



Respuesta en frecuencia como herramienta de evaluación en pruebas de impulso a transformadores

Frequency response analysis as a tool to evaluate the results of the test of impulse to transformers

Jorge Luis– Godines Fonseca
Orestes Nicolás –Hernández Areu

Recibido: mayo de 2015
Aprobado: diciembre de 2015

Resumen/ Abstract

Se presentan los resultados sobre el procedimiento de diagnóstico realizado a un conjunto de transformadores por el método de análisis de respuesta en frecuencia ante pruebas de impulsos. En la mayoría de los laboratorios especializados el registro de las ondas de la prueba de impulsos se realiza en el dominio del tiempo, para luego analizar los resultados mediante la comparación de los oscilogramas de tensión y corriente. Este procedimiento posee dos debilidades: tiene poca sensibilidad y depende del subjetivo criterio del operario. Ante estos obstáculos, el presente artículo se propone dar a conocer un método de análisis de resultados que permita superar las debilidades del método tradicional. En consecuencia, se procede a la conversión de las señales obtenidas en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, y a la posterior interpretación de los resultados mediante un indicador estadístico que permite comparar los oscilogramas obtenidos.

Palabras clave: *análisis de respuesta en frecuencia, prueba de impulso, transformador.*

In this work a group of results are shown in regard of a diagnosis procedure performed on a group of transformers using the frequency response method in impulse testing. In most specialized laboratories, the recording of test waves obtained from impulse testing it's done in time domain to later on analyze the results by means of comparing tension and current oscillograms. This procedure has two weaknesses: little sensitivity and depends entirely on the worker's criteria. To overcome these obstacles this article intends to present the possibility of applying a different analysis method that eliminates the weaknesses of the traditional method: signals obtained in time's domain are transformed to frequency's domain to later on interpret the results by means of a statistical indicator that allows to compare the obtained oscillograms

Key Words: *transformer, frequency response analysis, impulse test.*

INTRODUCCIÓN

Las pruebas de impulsos de rayos tradicionalmente fueron consideradas ensayos a prototipos para demostrar la aptitud de los transformadores, su capacidad de resistir las sobretensiones externas a que pueden estar expuestos durante su explotación. En la actualidad también constituyen ensayos de rutina [1].

La publicación IEEE Std C57.12.90 del 2010, plantea: "Dada la naturaleza de las fallas durante la prueba de impulsos, una de las materias más importantes a considerar es la detección de estas".

Existen varios métodos para la detección de fallas del aislamiento, entre los que cita:

- Comparación de los oscilogramas de corrientes a tierra, donde cualquier diferencia en la forma de la onda de corriente (entre la onda plena reducida y la onda plena final observada en la comparación de los dos oscilogramas) puede ser indicación de falla.
- Comparación de los oscilogramas de tensión, donde cualquier diferencia inexplicada en la forma de la onda de tensión (entre la onda plena reducida y la onda plena final observada en la comparación de los dos oscilogramas) es indicación de falla.

Según fuentes bibliográficas [1], los registros en el dominio del tiempo adolecen de la sensibilidad necesaria para detectar fallas que involucren pocas espiras. Si la comparación de dichos oscilogramas se realiza de forma visual y cualitativa, entonces el criterio de aceptación será subjetivo y la presencia de fallas menores podría pasar inadvertida.

Estos inconvenientes en las mediciones en el dominio del tiempo han llevado a considerar otra forma para la interpretación de estos ensayos, convirtiendo las respuestas al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), donde la sensibilidad aumenta considerablemente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Métodos de detección de fallas

La realización de las pruebas de impulsos a los transformadores exige la aplicación de métodos, para determinar si el equipo pasó satisfactoriamente o no el ensayo.

La IEEE Std C57.12.90 – 2010. Part I. IEEE Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers [2] establece, en sus procedimientos de pruebas de impulsos a transformadores, el registro de todos los oscilogramas de los impulsos de tensión aplicados (onda reducida, ondas cortadas, frente de onda, si lo requiere y onda plena) y de la corriente circulante a tierra, de la onda de impulso reducida y la onda de impulso plena [3].

Interpretación de resultados. Criterios de aceptación y rechazo [4]

La evaluación de los resultados se hace por varios métodos que se basan en la comparación de registros, ya sea comparando los oscilogramas de tensión o los oscilogramas de corriente. Estos son:

a) Método de oscilogramas de tensión.

En este método de detección de falla, el impulso de tensión es registrado por medio de un osciloscopio (o registrador digital apropiado) conectado entre el terminal bajo prueba y tierra.

b) Método de oscilogramas de corrientes a tierra.

En este método de detección de falla, el impulso de corriente en el terminal del devanado que se prueba es registrado por medio de un osciloscopio o por un registrador digital apropiado, conectado a través de una impedancia de bajo valor que se inserta entre el terminal que se conectará a tierra y tierra.

Cualquier diferencia en la forma de la onda de corriente entre la onda plena reducida y la onda plena final, observada en la comparación de los dos oscilogramas, puede ser indicación de falla o de desviaciones debido a causas de otra índole. Pueden existir oscilaciones en el frente de la onda (primeros 2 μ s) que no necesariamente significan fallos.

El método de Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) como herramienta de diagnóstico [5,6]

Los inconvenientes de las mediciones en el dominio del tiempo llevan a considerar otra forma para la interpretación de estos ensayos.

Una mejor interpretación de los resultados de la prueba de impulsos consiste en comparar los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia, en lugar de hacerlo en el dominio del tiempo [7]. La respuesta en frecuencia obtenida de una forma de onda específica sólo puede contener información sobre las frecuencias presentes en la función de excitación. El método está basado en el uso de una PC (*personal computer*) y un osciloscopio digital de alta definición que evita la necesidad de interpretación visual de los oscilogramas de la prueba de impulso. La disponibilidad de formas de ondas digitalizadas permite una rápida comparación automatizada de las respuestas a impulsos y sus características en el dominio de la frecuencia con excelentes resultados, a través del uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Algunos

autores [8] registran la señal de tensión aplicada $x(t)$ y la señal de tensión de salida $y(t)$, o, en cambio, la señal de tensión aplicada $x(t)$ y la señal de corriente de entrada $y(t)$.

A partir de estas señales tomadas en el dominio del tiempo, se calcula mediante la FFT la función de transferencia $H(n) = Y(n)/X(n)$, donde: $Y(n)$ es la respuesta en frecuencia obtenida del oscilograma de intensidad de corriente, mientras $X(n)$ es la respuesta en frecuencia obtenida del oscilograma de tensión. La función $H(n)$, será, en un caso, la relación de la tensión de salida a la tensión de entrada y en el otro caso, será la admitancia de entrada [8].

Realización técnica del método de FRA

Las mediciones desarrolladas se componen de tres etapas. La primera, es la parte experimental con la cual se registran la tensión de impulso e intensidad de corriente a tierra en el dominio del tiempo. La segunda, es la transformación de los registros al dominio de la frecuencia. La tercera la compone el sistema de análisis automatizado de las mediciones obtenidas. Los sistemas de procesamientos de señales permiten emplear un método, mediante el cual las señales analógicas $x(t)$ y $y(t)$ en el dominio del tiempo son registradas simultáneamente a través de un osciloscopio digital, conectado a una computadora personal; y convertirlas en señales digitales en magnitud y tiempo. Estas señales pudieran ser directamente graficadas, como en las pruebas de impulsos tradicionales, o servir como punto de partida para el procesamiento de cálculo de la FFT. Una vez obtenidos los oscilogramas requeridos en el dominio del tiempo, serán transferidos a la computadora, donde son llevados al dominio de la frecuencia por medio de la FFT. La figura 1 muestra el principio del cálculo de la transformada.

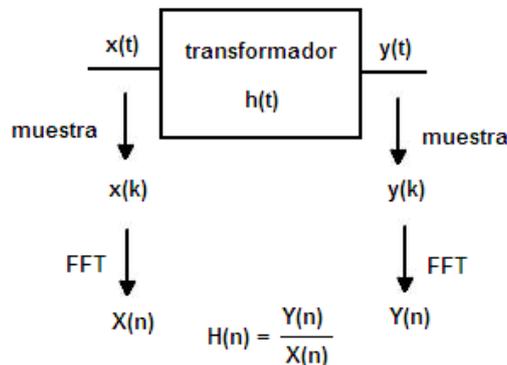


Fig. 1. Principio del cálculo de la transformada.

Interpretación de resultados obtenidos por FRA [9]

Para presentar los resultados se utilizan diferentes métodos. Se puede presentar la relación simple de las magnitudes de salida y entrada o se puede amplificar este resultado expresando esta relación en decibeles o, como la mayoría de los autores llaman; la forma módulo-argumento.

Si se amplifica la relación entre magnitudes de salida y entrada, el módulo, de acuerdo a la ecuación (1), sería:

$$K = 20 \log \frac{Y_{(n)}}{X_{(n)}} [dB] \quad (1)$$

El módulo es también llamado amplitud, relación de tensiones, ganancia de tensiones, impedancia o admitancia.

Con la misma notación, el argumento es definido por la ecuación (2):

$$\varnothing = \angle \frac{Y_{(n)}}{X_{(n)}} \quad (2)$$

El argumento es usualmente llamado *fase*.

Los resultados son 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 frecuentemente no es graficado o analizado.

La comparación visual de las trazas de FRA obtenidas del transformador es el método más utilizado para evaluar los resultados obtenidos e identificar posibles problemas en el mismo.

En una etapa anterior a la aplicación de los indicadores estadísticos, se examinan 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.

Aplicación de indicadores estadísticos

Una alternativa es calcular indicadores estadísticos de la cantidad de coincidencias o no coincidencias entre los dos grupos de mediciones. Esta herramienta extrae información de los resultados en todo el rango de frecuencias y es fácilmente aplicable mediante la computación, permitiendo resaltar o cuantificar los cambios obtenidos entre las dos trazas. Entre estos indicadores, el coeficiente de correlación entre dos mediciones es el que mejores resultados ha arrojado según la literatura especializada. La definición matemática del coeficiente de correlación es la siguiente [10]: 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 la ecuación (3):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^2) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i^2)}} \quad (3)$$

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. El coeficiente de correlación varía entre cero y uno. Para la mayoría de los devanados, los coeficientes de correlación entre los resultados de un transformador sano son muy cercanos a la unidad.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Obtención de los resultados

Se presentan a continuación los resultados obtenidos con los transformadores probados.

Se han ensayado un grupo de transformadores monofásicos con sus dos terminales de alta tensión accesibles y devanados de baja tensión con conexión trifilar, y transformadores trifásicos con conexión Δ -Y con neutro accesible por el devanado de baja tensión. Todos los transformadores fueron conectados de acuerdo a lo prescrito [3] y se les aplicó la secuencia de impulsos establecida por cada terminal de alta tensión, es decir; una onda reducida, dos ondas cortadas y una onda plena. Se tomó la precaución de desmagnetizar los núcleos después de la aplicación de la onda reducida y antes de la siguiente aplicación, mediante la excitación del devanado de baja tensión con su tensión nominal durante unos 30 segundos. Seguidamente, la tensión es reducida hasta llegar a cero.

Se registraron digitalmente los oscilogramas de tensión y corriente correspondientes a las ondas reducida y plena mediante un osciloscopio marca RIGOL DS1000, 25 MHz, 2 canales, 400 kS/s, 8 Bits, conectividad por USB.

En las figuras 2 y 3 se muestran ejemplos de las formas de ondas de la tensión e intensidad de corriente medidas en el dominio del tiempo, correspondientes a un impulso de tensión plena normalizado (1,2/50 μ s) aplicado a un transformador por el terminal de alta tensión H₁.

A partir de la obtención de las señales de impulsos en el dominio del tiempo, se obtiene la respuesta en frecuencia del transformador por la metodología ya explicada. En las figuras 4 y 5, se muestran los resultados.

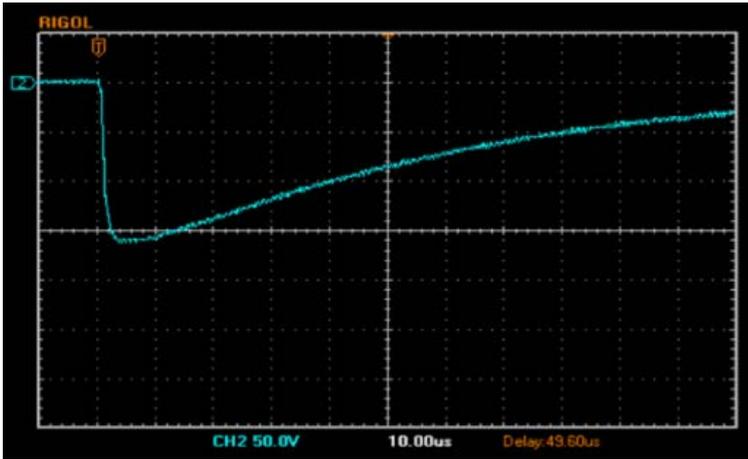


Fig. 2. Oscilograma de tensión de onda plena por el terminal H₁.

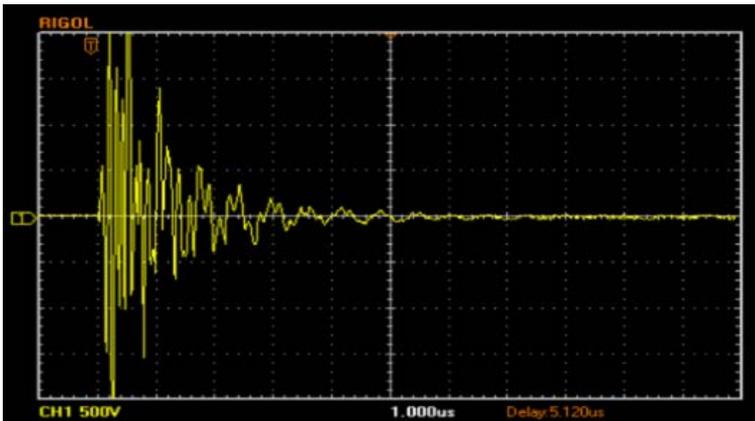


Fig. 3. Oscilograma de intensidad de corriente de onda plena por el terminal H₁.

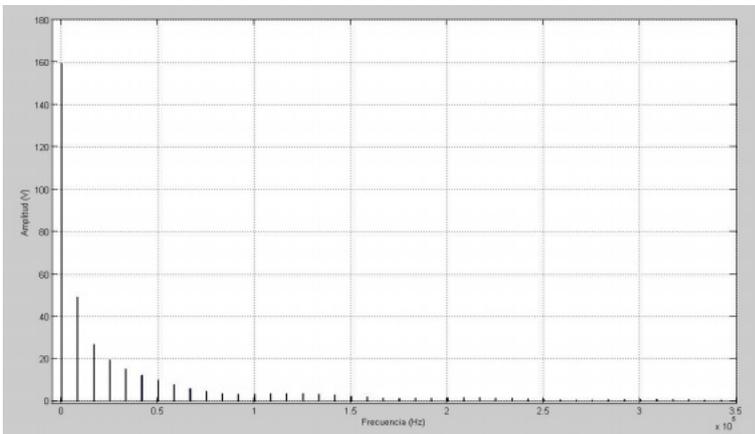


Fig. 4. Respuesta en frecuencia obtenida del oscilograma de tensión.

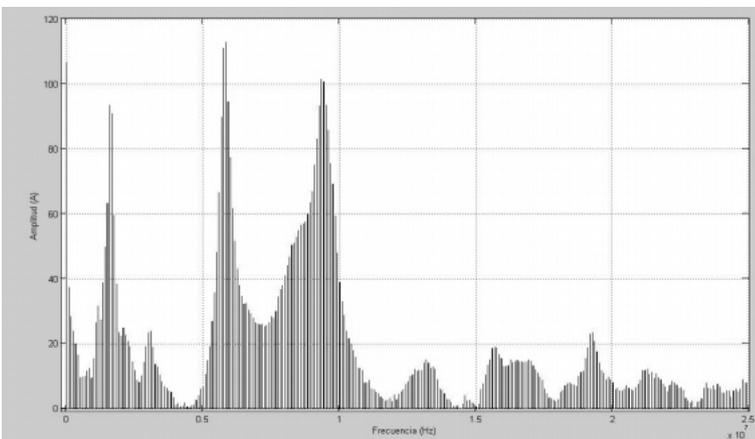


Fig. 5. Respuesta en frecuencia obtenida del oscilograma de intensidad de corriente. Procesamiento de la respuesta en frecuencia.

Mediante la programación con MATLAB se pueden procesar las mediciones y obtener las siguientes ventajas:

- Visualizar los oscilogramas de tensión y corriente en el dominio del tiempo.
- Visualizar los oscilogramas de tensión y corriente en el dominio de la frecuencia.
- Comparar los oscilogramas de tensión en el dominio de la frecuencia.
- Comparar los oscilogramas de corriente en el dominio de la frecuencia.
- Calcular la función transferencial de las señales de onda reducida y las señales de onda plena como la función transferencial entre las señales seleccionadas.
- Determinar la amplitud y relación de fase de la función transferencial.
- Realizar la comparación de las amplitudes de la función transferencial de onda reducida y de onda plena, así como la misma comparación para las relaciones de fase, aplicándose un indicador estadístico.

Resultados de las mediciones

Para tener certeza de los valores de coeficientes de correlación para el caso de transformadores que pasaran satisfactoriamente el ensayo de impulsos, se tomó un grupo de estos y se sometieron a impulsos de tensiones reducidas con respecto a su nivel básico de aislamiento.

A este grupo se les sometió a una onda reducida del 50 % del BIL y una onda plena del 70 % del BIL por cada uno de sus terminales de alta tensión. Algunos de los resultados se muestran a continuación.

De la figura 6 a la figura 9, se muestran los oscilogramas resultantes del transformador monofásico de 37,5 kVA, 7620/120-240 V, BIL 95 kV.

Transformador monofásico de 37,5 kVA, 7620/120-240 V, BIL 95 kV

Resultados por el terminal H₁.

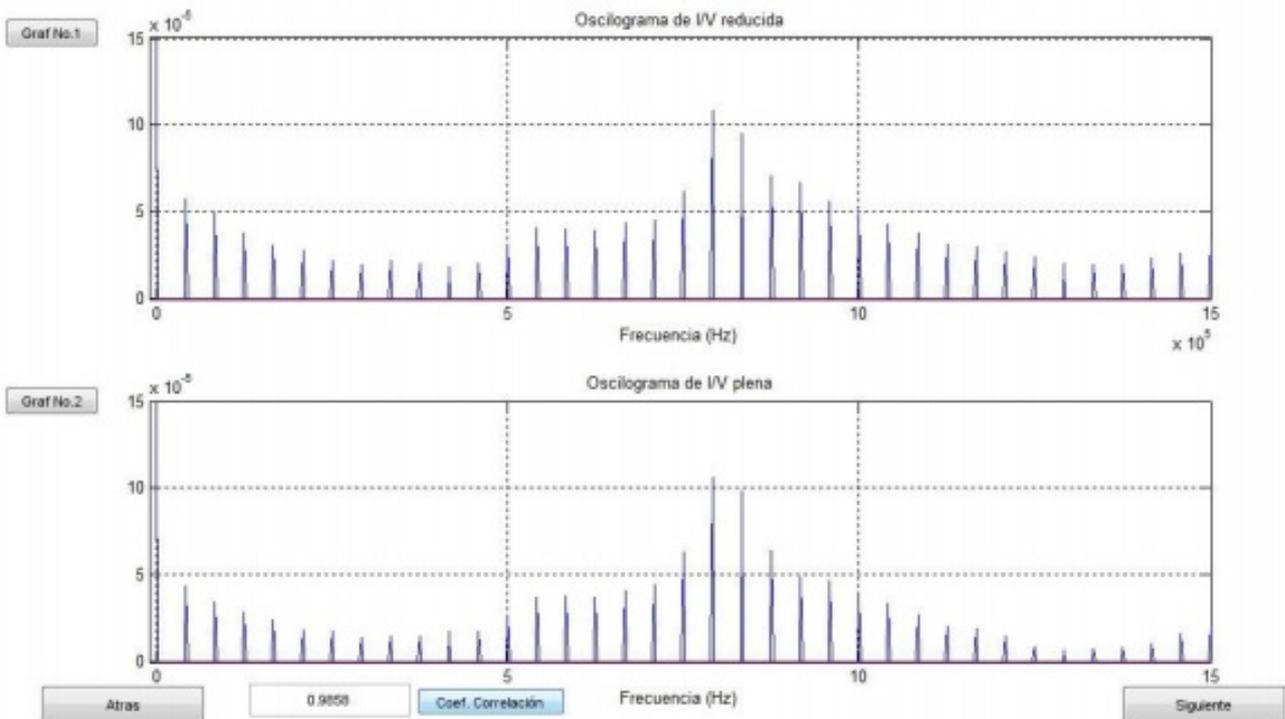


Fig. 6. Oscilogramas de comparación de las amplitudes de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia, (terminal H₁).

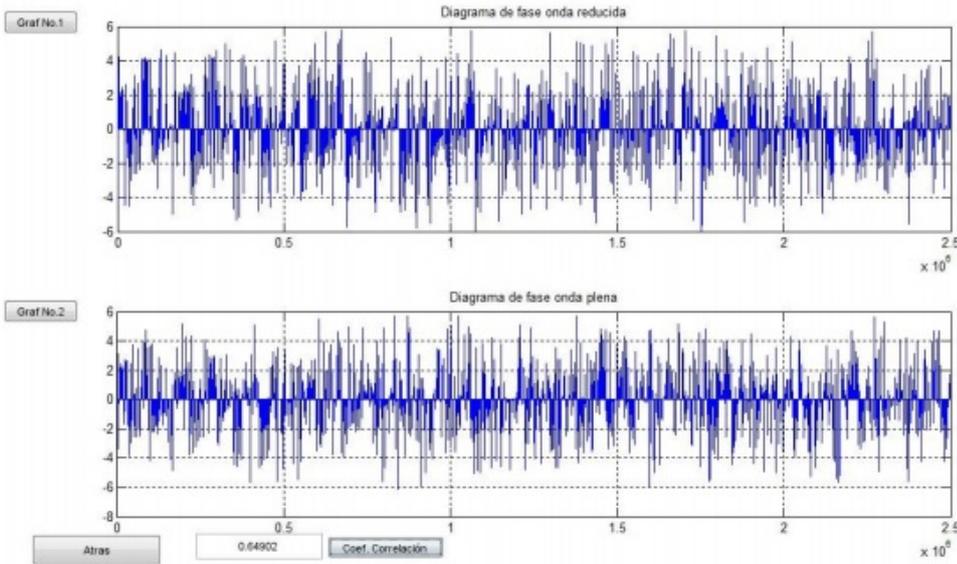


Fig. 7. Oscilogramas de comparación de las fases de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia, (terminal H₁).

Resultados por el terminal H₂.

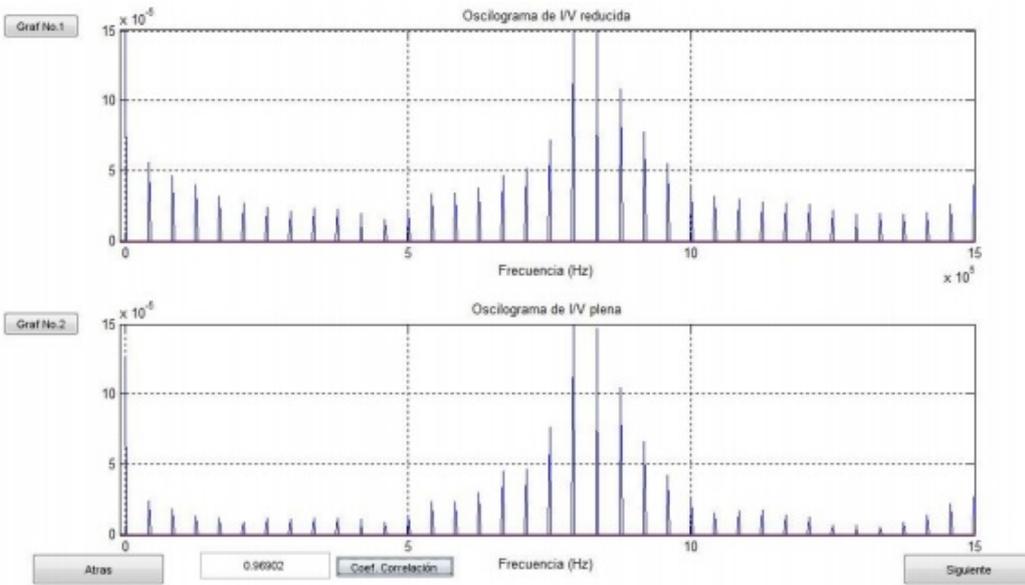


Fig. 8. Oscilogramas de comparación de las amplitudes de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia, (terminal H₂).

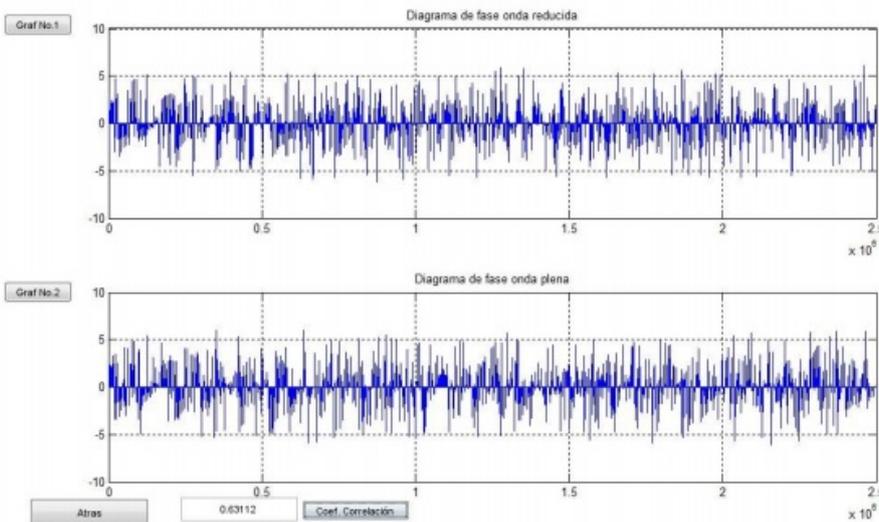


Fig. 9. Oscilogramas de comparación de las fases de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia, (terminal H₂).

La tabla 1, es un resumen de los resultados que se obtienen al realizar la prueba de impulso y obtener la comparación de los oscilogramas de frecuencia comparando los mismos con el coeficiente de correlación entre cada oscilograma.

Tabla 1. Resumen de los resultados de los coeficientes de correlación			
Transformador monofásico de 37,5 kVA	Terminal	Comparación	Coeficiente correlación
	H ₁	Comparación de amplitudes de admitancia.	0,9858
	H ₁	Comparación de fases de admitancia.	0,6490
	H ₂	Comparación de amplitudes de admitancia.	0,9690
	H ₂	Comparación de fases de admitancia.	0,6311

Transformador monofásico de 25 kVA, 7620/120-240 V, BIL 95 kV

De la figura 10 a la figura 13, se muestran los oscilogramas resultantes del transformador monofásico de 25 kVA, 7620/120-240 V, BIL 95 kV.

Resultados por el terminal H₁.

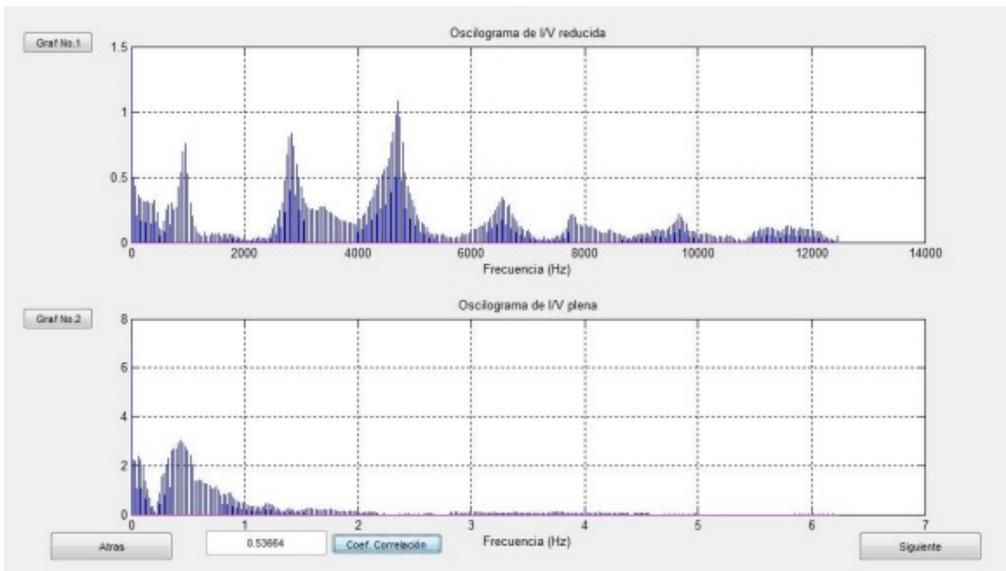


Fig. 10. Oscilogramas de comparación de las amplitudes de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia (H₁).

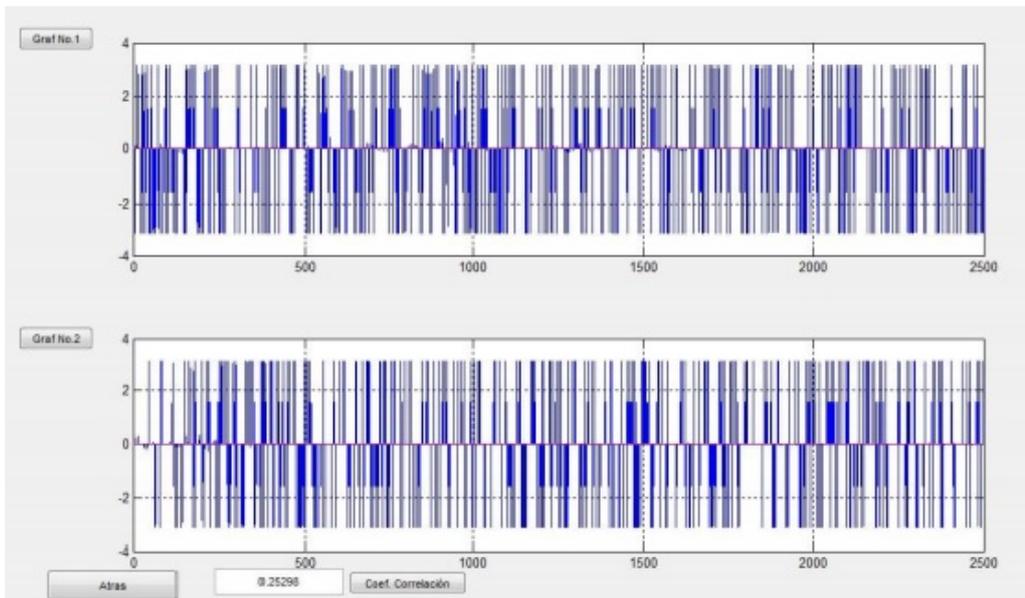


Fig. 11. Oscilogramas de comparación de las fases de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia, (H₁).

Resultados por el terminal H₂.

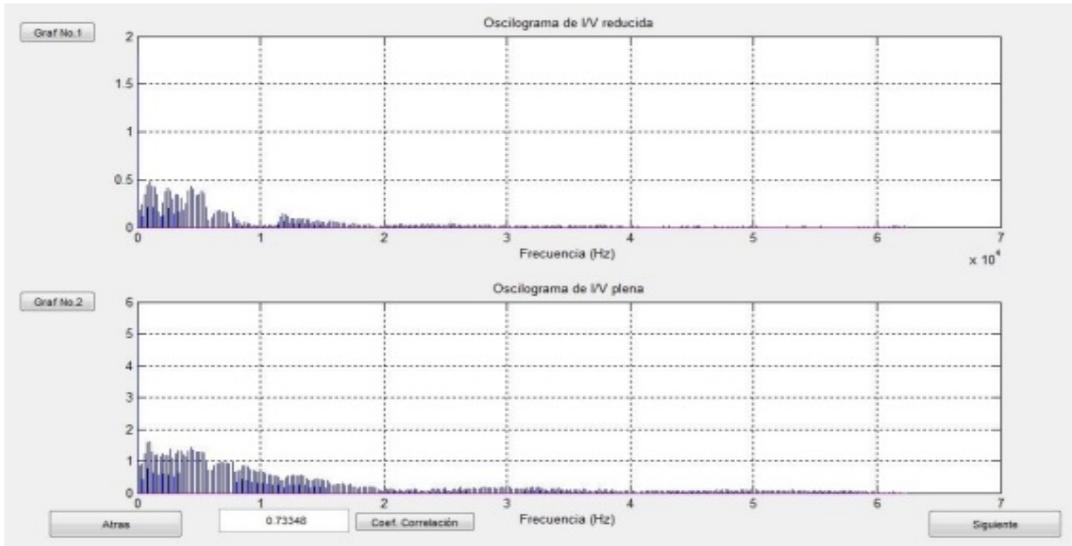


Fig. 12. Oscilogramas de comparación de las amplitudes de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia (H₂).

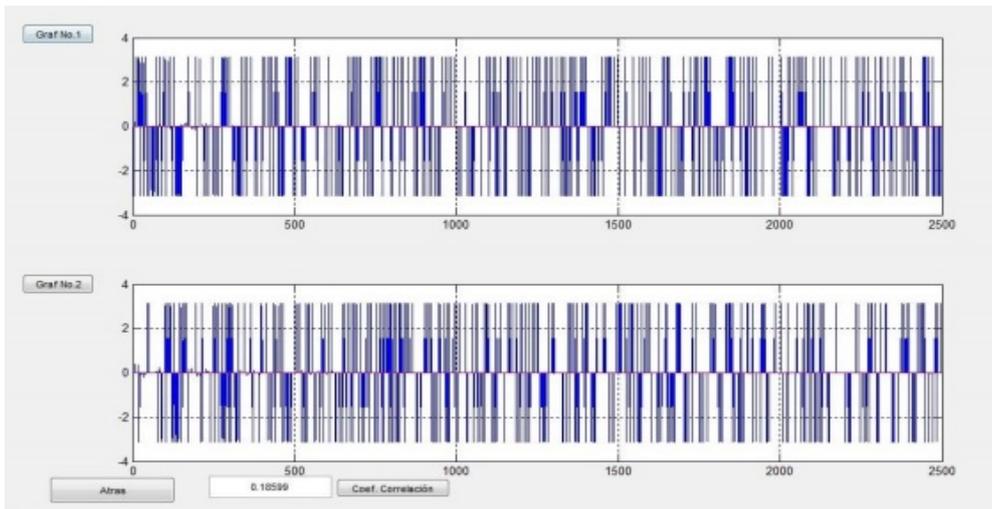


Fig. 13. Oscilogramas de comparación de las fases de las funciones admitancia en el dominio de la frecuencia, (H₂).

La tabla 2, es un resumen de los resultados que se obtienen al realizar la prueba de impulso y obtener la comparación de los oscilogramas de frecuencia comparando los mismos con el coeficiente de correlación entre cada oscilograma. Al analizar los resultados obtenidos en los ensayos que fueron realizados a la muestra escogida se puede concluir, en los casos en los que el transformador pasó satisfactoriamente las pruebas de impulsos: El coeficiente de correlación para la gráfica de comparación de las amplitudes de las funciones de transferencia se encuentra entre 0,95000 y 0,99900. El coeficiente de correlación para la gráfica de comparación de las fases de las funciones de transferencia se encuentra entre 0,63000 y 0,75000.

Tabla 2. Resumen de los resultados de los coeficientes de correlación			
	Terminal	Comparación	Coeficiente correlación
Transformador monofásico de 25 kVA.	H ₁	Comparación de amplitudes de admitancia.	0,53664
	H ₁	Comparación de fases de admitancia.	0,25298
	H ₂	Comparación de amplitudes de admitancia.	0,73348
	H ₂	Comparación de fases de admitancia.	0,18599

CONCLUSIONES

- Se logró obtener de forma digital las señales de impulsos en el dominio del tiempo y transferirlas al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier.
- Se aplicó el coeficiente de correlación como indicador estadístico para el diagnóstico de transformadores sometidos a ensayos de impulsos.
- Se desarrolló un software que de forma automática realiza el diagnóstico de los transformadores.
- Se incorporó el método de análisis de respuesta en frecuencia (FRA) como herramienta para interpretar los resultados de la prueba de impulso a transformadores al laboratorio de alta tensión.

REFERENCIAS

- [1]. XEXPLORE, I. IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers,". In: IEEE Std C57.12.00-2010 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2006), IEEE Xexplore Digital Library, 2010. pp.1-70.
- [2]. IEEE-SA. IEEE Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution Transformers. In: IEEE Std C57.138-1998(R2005), Secretary, IEEE-SA Standards Board, 2005. p.56.
- [3]. IEEE. IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. In: IEEE Std C57.12.90-2010 (Revision of IEEE Std C57.12.90-2006), 2010. pp.1-100.
- [4]. IEEE.. IEEE Guide for Transformer Impulse Tests. In: IEEE Std C57.98-1993, 1994. pp.1-59.
- [5]. BEHJAT, V., *et al.* "Diagnosing shorted turns on the windings of power transformers based upon online FRA using capacitive and inductive couplings". Power Delivery, IEEE Transactions on. 2011. Vol. 26. No. 4., pp. 2123-2133. ISSN: 0885-8977.
- [6]. BEHJAT, V., *et al.* "Sweep frequency response analysis for diagnosis of low level short circuit faults on the windings of power transformers: an experimental study". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2012. Vol. 42. No. 1. ISSN: 2077-3528.
- [7]. MALEWSKI, R.; POULIN, B. "Impulse testing of power transformers using the transfer function method. ". Power Delivery, IEEE Transactions on. 1988. Vol. 3. No. 2. pp. 476-489. ISSN: 0885-8977.
- [8]. OPPENHEIM, A. V., *et al.* Signals and Systems. Pearson Education Limited:Essex, England, 2014. ISBN: 9781292025902 1292025905.
- [9]. SOFIAN, D. M., *et al.* "Interpretation of transformer FRA responses—Part II: Influence of transformer structure". Power Delivery, IEEE Transactions on. 2010. Vol. 25. No. 4. pp. 2582-2589. ISSN: 0885-8977.
- [10]. BEHJAT, V.; MAHVI, M. "Statistical approach for interpretation of power transformers frequency response analysis results". IET Science, Measurement&Technology. 2015. Vol. 9. No. 3. pp. 367-375. ISSN: 1751-8830.

AUTORES

Jorge Luis Godines Fonseca

Ingeniero Electricista, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergética, CIPEL Facultad de Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.
e-mail: jluis@electrica.cujae.edu.cu

Orestes Hernández Areus

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