinas de AT y la de BT y el efecto del circuito magnético.

b) Devanado en cortocircuito. Con esta configuración, los efectos del acoplamiento mutuo y del circuito magnético no son apreciables y solo será visto el efecto del devanado que se está probando.

### DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Para que una falla sea detectable, debe causar un cambio significativo en la inductancia o capacitancia de una parte del devanado. Las fallas que no causan tales variaciones (las descargas parciales por ejemplo) no son detectables. Estas fallas pudieran convertirse en detectables si se hacen suficientemente severas para causar daños secundarios detectables (espiras en cortocircuito, daño severo local en los devanados, etcétera).

Las fallas que causan variaciones en las respuestas a bajas frecuencias, pueden ser fácilmente detectadas usando otros medios:

-Espiras en cortocircuito, mediante la medición de la corriente de magnetización o de la relación de transformación.

-Corrientes circulantes, mediante el análisis de gases disueltos (DGA) o por termografía infrarroja.

-Núcleo sin tierra, mediante la medición de la capacitancia.

Las fallas que causan variaciones en las respuestas a medias y altas frecuencias, son difícilmente detectadas usando otros medios, porque las mediciones de relación de transformación, capacitancias e impedancia de dispersión son efectivas en un caso y en otros no.

### Fallas detectables a bajas frecuencias (menos de 10 kHz)

La respuesta en baja frecuencia está típicamente caracterizada por un decrecimiento de la amplitud que alcanza un mínimo en resonancia a una frecuencia igual o menor a 1 kHz. Esta resonancia es causada por la interacción de la capacitancia paralela del devanado con la inductancia de magnetización. Si en el núcleo existen dos rutas de flujos de diferentes longitudes entonces puede ocurrir una doble resonancia.

La primera frecuencia de resonancia puede variar con el estado del magnetismo remanente del núcleo. Esto puede también diferir en transformadores gemelos, donde las diferencias de fabricación de las uniones de los núcleos pueden arrojar reluctancias distintas.

Las fallas, tales como espiras cortocircuitadas, cambian la característica de magnetización del transformador y de esta forma, la respuesta de baja frecuencia.

Los lazos de corrientes circulantes, si son suficientemente grandes, reorientan el flujo de dispersión dentro del núcleo y también cambian la respuesta a baja frecuencia.

Un núcleo no aterrado, cambia la capacitancia paralela del devanado más cercano al núcleo y también la respuesta a baja frecuencia.

Es decir, que a frecuencias menores a 10 kHz, se evidencian los fenómenos relacionados con el núcleo y los circuitos magnéticos del transformador. El análisis en este rango debe tener en cuenta que el magnetismo residual puede modificar ligeramente, la respuesta obtenida de un ensayo a otro. En esta frecuencia, se pueden apreciar, fallas de bobinas, devanados abiertos y problemas en el circuito magnético.

### Fallas detectables a frecuencias medias (10 kHz a 500 kHz)

Para frecuencias medias existe un grupo de resonancias, correspondientes a la interacción de las capacitancias paralelas y las inductancias aire-núcleo de los devanados. Estas son, generalmente, las más repetitivas. Pueden existir ligeras diferencias entre transformadores gemelos, debidas a las diferencias de fabricación de los devanados. Diferencias más significativas pueden ser encontradas entre devanados

de diferentes fases en transformadores trifásicos, debidas a diferentes configuraciones de los terminales o espacios externos entre devanados.

La respuesta a las frecuencias medias es sensible a las fallas que causan cambios en las propiedades del devanado completo.

### Movimiento axial

Un desplazamiento con aumento de las frecuencias de resonancia a las frecuencias medias, normalmente indica movimiento axial. También a frecuencias mayores a 200 kHz, se evidencia movimiento axial con la creación de nuevas resonancias.

### Deformación radial

Entre 10 kHz y 500 kHz, se aprecian fenómenos relacionados con el movimiento radial entre los devanados.

Un desplazamiento en disminución de las frecuencias de resonancia a las frecuencias medias, normalmente indica deformación radial del devanado más interno.

### Fallas detectables a altas frecuencias (más de 500 kHz)

La respuesta a las frecuencias altas es sensible a fallas que ocasionan cambios en las propiedades de partes del devanado.

Daños localizados en el devanado causan cambios aleatorios en la respuesta a las frecuencias altas, comúnmente llevan a la creación de nuevas frecuencias de resonancia. La respuesta a las frecuencias altas, puede también ser afectada por el aterramiento del tanque. Un mal aterramiento del tanque es fácil de detectar, debido a que afecta a todos los devanados.

A altas frecuencias hay un grupo de resonancias más confusas, correspondientes a la interacción de las capacitancias paralelas y series, y las inductancias aire-núcleo de partes de los devanados.

La respuesta a las altas frecuencias es afectada por las diferencias de fabricación, configuración de los terminales y espacios externos entre devanados en mayor medida que la respuesta a las frecuencias medias. A las más altas frecuencias, la influencia de los cables de medición se hace importante, especialmente en grandes transformadores.

El aterramiento del transformador y las pantallas de los cables pueden tener también una influencia

importante. El límite superior de rango reproducible es probablemente al menos 1 MHz, para transformadores pequeños el rango puede ser mayor.

## PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

### Caso de estudio 1

Los resultados de este caso, fueron obtenidos a partir de un transformador fabricado en el año 2002 por la firma France Transfo, trifásico grupo de conexión  $\Delta$ -Yn-1, tipo núcleo. Sus parámetros nominales son:

Potencia nominal: 315 kVA.

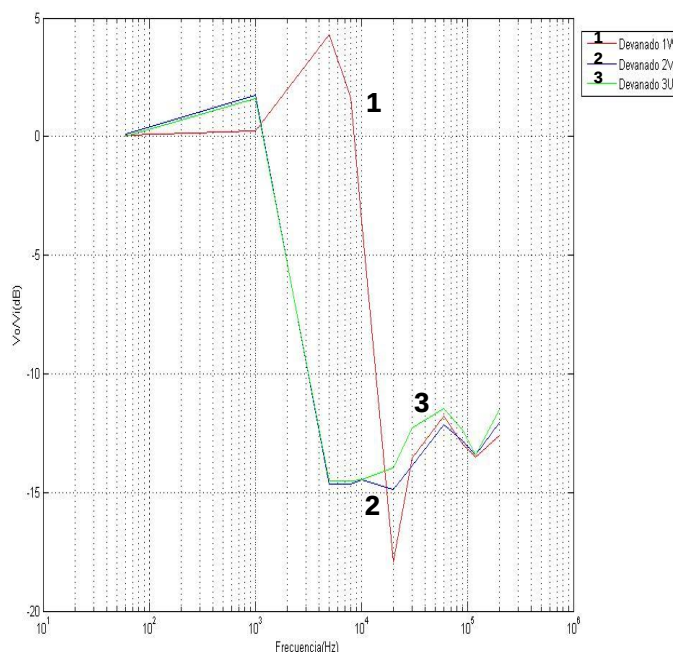
Frecuencia nominal: 60 Hz.

Tensiones nominales: 13 800 / 216 V.

El equipo se encontraba dando servicio en la red soterrada de La Habana cuando sufrió una avería.

Las comparaciones de los resultados de FRA, se realizaron entre fases por no contar con registros anteriores.

En la figura 2 puede observarse que la respuesta en frecuencia que corresponde para la fase 1W, se desvía substancialmente de las respuestas de las otras dos fases, sobre todo, para las frecuencias entre 1 kHz y 20 kHz. La respuesta a frecuencias más altas no se afecta substancialmente, lo que excluye la posibilidad de deformaciones geométricas del devanado. Tales desviaciones grandes en frecuencias bajas, están relacionadas con una variación de la relación de transformación de la fase, posiblemente debido a un cortocircuito entre espiras del enrollado y/o a la apertura de alguna parte del propio devanado, afectando el acoplamiento magnético.



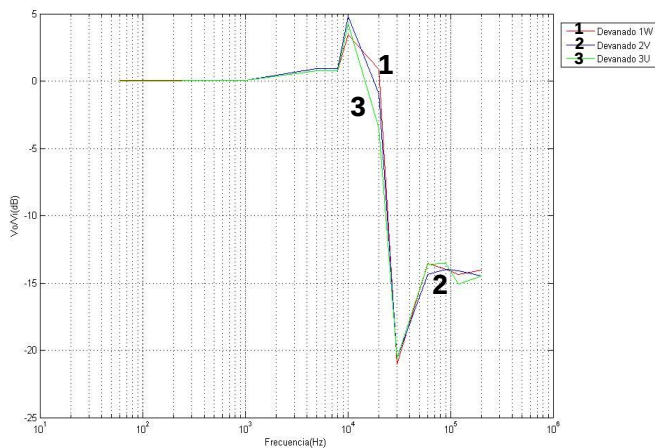
**Prueba por el devanado de alta tensión con el secundario abierto. Fase 1W (1) fallada.**



En la figura 3, para bajas frecuencias, las desviaciones son menores, debido a que con el devanado de BT en cortocircuito, el acoplamiento inductivo se afecta mucho y la sensibilidad para las frecuencias bajas se reduce.

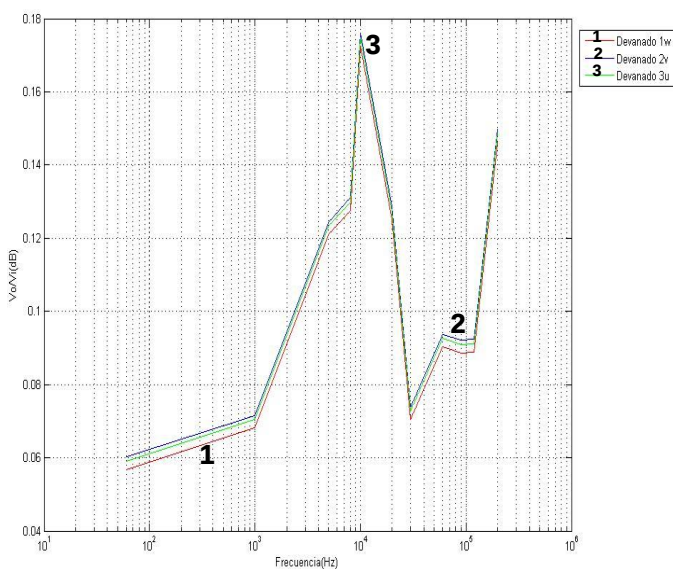
Las formas de ondas de las respuestas en las figuras 4 y 5, confirman que la avería solo se verifica en la fase 1W. Ambos ensayos arrojaron una perfecta superposición de todas las ondas, corroborando la idea de un problema en el devanado de AT.

Después del ensayo de SFRA, se llevó a cabo una serie de pruebas tradicionales; medición de relación de transformación, resistencia de los devanados, todas las pruebas confirmaron la hipótesis.



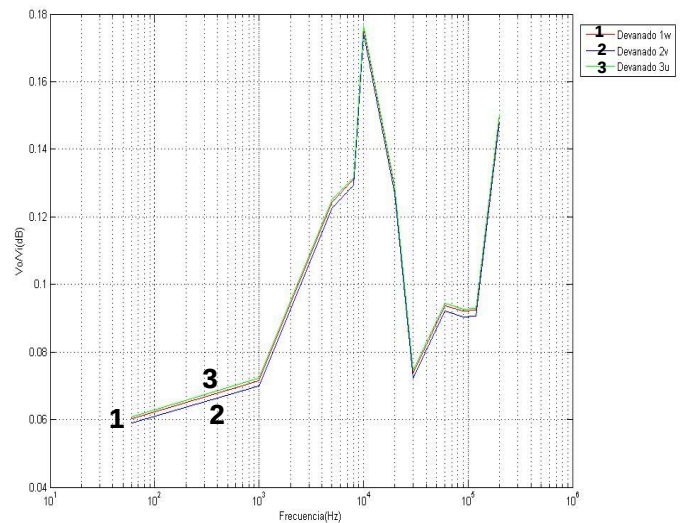
**Prueba por el devanado de alta tensión con el secundario en cortocircuito. Fase 1W (1) fallada.**

3



**Prueba por el devanado de baja tensión con el primario abierto. Fase 1W (1) fallada.**

4



**Prueba por el devanado de baja tensión con el primario en cortocircuito. Fase 1W (1) fallada.**

5

Se abrió el equipo y se comprobó a simple vista que el transformador tiene evidencias de un fallo en una de las fases (específicamente en una de los extremos, la W) con daño externo en los terminales de toma de señales de los transductores de esa fase. Los elementos de soporte superiores del devanado primario de la fase dañada y de la fase adyacente, están calcinados como evidencia de haber estado expuestos a altas temperaturas.

Se aprecia que el transformador estuvo expuesto a un cortocircuito monofásico y que además, el tiempo de exposición que tuvo el equipo a esta contingencia fue excesivo. El devanado de AT de la fase W estuvo a punto de abrirse pues al medir su resistencia, arrojó un valor 100 veces mayor al de los otros devanados. No se apreció deformación mecánica en los enrollados.

### Caso de estudio 2

El segundo caso se obtuvo a partir de un transformador marca Tesar, trifásico, grupo de conexión  $\Delta$ -Yn-11, tipo núcleo, seco, encapsulado en resina que tiene dañado el aislamiento secundario y va a ser reenrollado para otra aplicación. Sus parámetros nominales originales son:

Potencia nominal: 750 kVA.

Frecuencia nominal: 60 Hz.

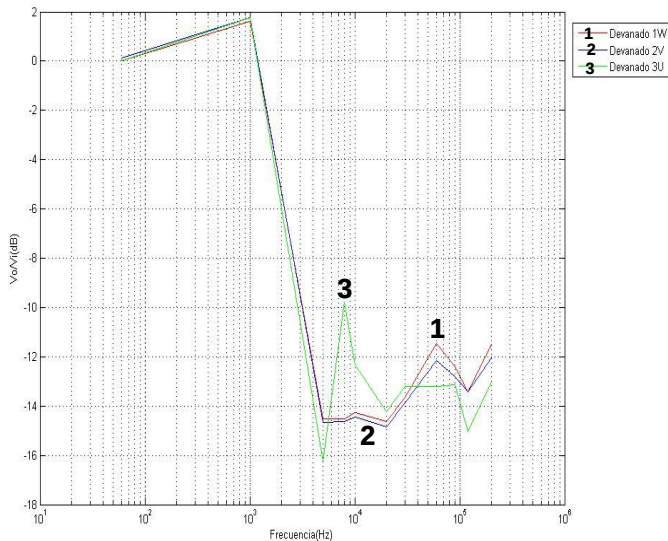
Tensiones nominales: 13 800 / 480 V.

A este equipo se le pudo simular un movimiento radial de uno de sus devanados de alta tensión, retirándose los apoyos superiores de la bobina y pegándola al devanado de baja tensión.

Aquí también se realizaron las comparaciones de los FRA con las otras fases del transformador.

Las diferencias en las formas de ondas están relacionadas con las variaciones geométricas en la estructura interior de la máquina, causando una variación en las capacitancias de acoplamiento longitudinal y transversal del transformador.

Los valores más notables de diferencias son apreciados en la figura 6, para las frecuencias de 5 kHz y 8 kHz, donde aparecen resonancias que no existen en los otros devanados.



**Prueba por alta tensión con el devanado secundario abierto. Fase 3U (3) fallada.**

6

Después en los 50 kHz, desaparece una resonancia que existía.

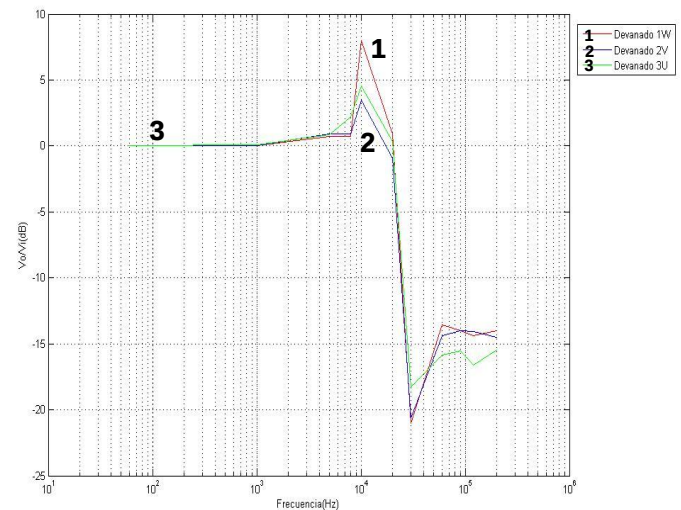
En la figura 7, alrededor de los 140 kHz aparece una resonancia que no existía.

### Caso de estudio 3

En este caso se empleó el mismo transformador anterior pero ahora se le practicó un orificio en la bobina de alta tensión de la fase 2V para llegar a sus conductores y provocar la ruptura de uno de estos.

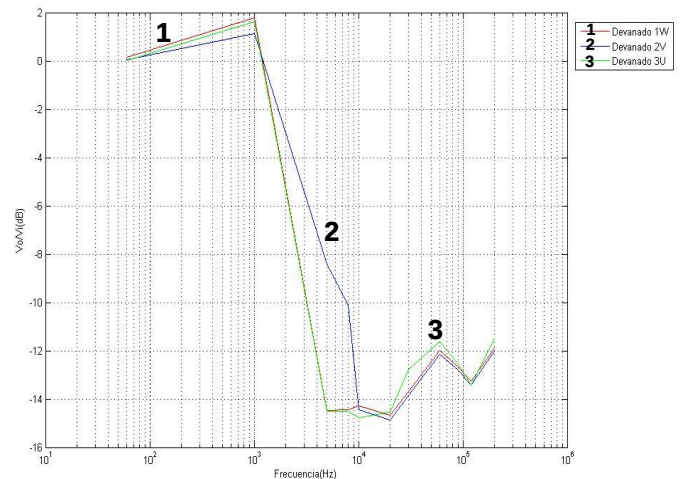
En las figuras 8 y 9 pueden verse que las respuestas de frecuencia que corresponden para la fase 2V, se desvían substancialmente de las respuestas de las otras dos fases, entre 2 kHz y 20 kHz, a partir de esta frecuencia hay coincidencia en el espectro.

Tales desviaciones grandes en frecuencias bajas, están relacionadas con una variación de la relación de transformación de la fase, es decir, debido a la apertura del propio devanado, afectando el acoplamiento magnético.



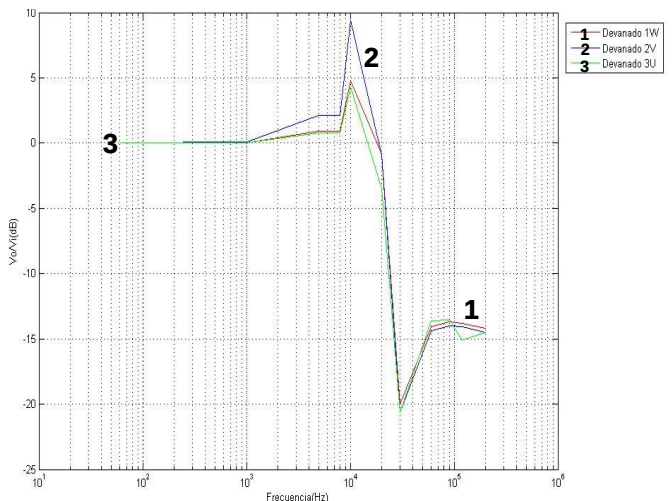
**Prueba por alta tensión con el devanado secundario en cortocircuito. Fase 3U (3) fallada.**

7



**Prueba por alta tensión con el devanado secundario abierto. Fase 2V (2) fallada.**

8



**Prueba por alta tensión con el devanado secundario cortocircuitado. Fase 2V (2) fallada.**

9



La respuesta a frecuencias más altas no se afecta prácticamente, lo que excluye la posibilidad de deformaciones geométricas del devanado.

## CONCLUSIONES

Este artículo muestra los resultados preliminares de la introducción de esta técnica de diagnóstico en Cuba.

Resta un período experimental importante para poder generalizar los resultados y comprobar su repetitividad.

Ya en estos momentos, la sensibilidad del método ha podido ser confirmada.

La disponibilidad de oscilogramas de referencia para un tipo dado de construcción sería ideal, aunque se pueden utilizar como registros de referencia los de equipos gemelos o los de las otras fases del mismo transformador.

El análisis de las variaciones de los espectros puede hacerse visualmente o mediante métodos matemáticos. Hay autores que plantean que las variaciones de amplitudes superiores a 5 dB en los rangos específicos de frecuencia, podrían indicar la presencia de defectos críticos en la máquina, aunque los resultados también pueden emitirse usando indicadores estadísticos como el coeficiente de correlación.

## REFERENCIAS

- 1. McComb, I. R.; J. Kuffel; R. Malewski and K. Shon:** "Qualifying An Impulse Test Digitizer for Measurement in HV Impulse Test", IEEE Transactions on, Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1256-1265, July, 1990.
- 2. Kuffel, J.; R. Malewski and R. V. Heeswijk.** "Modelling of the Dynamic Performance of Transient Recorders Used for High Voltage Impulse Tests", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 507-515, April, 1991.
- 3. Hällström, J. and J. M-L. Pykälä:** "Evaluation of Power Transformer Transfer Function from Impulse Test Records," Nordic Insulation Symposium, Tampere, pp. 11-13, June, 2003.
- 4. Ryder, S.A.:** "Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 2, pp. 15-22, March/April, 2003.
- 5. Ryder, S.:** "Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements," Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7- 10, 2002.
- 6. Dick, E. P. and C.C. Erven:** "Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis", IEEE

Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 97, pp. 2144-2153, Nov.-Dic., 1978.

**7. De Nigris, M.; R. Passaglia; R. Berti; L. Bergonzi and R. Maggi:** "Application of Modern Techniques for the Condition Assessment of Power Transformers", ABB T&D Div. Transformatori, Italy, 2004.

## AUTORES

### Orestes Hernández Areu

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail:orestesh@electrica.cujae.edu.cu

### Alain Cápiro Valdés

Ingeniero Electricista, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail:alaincv@electrica.cujae.edu.cu

### Divier R. Remedios Suárez

Ingeniero Electricista, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail:divier.rs@electrica.cujae.edu.cu

### Alexander Fernández Correa

Ingeniero en Electrónica, Doctor en Ciencias Técnicas, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail:alexander@electrica.cujae.edu.cu

