DESEMPEÑO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE RESPUESTA DE BARRIDO EN FRECUENCIA SFRA

Villamil Huertas, Sandra I., 20221372010

***Abstract*—Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) is a non-invasive diagnostic technique used to detect deformations and defects in power transformers. It allows for the early identification of structural problems, preventing catastrophic failures and ensuring the reliability of the electrical system. Additionally, it verifies mechanical integrity after transport. The test compares current measurement results with reference results to assess the transformer's condition.**

The document describes the procedure, types of failures, typical curves, and field tests according to existing international standards for the implementation of the SFRA test.

***Index Terms*—SFRA, magnitud, ángulo, frecuencia, fallas, transformador.**

I. Introducción

El incremento en la demanda de energía y la relevancia de los transformadores de potencia en el sistema eléctrico hacen necesaria la implementación de estrategias de mantenimiento, a pesar de los avances en los métodos de diagnóstico convencionales, estas presentan limitaciones en la detección temprana de defectos estructurales en el interior de los transformadores, la prueba de análisis de respuesta de barrido en frecuencia SFRA (SweepFrequency Response Analysis), surge como herramienta de diagnóstico no invasiva y muy eficaz para evaluar la integridad mecánica de estos equipos.

El ensayo SFRA permite la detección temprana de defectos o deformaciones en su estructura interna evitando que se provoquen fallas catastróficas, por otra parte, garantiza la confiabilidad del sistema eléctrico y evita que se generen importantes pérdidas económicas debido a interrupciones repentinas y extensos tiempos de inactividad.

II. Marco Teórico

El principal interés de las mediciones de SFRA en transformadores es detectar deformaciones de los devanados que pueden resultar de fuerzas electromagnéticas muy grandes causadas por sobrecorrientes durante fallas de paso, fallas de cambio de tomas, sincronización defectuosa, etc. La deformación del devanado puede llevar a una falla del transformador al dañar el aislamiento entre espiras, lo que eventualmente causa un cortocircuito entre espiras y el fin inmediato de la vida útil del transformador. [1]

Aunque se espera que los transformadores sobrevivan a varios cortocircuitos sin fallos, una deformación significativa del devanado reduce la probabilidad de sobrevivir a futuros cortocircuitos debido al aumento local de las tensiones electromagnéticas. Además, la contracción del aislamiento causada por el envejecimiento puede reducir la resistencia mecánica de los conjuntos de bobinados, aumentando la probabilidad de falla.

Otro propósito de las mediciones de SFRA es verificar la integridad mecánica de un transformador después del transporte, proporcionando un medio confiable para confirmar que el núcleo y el conjunto del devanado no han sufrido daños mecánicos a pesar de las sacudidas durante el transporte.

Análisis de la respuesta de frecuencia (FRA)

Es una técnica de diagnóstico no destructiva y no intrusiva utilizada para detectar cambios en las características eléctricas de los devanados de los transformadores de potencia. Estos cambios pueden ser causados por tensiones eléctricas o mecánicas (daños durante el transporte, fuerzas de cortocircuito, fallas en el aislamiento, entre otros). El FRA mide la impedancia de los elementos capacitivos e inductivos de los devanados en un amplio rango de frecuencias y compara los resultados con una "huella digital" de referencia para realizar el diagnóstico.[2]

Método de barrido de frecuencia

Consiste en inyectar una señal de frecuencia variable en un terminal y medir la respuesta en otro, la magnitud de la señal de excitación se mantiene constante para todas las frecuencias implementadas.

Función de transferencia $H(j\omega)$

La función de transferencia de un transformador es la relación entre la señal de salida y la señal de entrada del circuito equivalente del transformador, representada mediante la transformada de Laplace. La distribución de polos y ceros de esta función está estrechamente relacionada con los parámetros internos del transformador, el método de conexión y la impedancia de los terminales de conexión de la red bilateral.

$$H(j\omega) = \frac{Señal_{out}(j\omega)}{Señal_{in}(j\omega)}$$

Magnitud del SFRA

La magnitud de la señal de respuesta U_{out} en relación con la señal de entrada U_{in}, generalmente se expresa en dB, se calcula como $|A|_{dB} = 20\log_{10}(H(j\omega))$

Ángulo de fase del SFRA

Ángulo de fase de la señal de respuesta en relación con la señal de entrada, $A_{(\theta)} = \tan(H(j\omega))$

III. Normativa

Normas que proporcionan recomendaciones técnicas para el desarrollo y análisis de la respuesta de barrido en frecuencia SFRA

1) DL/T 911-2004,
2) CIGRE 342-2008,
3) IEC 60076-18-2012,
4) IEEE C57.149-2012,

IV. Descripción general para el análisis de la respuesta de barrido en frecuencia SFRA

La prueba SFRA suministra información de diagnostico, por medio de una función de transferencia, basada en los componentes eléctricos RLC, (resistencias, inductancias y capacitancias) del transformador, los cuales están directamente relacionados con su construcción y geometría física.

Los cambios físicos en el transformador modifican los parámetros internos RLC, lo que altera directamente la función de transferencia. Esta función puede revelar diversos cambios mecánicos o eléctricos en el equipo. Diferentes tipos de falla del transformador afectan la red de admitancias y la función de transferencia de distintas maneras, aunque algunos fallos pueden no tener un efecto reconocible.

El SFRA es un método comparativo que evalúa el estado del transformador mediante la comparación de resultados reales de pruebas de respuesta de barrido en frecuencia con resultados de referencia.

Tres métodos comunes para evaluar las medidas SFRA son:

1) Basado en el tiempo: Comparar los resultados actuales con los anteriores del mismo transformador.
2) Basado en el tipo: Comparar los resultados de un transformador con otro del mismo tipo (gemelo).
3) Comparación entre fases: Comparar los resultados de una fase con los de las otras fases del mismo transformador

A. ¿Cuándo realizar la prueba SFRA?

La prueba SFRA se utiliza para detectar movimiento mecánico o daño en un transformador, y es más adecuada después de eventos o condiciones que puedan causar dichos daños. Escenarios típicos para utilizar mediciones de SFRA incluyen situaciones que puedan haber causado movimiento mecánico o daño eléctrico al transformador, como:

- Pruebas de fábrica
  - Control de calidad
  - Verificación del transformador luego de la prueba de cortocircuito
  - Antes del envío
- Instalación o puesta en marcha
- Reubicación de la unidad
- Después de un evento significativo en el sistema
- Como prueba de diagnóstico de rutina
- Después de una alarma de transformador (Buchholz, detector de gas, presión repentina)
- Después de un cambio en las condiciones eléctricas del transformador
- Antes o después de un mantenimiento correctivo

B. Factores recomendados para la medición de la prueba

- Para la medición de prueba SFRA, el equipo de medición debe tener una amplia gama de frecuencias para poder identificar problemas en el núcleo, devanados y las interconexiones, además de una resolución adecuada para diagnósticos claros.
- El equipo de medición debe estar calibrado, tener un amplio rango dinámico de frecuencia esto con el fin de tener cobertura a la mayoría de los objetos de prueba del transformador, el sistema de prueba (set y cables) debe tener impedancia característica constante, los cables de prueba deben ser coaxiales de la misma longitud, siempre que sea posible y menos de 30 m, los cables apantallados deben tener la posibilidad de conectarse a tierra en cada extremo, la magnitud y ángulo de fase de la función de transferencia deben medirse y registrarse.

V. Ejecución de la prueba SFRA

Las mediciones de la respuesta de frecuencia en pruebas eléctricas deben realizarse de manera segura y controlada, independientemente de la ubicación. Las consideraciones de seguridad abarcan al personal, el entorno, el equipo de prueba y el transformador. Es importante que el personal discuta el procedimiento antes de la prueba para asegurar que se entienden claramente las tareas y las precauciones de seguridad. Además, se deben seguir los estándares de la industria, las regulaciones locales y las recomendaciones del fabricante.

A. Acondicionamiento del entorno de Prueba

- Cualquier transformador sometido a prueba deberá estar completamente desconectado de la fuente de alta tensión o del sistema de potencia.
- El tanque del transformador debe estar debidamente aterrizado.
- El equipo de medición debe estar debidamente aterrizado para cada configuración y desconectado de la fuente de alta tensión o del sistema de potencia.
- Durante la prueba, se debe seguir rigurosamente las normas de seguridad generales y locales.

B. Acondicionamiento del objeto de prueba

Se sugiere que la configuración del transformador este lo mas cerca posible a la configuración ”en servicio”.

Todos los bujes externos de conexión deben estar completamente desconectados. Esto abarca conexiones de neutro, conexiones de fase, tierras terciarias y bobinas de estabilización.

Las conexiones de los cables de prueba deben hacerse directamente a los bujes terminales para evitar influencias en los resultados de la prueba SFRA. Tramos cortos de conductor no afectan significativamente la medición si están conectados después de la barra colectora. Si no es posible conectar directamente, se pueden usar secciones cortas de la barra colectora, aunque esto afectará los resultados. Es crucial mantener consistencia en el método de prueba y considerar el estado del transformador. Las conexiones externas de barras deben evitarse siempre que sea posible.

C. Acondicionamiento para el equipo de medida

El equipo de medida debe estar conectado a tierra según las recomendaciones del fabricante o, en su defecto, en el mismo punto que el transformador bajo prueba. La conexión a tierra del tanque del transformador se usa como referencia para la medición de SFRA. Las técnicas de puesta a tierra influyen significativamente en los resultados y deben ser precisas, repetibles y documentadas.

El equipo de prueba debe mantenerse dentro del intervalo de calibración recomendado y realizar una autoevaluación con un objeto de prueba estándar antes de su uso. Esto asegura su correcto funcionamiento, especialmente en equipos de prueba SFRA, ya que no se puede determinar intuitivamente si están dando resultados precisos en mediciones de campo.

D. Acondicionamiento de los cables

Se deben emplear tres cables coaxiales:

- Fuente o excitación
- De referencia o entrada
- De medida o salida

Estos cables deben ser lo más uniformes posible en longitud y tener una impedancia característica igual o similar. Idealmente, deben ser de la misma longitud o, como mínimo, los cables de ”referencia” y ”medida” deben ser idénticos.

Es necesario verificar la continuidad e integridad de los cables antes de su uso. La mejor manera de realizar esta verificación es llevar a cabo la auto-evaluación SFRA utilizando el objeto de prueba estándar.

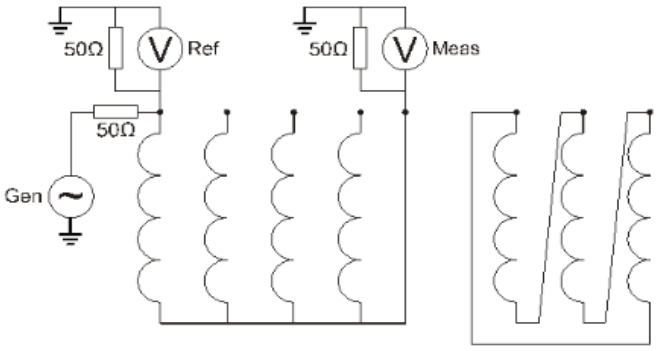
Al utilizar cables en una configuración de cortocircuito como parte de una prueba, deben ser lo más cortos posible y estar aislados de tierra, ya que la impedancia de estos cables influirá en los resultados de la prueba.

E. Tipos de prueba SFRA

1) Admitancia de circuito abierto (CA): Se realiza en un extremo del transformador con todos los terminales del otro extremo abiertos. Esta prueba se puede aplicar tanto a transformadores monofásicos como trifásicos. La prueba de (CA) se dividen en cinco categorías: alta tensión, baja tensión, terciario, serie y común. Las categorías serie y común se aplican únicamente a autotransformadores.

Las pruebas de circuito abierto están influenciadas por las propiedades del núcleo del transformador en torno a la frecuencia fundamental. Estas pruebas pueden realizarse junto con la prueba de corriente de excitación para identificar los modos de falla que afectan el circuito magnético del transformador.

Fig. 1. Conexión para prueba de admitancia de circuito abierto

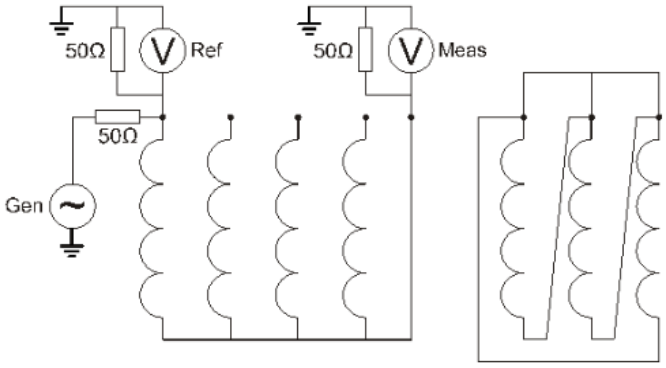


Fuente: Manual de usuario Frax

2) Admitancia de cortocircuito (CC): La medición de cortocircuito se realiza en el extremo de alta tensión del transformador, mientras que el devanado de baja tensión asociado está en cortocircuito. Para efectos de repetibilidad y para crear el modelo equivalente de cortocircuito, todas las bobinas de baja tensión deben estar en cortocircuito en transformadores trifásicos. Esto asegura que las tres fases tengan una impedancia de cortocircuito similar. La conexión a neutro no debe incluirse en la prueba de cortocircuito.

La prueba de cortocircuito aísla las propiedades de la impedancia del núcleo. Los resultados de corto circuito proporcionan información diagnóstica sobre la reactancia y la resistencia de fuga de cada devanado en la frecuencia fundamental.

Fig. 2. Conexión para prueba de admitancia de cortocircuito

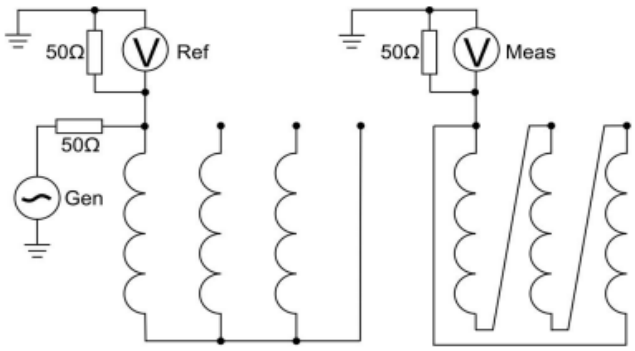


Fuente: Manual de usuario Frax

3) Interdevanado Capacitivo: Se realiza entre dos devanados eléctricamente aislados. Esta medición se efectúa en uno de los terminales de un devanado y se mide la señal en uno de los terminales del otro devanado en la misma fase, con todos los demás terminales abiertos. Las medidas interbobinado son puramente capacitivas. Estas mediciones muestran una alta impedancia a bajas frecuencias (< 100 Hz); la impedancia generalmente disminuye a medida que la frecuencia aumenta.

Alrededor de la frecuencia fundamental esta prueba es básicamente una medición de capacitancia y disipación / factor de potencia.

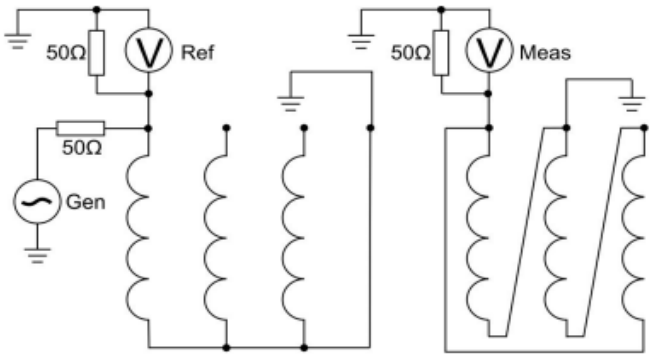
Fig. 3. Conexión para la prueba de interdevanado capacitivo



Fuente: Manual de usuario Frax

4) Interdevanado Inductivo: En la medición de inductancia entre devanados la señal se aplica a un terminal en el lado de alta tensión y la respuesta se mide en el terminal correspondiente en el lado de baja tensión, con el otro extremo de ambos devanados conectado a tierra. Todos los demás terminales que no están bajo prueba deben permanecer abiertos. La medición inductiva entre devanados muestra la relación de vueltas del transformador en torno a la frecuencia fundamental.

Fig. 4. Conexión para prueba Interdevanado Inductivo



Fuente: Manual de usuario Frax

F. Posición del cambiador de tomas bajo carga (OLTC) y Cambiador de tomas desenergizado (DETC)

Durante la ejecución de la prueba, las posiciones del tap deben ser registradas para cada tipo de prueba. En general, para la prueba de bobinados con OLTC, el tap debe estar en la misma posición de derivación para todos los devanados. Se recomienda que el OLTC esté en la posición superior. Cuando las pruebas se realizan en una posición neutral del tap OLTC, esta posición debe ser registrada, ya que el bobinado resultante a través del tap influye en el resultado de la prueba.

Para la prueba, el DETC debe estar en la misma posición que cuando está en servicio. No se recomienda alterar la posición del DETC para la prueba de SFRA. La excepción es en las pruebas de fábrica de un transformador nuevo, donde se puede suponer que el DETC está en condiciones satisfactorias.

Posiciones recomendadas para el OLTC y DETC

- OLTC- Extremo superior
- DETC- Como se encuentre ”en servicio”

G. Conexiones de ensayo

La base del análisis de SFRA es la comparación con mediciones de referencia. Si estas mediciones están disponibles, se recomienda repetir las pruebas exactamente como se realizaron las mediciones de referencia.

Todas las mediciones deben seguir el principio básico de medir los bobinados de ”cabeza a cola”; las conexiones de prueba recomendadas dependen de la configuración del transformador. Es recomendable llevar a cabo todas las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito como mínimo.

A continuación, se presentan las conexiones de ensayo que pueden ser seleccionadas de acuerdo a la configuración del transformador.

TABLE I
CONEXIÓN DE PRUEBA PARA TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS - 15 PRUEBAS

Tipo de prueba	No. Prueba	3 ϕ Δ - Y Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	3 ϕ Y - Δ Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	3 ϕ Δ - Δ Grupo 1 θ = 0 °	3 ϕ Y - Y Grupo 1 θ = 0 °	1 ϕ
AT Circuito abierto - Las demás terminales abiertas	1	H1 - H3	H1 - H0	H1 - H3	H1 - H0	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2 - H0	H2 - H1	H2 - H0	H2 - H0	
	3	H3 - H0	H3 - H2	H3 - H0	H3 - H0	
BT Circuito abieto - Las demás terminales abiertas	4	X1 - X0	X1 - X2	X1 - X3	X1 - X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2 - X3	X2 - X1	X2 - X0	X2 - X0	
	6	X3 - X1	X3 - X2	X3 - X0	X3 - X0	
Corto circuito Corto [X1 - X2 - X3]a	7	H1 - H3	H1 - H0	H1 - H3	H1 - H0	H1-H2
	8	H2 - H0	H2 - H1	H2 - H0	H2 - H0	Corto
	9	H3 - H0	H3 - H2	H3 - H0	H3 - H0	[X1-X2]a
Interdevanado Capacitivo Todos los demás terminales abiertos	10	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1
	11	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	
	12	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	
Interdevanado inductivo de AT hacia BT Tierra [H y X]b	13	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1
	14	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	Tierra
	15	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	H2 - X2

Fuente: IEEE C57.149-2012

a: Especifica qué terminales están en cortocircuito, pero no conectados a tierra. El neutro no se incluye para transformadores trifásicos conectados en Y, pero puede estar incluido para transformadores monofásicos.

b: Indica el otro extremo del devanado, opuesto a las conexiones de referencia y de medida.

TABLE II
CONEXIONES PARA AUTOTRANSFORMADORES SIN TERCIARIO - 12 PRUEBAS

Tipo de prueba	No. Prueba	3 ϕ	1 ϕ
Devanado serie abierto - Los demás terminales abiertos	1	H 1 - X 1	H 1 - X 1
	2	H 2 - X 2	
	3	H 3 - X 3	
Devanado común abierto - Los demás terminales abiertos	4	X 1 - H 0 X 0	X 1 - H 0 X 0
	5	X 2 - H 0 X 0	
	6	X 3 - H 0 X 0	
Corto circuito Corto [X1 - X2 - X3]a	7	H 1 - H 0 X 0	H 1 - H 0 X 0 Corto [X 1 - H 0 X 0]a
	8	H 2 - H 0 X 0	
	9	H 3 - H 0 X 0	
Interdevanado Capacitivo Todos los demás terminales abiertos	10	H 1 - X 1	H 1 - X 1
	11	H 2 - X 2	H 2 - X 2
	12	H 3 - X 3	H 3 - X 3

Fuente: IEEE C57.149-2012

TABLE III
CONEXIONES PARA AUTOTRANSFORMADORES CON TERCIARIO ATERRIZADO - 18 PRUEBAS

Tipo de prueba	No. Prueba	3 ϕ	1 ϕ
Devanado serie abierto - Los demás terminales abiertos	1	H1 - X1	H 1 - X 1
	2	H2 - X2	
	3	H3 - X3	
Devanado común abierto - Los demás terminales abiertos	4	X1 - H0 X0	X1 - H0 X0
	5	X2 - H0 X0	
	6	X3 - H0 X0	
Corto circuito de AT hacia BT corto [X1 - X2 - X3]a	7	H1 - H0 X0	H1 - H0 X0 Corto [X1 - H0 X 0]a
	8	H2 - H0 X0	
	9	H3 - H0 X0	
Interdevanado capacitivo de AT hacia terciario MT Los demas terminales abiertos	10	H1 - Y1	H 1 - Y 1
	11	H2 - Y2	
	12	H3 - Y3	
Interdevanado capacitivo de BT hacia terciario MT Los demas terminales abiertos	13	X1 - Y1	X 1 - Y 1
	14	X2 - Y2	
	15	X3 - Y3	
Interdevanado inductivo de AT hacia BT tierra [H0 X0]	16	H1 - X1	H 1 - X 1 Tierra [H 0 X 0]
	17	H2 - X2	
	18	H3 - X3	

Fuente: IEEE C57.149-2012

TABLE IV
CONEXIONES PARA AUTOTRANSFORMADORES CON TERCIARIO - 33 PRUEBAS

Tipo de prueba	No. Prueba	3 ϕ	1 ϕ
Devanado serie abierto - Los demás terminales abiertos	1	H1 - X1	H1 - X1
	2	H2 - X2	
	3	H3 - X3	
Devanado común abierto - Los demás terminales abiertos	4	X1 - H0 X0	X1 - H0 X0
	5	X2 - H0 X0	
	6	X3 - H0 X0	
Devanado terciario abierto - Los demás terminales abiertos	7	Y1 - Y2	Y1 - Y2 (Y1 - Y0)
	8	Y2 - Y3	
	9	Y3 - Y1	
Corto circuito de AT hacia BT corto [X1 - X2 - X3]a	10	H1 - H0 X0	H1 - H0 X0 Corto [X1 - H0 X0]a
	11	H2 - H0 X0	
	12	H3 - H0 X0	
Corto circuito de AT hacia terciario MT corto [Y1 - Y2 - Y3]a	13	H1 - H0 X0	H1 - H0 X0 Corto [Y1 - Y2]a
	14	H2 - H0 X0	
	15	H3 - H0 X0	
Corto circuito de BT hacia terciario MT corto [Y1 - Y2 - Y3]a	16	X1 - H0 X0	X1 - H0 X0 Corto [Y1 - Y2]a
	17	X2 - H0 X0	
	18	X3 - H0 X0	
Interdevanado capacitivo de BT hacia terciario MT Los demas terminales abiertos	19	H1 - Y1	H1 - Y1
	20	H2 - Y2	
	21	H3 - Y3	
Interdevanado capacitivo de AT hacia terciario MT Los demas terminales abiertos	22	H1 - Y1	H1 - X1
	23	H2 - Y2	
	24	H3 - Y3	
Interdevanado inductivo de AT hacia BT tierra [H0 X0]	25	H1 - X1	H1 - X1 Tierra [H0 X0]
	26	H2 - X2	
	27	H3 - X3	
Interdevanado inductivo de AT hacia Terciario MT Tierra [H0 X0 y Y]b	28	H1 - Y1	H1 - Y1 Tierra [H0 X0, Y2]
	29	H2 - Y2	
	30	H3 - Y3	
Interdevanado inductivo de BT hacia Terciario MT Tierra [H0 X0 y Y]b	31	X1 - Y1	X1 - Y1 Tierra [H0 X0, Y2]
	32	X2 - Y2	
	33	X3 - Y3	

Fuente: IEEE C57.149-2012

TABLE V
CONEXIONES PARA TRANSFORMADORES TRIDEVANADOS PARTE 1 - 36 PRUEBAS

Tipo de prueba	No. Prueba	3 ϕ Δ-Δ-Δ Grupo 1 θ = 0 °	3 ϕ Δ-Δ-Y Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	3 ϕ Δ-Y-Δ Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	3 ϕ Δ-Y-Y Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	1 ϕ
AT Circuito abierto - Las demás terminales abiertas	1	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H3	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2 - H1	H2 - H1	H2 - H1	H2 - H1	
	3	H3 - H2	H3 - H2	H3 - H2	H3 - H2	
BT Circuito abieto - Las demás terminales abiertas	4	X1 - X3	X1 - X3	X1 - X0	X1 - X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2 - X1	X2 - X1	X2 - X0	X2 - X0	
	6	X3 - X2	X3 - X2	X3 - X0	X3 - X0	
MT circuito abierto - Las demás terminales abiertas	7	Y1 - Y3	Y1 - Y0	Y1 - Y3	Y1 - Y0	Y1-Y2 (Y1-Y0)
	8	Y2 - Y1	Y2 - Y0	Y2 - Y1	Y2 - Y0	
	9	Y3 - Y2	Y3 - Y0	Y3 - Y2	Y3 - Y0	
Corto circuito AT hacia BT Corto [X1 - X2 - X3]a	10	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H3	H1 - X1 Corto [X1-X2]a
	11	H2 - H1	H2 - H1	H2 - H1	H2 - H1	
	12	H3 - H2	H3 - H2	H3 - H2	H3 - H2	
Corto circuito AT hacia MT Corto [Y1- Y2 - Y3]a	13	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H3	H1 - H0 Corto [Y1-Y2]a
	14	H2 - H1	H2 - H1	H2 - H1	H2 - H1	
	15	H3 - H2	H3 - H2	H3 - H2	H3 - H2	
Corto circuito BT hacia MT Corto [Y1- Y2 - Y3]a	16	X1 - X3	X1 - X3	X1 - X0	X1 - X0	X1-X2 Corto [Y1-Y2]a
	17	X2 - X1	X2 - X1	X2 - X0	X2 - X0	
	18	X3 - X2	X3 - X2	X3 - X0	X3 - X0	
Interdevanado Capacitivo AT hacia BT Todos los demás terminales abiertos	19	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1
	20	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	
	21	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	
Interdevanado Capacitivo AT hacia MT Todos los demás terminales abiertos	22	H1 - Y1	H1 - Y1	H1 - Y1	H1 - Y1	H1 - Y1
	23	H2 - Y2	H2 - Y2	H2 - Y2	H2 - Y2	
	24	H3 - Y3	H3 - Y3	H3 - Y3	H3 - Y3	
Interdevanado Capacitivo BT hacia MT Todos los demás terminales abiertos	25	X1 - Y1	X1 - Y1	X1 - Y1	X1 - Y1	X1 - Y1
	26	X2 - Y2	X2 - Y2	X2 - Y2	X2 - Y2	
	27	X3 - Y3	X3 - Y3	X3 - Y3	X3 - Y3	
Interdevanado inductivo de AT hacia BT Tierra [H y X]b	28	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1	H1 - X1 Tierra H2 - X2
	29	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	H2 - X2	
	30	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	H3 - X3	
Interdevanado inductivo de AT hacia MT Tierra [H y Y]b	31	H1 - Y1	H1 - Y1	H1 - Y1	H1 - Y1	H1 - Y1 Tierra H2 - Y2
	32	H2 - Y2	H2 - Y2	H2 - Y2	H2 - Y2	
	33	H3 - Y3	H3 - Y3	H3 - Y3	H3 - Y3	
Interdevanado inductivo de BT hacia MT Tierra [X y Y]b	34	X1 - Y1	X1 - Y1	X1 - Y1	X1 - Y1	X1 - Y1 Tierra X2 - Y2
	35	X2 - Y2	X2 - Y2	X2 - Y2	X2 - Y2	
	36	X3 - Y3	X3 - Y3	X3 - Y3	X3 - Y3	

Fuente: IEEE C57.149-2012

TABLE VI
CONEXIONES PARA TRANSFORMADORES TRIDEVANADOS PARTE 2 - 36
PRUEBAS

Tipo de prueba	No. Prueba	3 ϕ Y-Y-Y Grupo 1 θ = 0 °	3 ϕ Y-Y-Δ Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	3 ϕ Y-Δ-Y Grupo 2 θ = 30 ° Atraso	3 ϕ Y-Δ-Δ Grupo 2 θ = 30 ° Atraso
AT Circuito abierto - Los demás terminales abiertas	1	H 1 - H 0	H 1 - H 0	H 1 - H 0	H 1 - H 0
	2	H 2 - H 0	H 2 - H 0	H 2 - H 0	H 2 - H 0
	3	H 3 - H 0	H 3 - H 0	H 3 - H 0	H 3 - H 0
BT Circuito abieto - Los demás terminales abiertas	4	X 1 - X 0	X 1 - X 0	X 1 - X 2	X 1 - X 2
	5	X 2 - X 0	X 2 - X 0	X 2 - X 3	X 2 - X 3
	6	X 3 - X 0	X 3 - X 0	X 3 - X 1	X 3 - X 1
MT circuito abierto - Los demás terminales abiertas	7	Y 1 - Y 0	Y 1 - Y 2	Y 1 - Y 0	Y 1 - Y 2
	8	Y 2 - Y 0	Y 2 - Y 3	Y 2 - Y 0	Y 2 - Y 3
	9	Y 3 - Y 0	Y 3 - Y 1	Y 3 - Y 0	Y 3 - Y 1
Corto circuito AT hacia BT Corto [X1 - X2 - X3]a	10	H 1 - H 0	H 1 - H 0	H 1 - H 0	H 1 - H 0
	11	H 2 - H 0	H 2 - H 0	H 2 - H 0	H 2 - H 0
	12	H 3 - H 0	H 3 - H 0	H 3 - H 0	H 3 - H 0
Corto circuito AT hacia MT Corto [Y1- Y2 - Y3]a	13	H 1 - H 0	H 1 - H 0	H 1 - H 0	H 1 - H 0
	14	H 2 - H 0	H 2 - H 0	H 2 - H 0	H 2 - H 0
	15	H 3 - H 0	H 3 - H 0	H 3 - H 0	H 3 - H 0
Corto circuito BT hacia MT Corto [Y1- Y2 - Y3]a	16	X 1 - X 0	X 1 - X 0	X 1 - X 2	X 1 - X 2
	17	X 2 - X 0	X 2 - X 0	X 2 - X 3	X 2 - X 3
	18	X 3 - X 0	X 3 - X 0	X 3 - X 1	X 3 - X 1
Interdevanado Capacitivo AT hacia BT Todos los demás terminales abiertos	19	H 1 - X 1	H 1 - X 1	H 1 - X 1	H 1 - X 1
	20	H 2 - X 2	H 2 - X 2	H 2 - X 2	H 2 - X 2
	21	H 3 - X 3	H 3 - X 3	H 3 - X 3	H 3 - X 3
Interdevanado Capacitivo AT hacia MT Todos los demás terminales abiertos	22	H 1 - Y 1	H 1 - Y 1	H 1 - Y 1	H 1 - Y 1
	23	H 2 - Y 2	H 2 - Y 2	H 2 - Y 2	H 2 - Y 2
	24	H 3 - Y 3	H 3 - Y 3	H 3 - Y 3	H 3 - Y 3
Interdevanado Capacitivo BT hacia MT Todos los demás terminales abiertos	25	X 1 - Y 1	X 1 - Y 1	X 1 - Y 1	X 1 - Y 1
	26	X 2 - Y 2	X 2 - Y 2	X 2 - Y 2	X 2 - Y 2
	27	X 3 - Y 3	X 3 - Y 3	X 3 - Y 3	X 3 - Y 3
Interdevanado inductivo de AT hacia BT Tierra [H y X]b	28	H 1 - X 1	H 1 - X 1	H 1 - X 1	H 1 - X 1
	29	H 2 - X 2	H 2 - X 2	H 2 - X 2	H 2 - X 2
	30	H 3 - X 3	H 3 - X 3	H 3 - X 3	H 3 - X 3
Interdevanado inductivo de AT hacia MT Tierra [H y Y]b	31	H 1 - Y 1	H 1 - Y 1	H 1 - Y 1	H 1 - Y 1
	32	H 2 - Y 2	H 2 - Y 2	H 2 - Y 2	H 2 - Y 2
	33	H 3 - Y 3	H 3 - Y 3	H 3 - Y 3	H 3 - Y 3
Interdevanado inductivo de BT hacia MT Tierra [X y Y]b	34	X 1 - Y 1	X 1 - Y 1	X 1 - Y 1	X 1 - Y 1
	35	X 2 - Y 2	X 2 - Y 2	X 2 - Y 2	X 2 - Y 2
	36	X 3 - Y 3	X 3 - Y 3	X 3 - Y 3	X 3 - Y 3

Fuente: IEEE C57.149-2012

VI. Interpretación de la medición

Para el análisis e interpretación de resultados SFRA, se pueden implementar dos estrategias: **1.** identificar características esperadas de las huellas y **2.** comparar una huella con resultados de referencia. El objetivo principal del análisis SFRA es determinar la condición física del transformador, asegurando que los componentes internos no se hayan movido debido al transporte, daños en el aislamiento o corrientes de falla.

A. Propiedades de las graficas

Los diseños y configuraciones de los transformadores varían según su aplicación, lo que afecta los resultados de la prueba SFRA. Los trazos de SFRA en rangos de frecuencia específicos tienen un grado de previsibilidad: las bajas frecuencias reflejan características del núcleo, mientras que las características del devanado principal se observan en las respuestas de las pruebas de cortocircuito. Estas respuestas esperadas pueden identificar problemas básicos en un transformador. Además, las diferentes configuraciones de devanado exhiben patrones distintos debido a su relación entre las fases y el núcleo. Al comprender la relación entre el rango de frecuencias y la configuración del transformador, se pueden ubicar deformaciones físicas en rangos específicos de la gráfica.

Los diversos tipos de medición en las pruebas SFRA generan distintas formas y propiedades de trazo, pero los cambios esperados en los trazos en relación con la huella son similares. Algunas propiedades del trazo señalan deformaciones o degradaciones significativas en el aislamiento de un devanado. El indicador de cambio más relevante es la presencia o pérdida de picos de resonancia adicionales en la gráfica de magnitud-frecuencia. Otro indicador crucial es una variación en la frecuencia de resonancia para picos existentes, lo que puede indicar deformaciones en los bobinados.

Un trazo que incrementa en magnitud manteniendo una forma similar al trazo original al aumentar la frecuencia sugiere que un bobinado está flojo. Las diferencias en la gráfica de magnitud suelen ir acompañadas de variaciones significativas en la gráfica de ángulo de fase.

Cada tipo de prueba del SFRA tiene propiedades propias en el trazo, lo que implica que cada tipo de prueba tiene una gráfica asociada.

1) Ensayo de admitancia de circuito abierto: Esta prueba SFRA es la más comúnmente realizada. Similar a una prueba de corriente de excitación, cada devanado se excita por separado, mientras que todos los demás terminales permanecen abiertos. Las tensiones se miden en cada extremo del devanado excitado, tomando como referencia tierra. Esta prueba es adecuada para verificar el estado del núcleo, el bobinado principal y la derivación central.

Dependiendo de la configuración del bobinado, la sección de baja frecuencia adopta una forma distinta si existe alguna anomalía en el núcleo. Los bobinados de alta tensión muestran un patrón más visible en la región de baja frecuencia. Los devanados conectados en Y a menudo muestran una sola curva de resonancia distinta o dos resonancias estrechamente relacionadas entre 20 Hz y 5 kHz. Para las bobinas con conexiones en delta, generalmente se observan otras dos resonancias separadas en este mismo rango de frecuencia. Los devanados de baja tensión o terciarios tienden a seguir el mismo patrón, pero pueden estar muy influenciados por el devanado de alta tensión.

La región de frecuencia media está dominada por las impedancias de la red formada por el conjunto de bobinados; esta puede ser una red simple o compleja. Por encima de 500 kHz, los resultados siguen influenciados por la impedancia del bobinado principal, pero tienden a ser más sensibles a secciones geométricas más pequeñas, como derivaciones de los bobinados, derivaciones centrales y desplazamiento de las espiras.

2) Ensayo de admitancia de corto circuito: La prueba de corto circuito está diseñada para examinar los bobinados sin la influencia del núcleo. La influencia de la reluctancia del núcleo se observa en las frecuencias más bajas. Para analizar la influencia de la inductancia mayor del devanado sin la influencia del núcleo, los devanados secundarios están en cortocircuito. Esta configuración es similar a una prueba de impedancia de cortocircuito o prueba de reactancia de fuga.

La característica del trazo de la prueba de cortocircuito es similar a la prueba de circuito abierto, excepto en la región de bajas frecuencias. A frecuencias bajas, el aumento de la impedancia asociada con la resistencia del núcleo es eliminado, lo que resulta en un aumento global de la magnitud del trazo SFRA en esta región, con un ángulo de fase mayoritariamente inductivo.

La forma de la gráfica en las frecuencias bajas está dominada por la característica de primer orden de la inductancia del devanado principal. En un diagrama de Bode, se puede identificar una atenuación inductiva predecible, como se espera en sistemas de primer orden.

3) Ensayo de interdevanado capacitivo: Esta prueba evalúa la impedancia entre dos bobinados de diferente tensión, sin conexión galvánica entre ellos, ya que están aislados. Este trazo muestra una magnitud creciente en función de la frecuencia. En las frecuencias más bajas, la medición es altamente capacitiva debido a la configuración de circuito abierto entre los dos terminales de prueba. A medida que aumenta la frecuencia, se forman resonancias debido a las impedancias entre los dos bobinados de diferente tensión, con una tendencia general de aumento de magnitud.

4) Ensayo de interdevanado Inductivo: La prueba está diseñada para evaluar la relación de tensión entre dos devanados. La medición se efectúa uniendo dos terminales coincidentes que se conectan a tierra a cada lado, similar a una prueba de espiras de una sola fase. El trazo está dominado por la respuesta de magnitud en las frecuencias más bajas, equivalente a la relación de tensión entre los dos devanados. A frecuencias más altas, se forman resonancias que generalmente no se examinan, ya que no es el enfoque principal de esta prueba.

B. Análisis de Resultados

El análisis de resultados de SFRA se realiza comparando gráficas para determinar el estado del transformador. Las comparaciones pueden hacerse con datos anteriores, resultados de una unidad hermana o entre fases. Las huellas también pueden examinarse con patrones esperados, lo que requiere más experiencia pero previene la recolección de datos erróneos. Si el equipo de prueba es compatible, las conexiones son las mismas y no hay magnetismo residual, se espera que las comparaciones de datos sean casi perfectas.

Varias herramientas y algoritmos están disponibles para comparar y evaluar las mediciones de SFRA.

1) Análisis de correlación
    a) Estándar DL/T 911-2004
2) Visual - Análisis grafico

1) Análisis mediante coeficientes de correlación: Los coeficientes de correlación indican la similitud entre dos curvas. Otro término común para la correlación es coeficiente de correlación de Pearson o correlación producto-momento de Pearson. La correlación muestra cuán similar es un rango de números. La correlación toma un valor entre -1 y 1. Si el valor es cero (0), indica completa aleatoriedad entre los dos trazos inspeccionados. Cuanto más cerca esté la correlación de uno (1), más similares son los trazos. Si el valor es -1, indica una relación inversa. El objetivo del análisis es obtener un número lo más cercano a uno (1) posible, lo cual indica un alto nivel de correlación entre las dos curvas.

Los rangos individuales de frecuencia pueden ser analizados por correlación ajustando los límites de frecuencia del algoritmo de correlación. La correlación se obtiene mediante un algoritmo calculado con la ayuda de software SFRA especializado o programas matemáticos disponibles comercialmente. La covarianza, expresada como σxy, esta calcula cuánto se desvían dos curvas entre sí. Esto se expresa mediante (ecuación 1) y (ecuación 2). El coeficiente de correlación (ecuación 3) se calcula determinando la covarianza de las dos curvas bajo prueba. Para aislar ciertas regiones, los límites deben ser ajustados a más o menos infinito en el espectro en cuestión.

$$cov\,(X,Y) = \sigma xy \tag{1}$$

$$\sigma_{xy} = E\left[\overline{\left(X-\bar{X}\right)\left(Y-\bar{Y}\right)}\right] \tag{2}$$

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} - 1 \leq \rho \leq 1 \tag{3}$$

Donde:

σ_{xy} Covariaza de los datos medidos X y Y
E Media de la covarianza de X y Y
X Trazo de X y los datos medidos
$\bar{X}$ Media de los datos medidos de X
Y Trazo de Y y los datos medidos
$\bar{Y}$ Media de los datos medidos de Y
ρ Constante de correlación
σ_x Desviación estándar de los datos medidos de trazo de X
σ_y Desviación estándar de los datos medidos de trazo de Y

2) Análisis mediante datos de línea base: Una medición de línea SFRA se lleva a cabo en la fábrica cuando el transformador ha sido llenado con aceite y terminado, como parte de pruebas rutinarias para transformadores en servicio, o en una fecha temprana antes de la puesta en marcha en la subestación.

Los datos de referencia o previos deben ser repetibles. Si no hay cambios en el equipo bajo prueba, las curvas deben coincidir. Los trazos coincidentes se definen como resultados SFRA obtenidos de los mismos terminales de prueba y configuración del transformador.

Es importante destacar que la posición del OLTC y DETC afecta los resultados. Si la prueba se lleva a cabo en diferentes posiciones de tap, se deben presentar diferencias.

3) Análisis mediante transformadores similares: En transformadores genuinos de idéntica fabricación, diseño y construcción, se espera que los resultados de las pruebas realizadas sean coincidentes. Se debe tener precaución cuando se presenta similitud, ya que aunque un transformador parezca idéntico a otro en todos los aspectos, es posible que las dos unidades se hayan construido con algunas diferencias. Esto es más común cuando se adquieren dos transformadores idénticos para diferentes aplicaciones con varios meses o años de diferencia.

4) Análisis mediante comparación de fases: Las comparaciones de fase son las más complejas y requieren mayor experiencia del operario para realizarse correctamente. Algunos diseños de transformadores no son completamente simétricos, lo que provoca variaciones de fase a fase. Por esta razón, es crucial obtener los datos de referencia lo antes posible en la vida útil de un transformador. En la mayoría de los casos, las diferentes fases se superpondrán con una similitud razonable.

C. SFRA y relación con otros ensayos de diagnóstico

Existen diversos ensayos a frecuencia industrial que permiten identificar distintos problemas en los tranformadores; cada una de estas pruebas eléctricas básicas tiene relación con las diferentes configuraciones de SFRA.

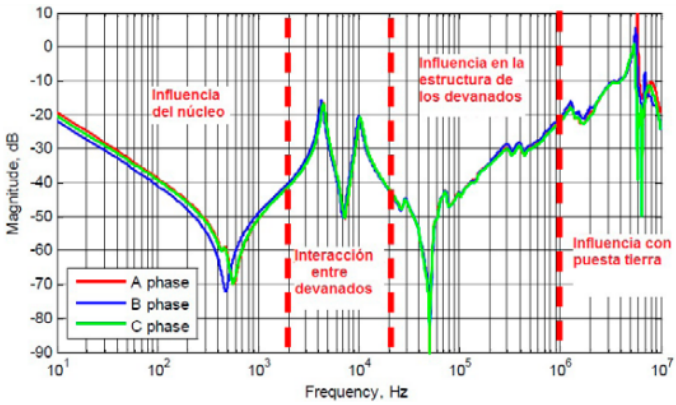
TABLE VII
RELACIÓN DE ENSAYOS DE ACUERDO A LA CONFIGURACIÓN DE SFRA

	SFRA	*Parámetro diagnosticado*	*Ensayo a 50/60 Hz*
Configuración	Admitancia circuito abierto	Núcleo y Devanados	Corriente de excitación
	Admitancia corto circuito	Devanados Reactancia Xcc	Reactancia de dispersión o fuga
	Interdevanado Capacitivo	Aislamiento interdevanado	Factor de potencia
	Interdevanado Inductivo	Relación de Espiras	Relación de transformación

D. Regiones de evaluación

Rangos de frecuencia donde se pueden determinar el tipo de falla, resumidas en la siguiente gráfica.

Fig. 5. Regiones de evaluación según la IEEE C57.149-2012



Fuente: IEEE C57.149-2012

E. Modos de falla

La prueba de SFRA es sensible a los defectos geométricos en un transformador, conocidos como modos de falla, que no siempre resultan en fallas catastróficas. Su popularidad se debe a su capacidad para detectar fallas mecánicas. Los modos de falla pueden incluir variaciones en el circuito magnético del núcleo y la resistencia de los contactos. Los resultados de SFRA pueden variar debido a un único tipo de falla o una combinación de varias. Las sobrecorrientes pueden causar fuerzas electromagnéticas que llevan a modos de falla compuestos, complicando el análisis, pero ayudando a comprender mejor la condición del transformador.

Mediante el análisis SFRA se pueden determinar los siguientes modos de falla

- Elongación axial del devanado
- Deformación radial del devanado
- Movimiento localizado
- Defectos en el núcleo
- Resistencia de contacto
- Devanado con cortocircuito
- Devanado en circuito abierto
- Devanado suelto debido al transporte
- Magnetismo residual

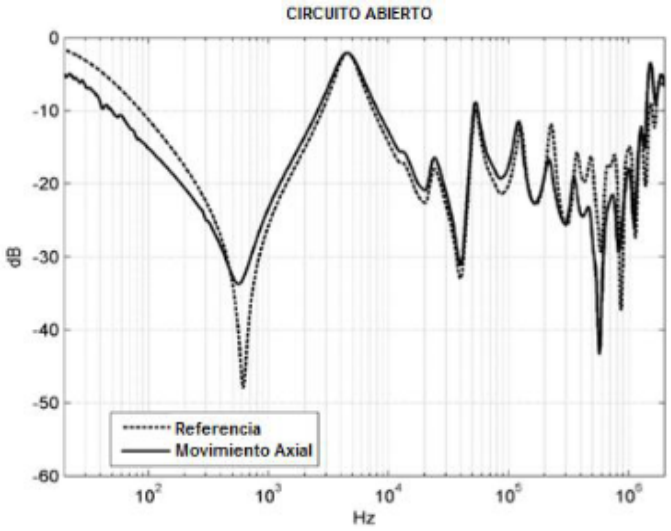
1) Elongación axial del devanado: Un movimiento axial del bobinado incluye dos tipos de cambios geométricos. El devanado se estira o "telescópica" y luego se contrae debido a una reducción en el radio de los devanados. Las variaciones geométricas inducidas por este tipo de falla son complejas y pueden causar múltiples resonancias cambiantes a través de una amplia gama de frecuencias.

TABLE VIII
ELONGACIÓN AXIAL DEL DEVANADO

Rango de frecuencias	**Elongación axial de devanado** Suponiendo, no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	**Pruebas de circuito abierto:** Esta región (región del núcleo) generalmente no es afectada durante la deformación axial de bobinado. **Pruebas de cortocircuito:** Resulta un cambio en la impedancia. La curva de SFRA para el devanado afectado causa una diferencia entre fases o resultados previos en la parte inductiva.
5kHz - 100 kHz	**Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:** La deformación de bobinado axial es más evidente en este rango. El daño en el bobinado cambia o produce nuevos picos de resonancia y valles en función de la gravedad de la deformación. Los cambios serán mayores para la bobina afectada, pero es posible tener los efectos transferidos de otros devanados.
50 kHz - 1 MHz	**Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:** La deformación axial de bobinado puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles dependiendo de la severidad de la deformación. Los cambios serán mayores para el bobinado afectado, pero todavía es posible tener los efectos transferidos de los otros devanados.
> 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y corto circuito:** La respuesta a la deformación axial de bobinado es impredecible.

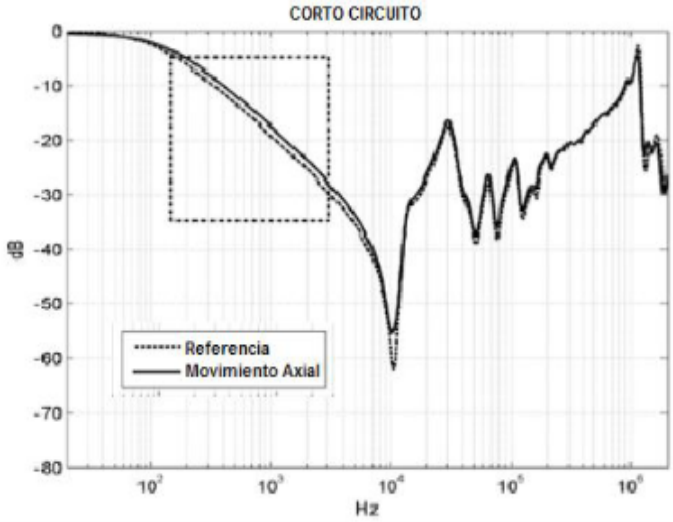
Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 6. Curvas características de elongación axial



Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 7. Curvas características de elongación axial



Fuente: IEEE C57.149-2012

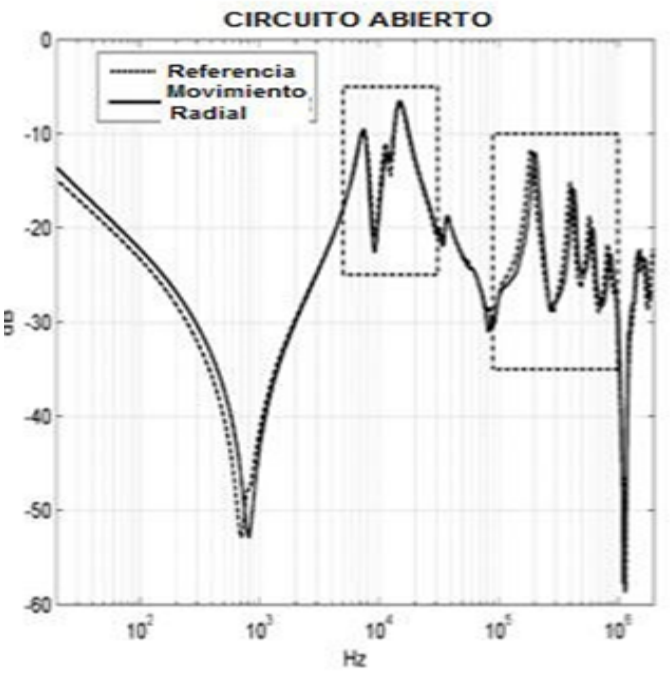
2) Deformación radial del devanado: También conocida como "pandeo de aro", es una falla de compresión del bobinado caracterizada por un cambio significativo en la geometría radial de los devanados. Este tipo de falla puede ser causado por fuerzas electromagnéticas intensas debido a sobrecorrientes. El arrollamiento se somete a alta compresión radial (hacia adentro) y termina con un "pandeo" en toda su extensión. Las fuerzas se concentran en los devanados internos. La deformación radial puede ocurrir de dos maneras: libre y forzada.

TABLE IX
DEFORMACIÓN RADIAL DEL DEVANADO

Rango de frecuencia	Deformación radial del devanado Si no existen otros modos de falla
20 Hz –10 kHz	**Pruebas de circuito abierto:** La región del núcleo no es afectada durante la deformación radial de devanado. **Pruebas de cortocircuito:** Se aumenta la impedancia. La curva SFRA en la fase afectada muestra una ligera atenuación hacia la parte interna.
5 kHz - 100 kHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** El pico mayor de resonancia puede cambiar o se pueden producir nuevos picos de resonancia y valles dependiendo de la severidad de la deformación. Éste cambio es mínimo y difícil de identificar. Los cambios serán mayores para los devanados afectados, pero esto puede ser posible por los efectos de los otros devanados. La respuesta en esta región debe ser utilizada como segunda evidencia para apoyar el análisis.
50 kHz – 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** La deformación radial de bobinado es más evidente en este rango. Se puede desplazar o producir nuevos picos y valles de resonancia dependiendo de la severidad de la deformación. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero todavía es posible tener efectos transferidos de otros devanados.
> 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Éste rango generalmente no se ve afectado por este modo de falla, sin embargo un fallo grave puede extender sus efectos en esta zona.

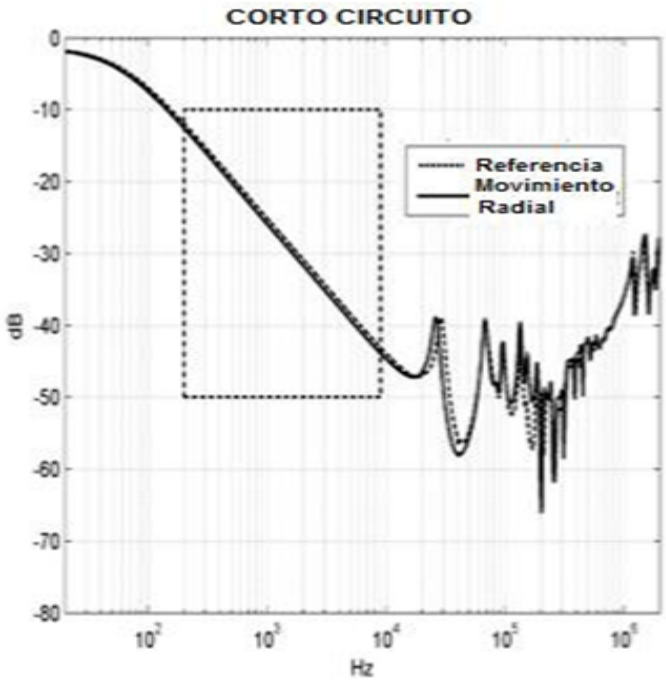
Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 8. Curvas características de deformación radial



Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 9. Curvas características de deformación radial



Fuente: IEEE C57.149-2012

3) Movimiento localizado: Este modo de falla está relacionado con el movimiento global de los devanados o de alguna sección de un devanado. Las causas pueden deberse a varias razones, como el choque físico, el paso de alta corriente o el transporte. El movimiento físico del transformador podría ser debido al envío o a la actividad sísmica.

TABLE X
MOVIMIENTO LOCALIZADO

Rango de frecuencias	Movimiento localizado. Si no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	**Pruebas en circuito abierto:** Esta región (región central) generalmente no es afectada durante un movimiento de bobinado. **Pruebas de cortocircuito:** Esta región generalmente no es afectada durante un movimiento de bobinado. Todas las fases deben ser similares.
5 kHz - 100 kHz	**Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:** Movimiento localizado en un devanado es más evidente en este rango de frecuencias. En la curva de resonancia puede darse la creación de picos o valles los cuales son un indicador clave. El movimiento del bobinado principal puede cambiar o producir nuevos picos y valles de resonancia dependiendo de la magnitud del movimiento. Los cambios serán mayores para la fase afectada.
50 kHz - 1 MHz	**Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:** Generalmente, este rango de frecuencias no se ve afectado. Sin embargo, los cambios en la capacitancia CL pueden ocasionar cambios de resonancia en la parte superior de este rango de frecuencias.
> 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Los cambios en la capacitancia CL pueden causar cambios de la curva de resonancia a estas frecuencias.

Fuente: IEEE C57.149-2012

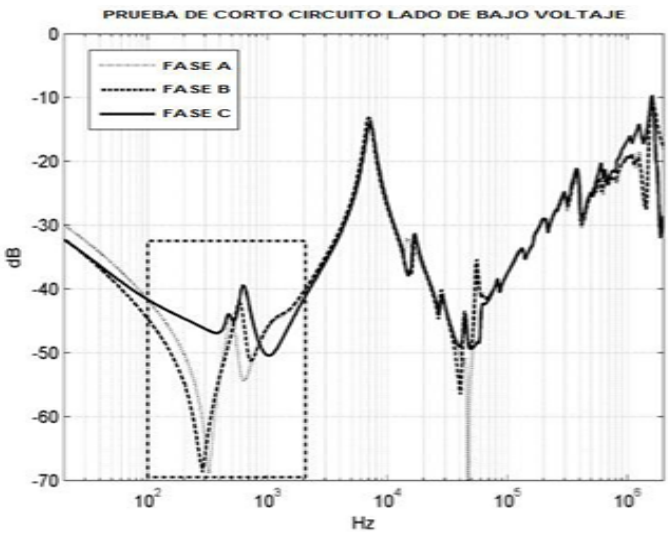
4) Defectos en el núcleo: Defectos o fallas en el núcleo generan cambios en el circuito magnético. Estos defectos pueden incluir láminas del núcleo quemadas o en cortocircuito, partes aterrizadas, pérdida de conexión al sistema de puesta tierra y desajustes.

TABLE XI
DEFECTOS EN EL NÚCLEO

Rango de frecuencias	Defectos en el núcleo. Si no existen otros modos de falla
20 Hz – 10 kHz	**Pruebas de circuito abierto:** Estos tipos de falla afectarán a las regiones inferiores de frecuencia generalmente por debajo de 10 kHz. Defectos en el núcleo a menudo cambian el tramo inicial de la curva de resonancia. Menos importancia se le debe dar a los tramos superiores de la curva, ya que identificar defectos puede ser enmascarado por los efectos de la magnetización residual del núcleo. Si se observa carga en circuito abierto (es decir, se parece a una respuesta de cortocircuito), esto puede indicar un defecto en el núcleo. **Pruebas de cortocircuito:** Esta región generalmente no se ve afectada cuando hay daños en el núcleo. Todas las fases deben ser similares.
5 kHz - 100 kHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** En este rango de frecuencias puede haber cambios o producir nuevos picos de resonancia y valles.
50 kHz - 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Generalmente, este rango de frecuencias no se ve afectado. Sin embargo, si la falla se debe a problemas con la tierra del núcleo, los cambios de la curva de resonancia pueden aparecer en la parte superior de este rango de frecuencias.
> 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Cambios en la capacitancia CL pueden causar cambios de resonancia.

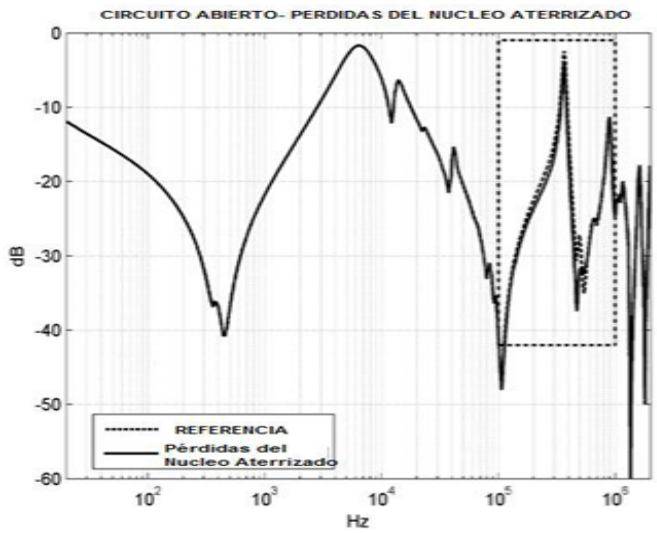
Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 10. Curvas características de defectos en el núcleo



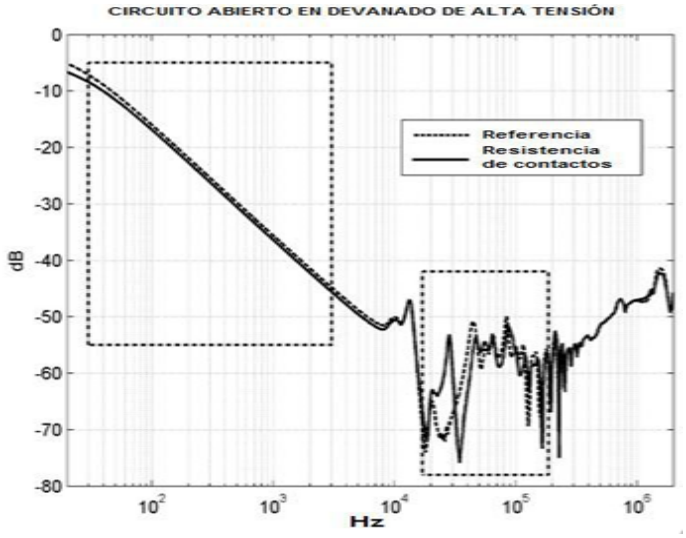
Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 11. Curvas características de defectos en el núcleo



Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 12. Curvas caracteríticas de resistencia de contactos



Fuente: IEEE C57.149-2012

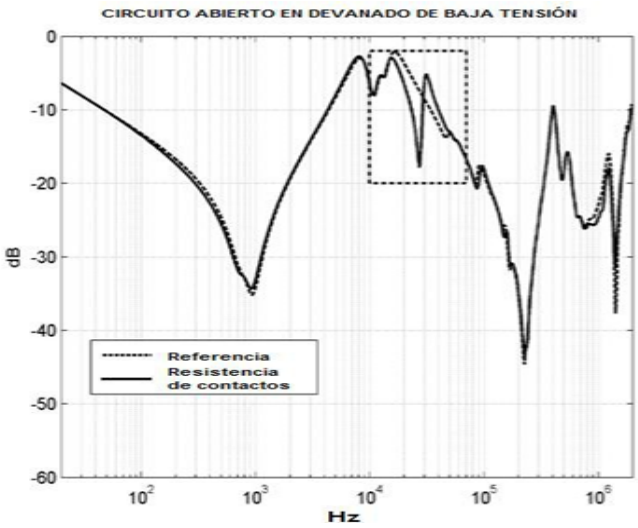
5) Resistencia de contacto: Aunque no es necesariamente un modo de falla clásico, las resistencias altas de contacto pueden detectarse mediante pruebas SFRA. Cualquier metal en la superficie de contacto que se conecte a los devanados, OLTC o DETC puede generar impedancias más altas en la prueba aplicada. El resultado final puede causar variaciones en las frecuencias altas y bajas. La baja resistencia de contacto puede ser causada por conexiones sueltas, quemaduras o corrosión.

TABLE XII
RESISTENCIA DE CONTACTOS

Rangos de frecuencia	**Resistencia de contacto** Suponiendo no existe otro tipo de falla
20 Hz - 10 kHz	**Pruebas en circuito abierto:** Esta región (región del núcleo) generalmente no se ve afectada por la presencia de resistencia de contactos. **Pruebas de cortocircuito:** Los resultados obtenidos no se comparan bien con los resultados anteriores o entre fases. El bobinado afectado generalmente esta desplazado.
5 kHz - 100 kHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** En este rango la curva puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.
50 kHz - 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.
> 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.

Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 13. Curvas caracteríticas de resistencia de contactos



Fuente: IEEE C57.149-2012

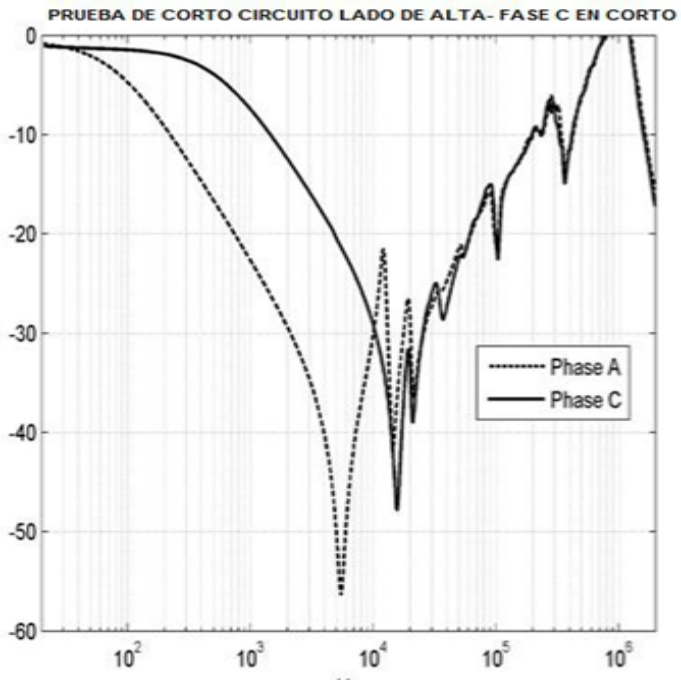
6) Cortocircuito entre espiras: Este tipo de falla es uno de los modos más sencillos de identificar mediante la prueba de SFRA. Los cortocircuitos pueden ocurrir entre dos espiras adyacentes o entre fases. El cortocircuito puede ser de baja impedancia, sólido o de alta resistencia a la trayectoria de fuga.

TABLE XIII
CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS

Rangos de frecuencia	Cortocircuito entre espiras Si no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	**Pruebas de circuito abierto:** Este modo de falla de corto circuito elimina los efectos de la reluctancia del núcleo de los resultados de SFRA para circuito abierto. La curva de circuito abierto SFRA asume un comportamiento similar a la prueba de cortocircuito. Las bobinas afectadas mostrarán el mayor cambio. Este modo de falla también afectará a las respuestas SFRA para todos los otros devanados. **Pruebas de cortocircuito:** Los resultados no se comparan favorablemente con datos de prueba anteriores o entre fases. El bobinado afectado está generalmente desplazado.
5 kHz - 100 kHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.
50 kHz - 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.
> 1 MHz	**Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:** Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada

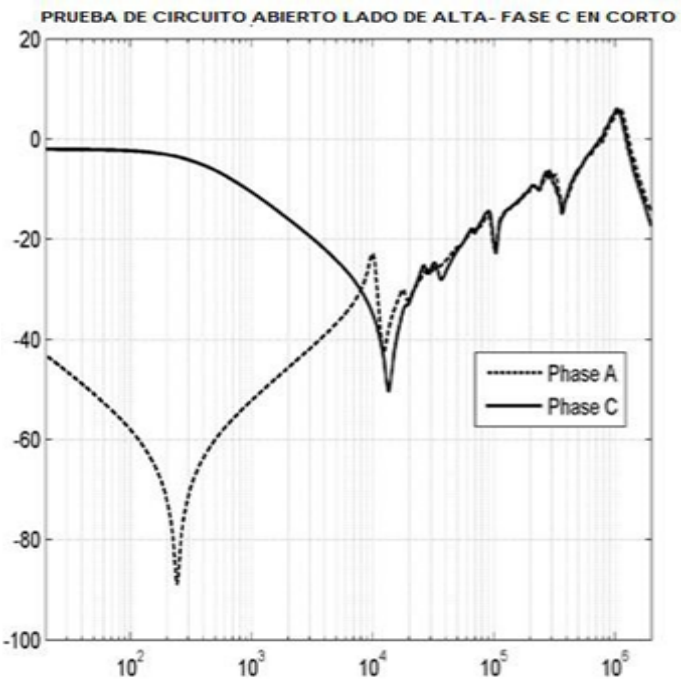
Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 14. Curvas características de cortocircuito entre espiras



Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 15. Curvas características de cortocircuito entre espiras



Fuente: IEEE C57.149-2012

7) Devanado en circuito abierto: Un circuito abierto puede ser causado por conexiones flojas o bobinas quemadas debido a fallas catastróficas por temperatura. Esto resulta en una alta impedancia en el circuito de medición. La función de transferencia se reduce en un amplio espectro y, en circuitos abiertos completos, los resultados a menudo se pierden en el ruido de fondo.

TABLE XIV
DEVANADO EN CIRCUITO ABIERTO

Rango de frecuencias	Devanado en circuito abierto Si no existen otro modos de falla
20 Hz – 10 kHz	**Prueba de circuito abierto:** La primera parte de la curva de resonancia cambia teniendo en cuenta la falla de devanado. **Prueba de corto de circuito:** Los resultados no se compararan bien contra información anterior o entre fases. El devanado afectado es generalmente desplazado (offset).
5 kHz – 100 kHz	**Prueba de circuito abierto y corto circuito:** La influencia del devanado en circuito abierto es más obvia en este rango. Se crean picos de resonancia predominantes o valles que son el indicador clave. Para este rango se pueden cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores en la fase afectada.
50 kHz – 1 MHz	**Prueba de circuito abierto y corto circuito:** En este rango se pueden cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.
> 1 MHz	**Prueba de circuito abierto y corto circuito:** En este rango se pueden cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.

Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 16. Curvas características de devanado en circuito abierto



Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 17. Curvas características de devanado en circuito abierto



Fuente: IEEE C57.149-2012

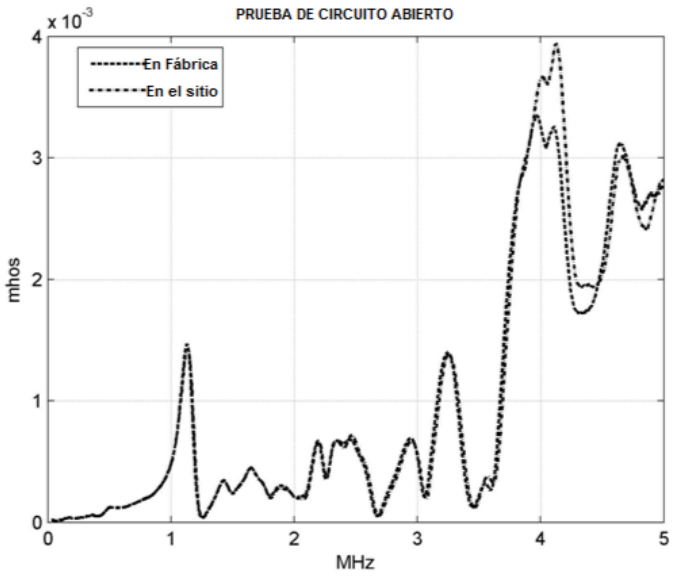
8) Devanados sueltos: Un devanado suelto puede describirse como un desprendimiento gradual del bobinado, generando una distancia axial a lo largo del mismo. Esta falla particular, debida al transporte, se detecta al realizar la prueba sin aceite antes y después de transportar el transformador y comparar las funciones de transferencia. Al aplicar la prueba FRA sin aceite, se puede notar alta actividad en las frecuencias altas debido a la reducción de capacitancia del bobinado. Una deformación física por el transporte genera una diferencia en la curva de resonancia para frecuencias altas de 2MHz a 5MHz.

TABLE XV
DEVANADOS SUELTOS

Rango de frecuencias	Devanado suelto Si no existen otro modos de falla
20 Hz – 500 kHz	**Prueba de circuito abierto:** Esta región generalmente no se ve afectada por la presencia de devanados sueltos,
500 kHz – 2 MHz	**Prueba de circuito abierto:** En este rango se pueden producir algunas diferencias detectables en aumento en las funciones de transferencia con el incremento de la frecuencia. Las diferencias serán mayores para los devanados más afectados.
1 MHz – 5 MHz	**Prueba de circuito abierto y corto circuito:** En este rango produce las mayores diferencias crecientes en las funciones de transferencia a medida que aumenta la frecuencia. Las diferencias serán mayores para los devanados más afectados.

Fuente: IEEE C57.149-2012

Fig. 18. Curva característica de devanado suelto



Fuente: IEEE C57.149-2012

9) Magnetismo residual: Aunque no es necesariamente una falla, el magnetismo remanente debe identificarse para no interpretarlo como una falla real. La magnetización residual es la densidad de flujo que permanece en el núcleo. Pruebas de resistencia de devanado DC, operaciones de conmutación y fenómenos geomagnéticos son fuentes de este fenómeno residual. Puede identificarse por el desplazamiento hacia la derecha en las bajas frecuencias de la curva de resonancia en comparación con los resultados sin efectos magnetizantes. La magnetización residual puede eliminarse desmagnetizando el núcleo, y esto debe realizarse si existe preocupación por esta condición en el núcleo.

VII. Ejecución de pruebas en campo

Las pruebas realizadas en campo fueron supervisadas, ejecutadas y controladas por personas altamente calificadas en pruebas eléctricas, seguridad industrial y ocupacional.

A. Transformador No. 1

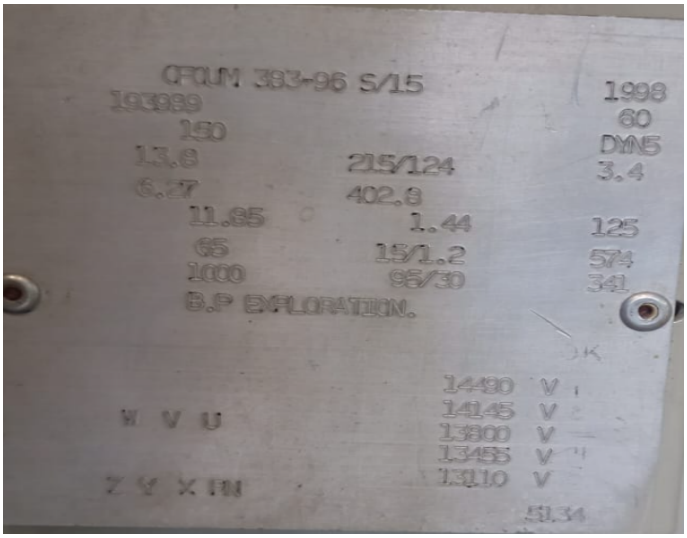
Transformador ubicando en la bodega de la empresa Transequipos S.A, a continuación se describe el procedimiento y el análisis de resultados.

Fig. 19. Transformador Siemens Bodega Transequipos



Transformador marca Siemens, trifásico bidevanado, de 150kVA, grupo vectorial Dyn5, a continuación se presentan todas sus características en la placa de identificación.

Fig. 20. Placa de características



Para realizar la prueba se implementa el equipo de medida FRAX 101 de Megger con sus accesorios.

Fig. 21. Equipo de medida FRAX 101

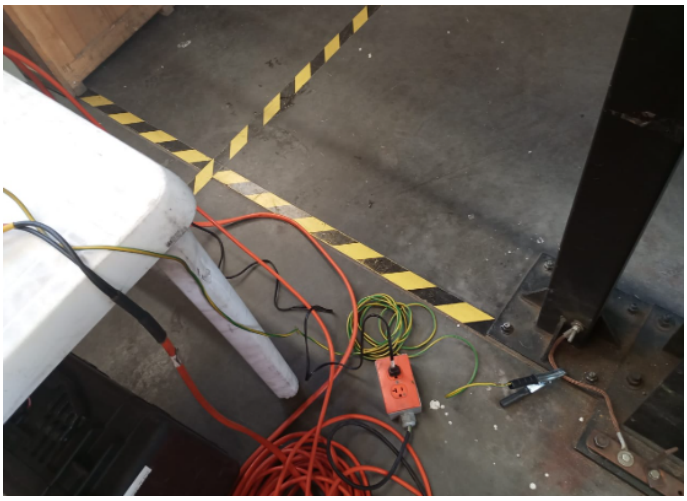


1) Acondicionamiento del entorno de prueba: Se da inició comprobando que el transformador bajo prueba este completamente desconectado de la fuente de alta tensión o del sistema de potencia, y que el tanque del transformador estuviera correctamente conectado a tierra.

2) Acondicionamiento de transformador: Seguido se verifica que el objeto de prueba se encuentre completamente desconectado de sus bujes externos, los cuales incluye, conexiones de neutro, conexiones de fase, tierras terciarias y bobinas de estabilización.

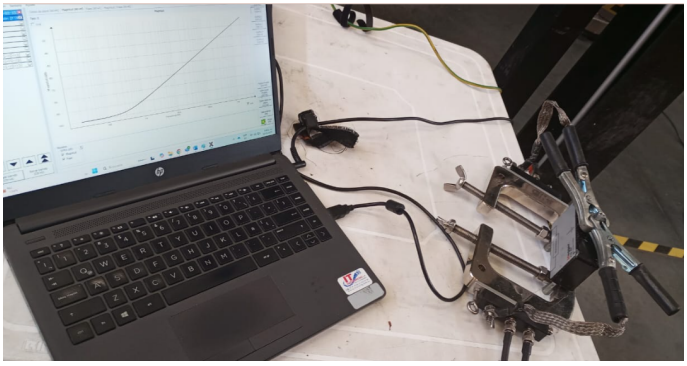
3) Prueba de equipo de medida y cables: El equipo de medida se debe conectar al sistema de puesta a tierra, su conexión debe ser en el mismo punto donde se encuentra conectado el transformador.

Fig. 22. Conexión a SPT



Para identificar que los cables de ”fuente”, ”referencia” y ”medida”, se encuentren en correctas condiciones se debe realizar la prueba de auto-evaluación del equipo de medida, implementando el instrumento estándar (FTB101) y verificando con una curva SFRA conocida suministrada por el fabricante del equipo.

Fig. 23. Auto-evaluación con FTB 101 y curva de verificación



4) Configuración del ensayos SFRA: Previo a la configuración de los ensayos, se deben registrar los datos del equipo bajo prueba, en los formatos establecidos por la empresa (Transequipos S.A), además se debe medir la temperatura ambiente y humedad relativa.

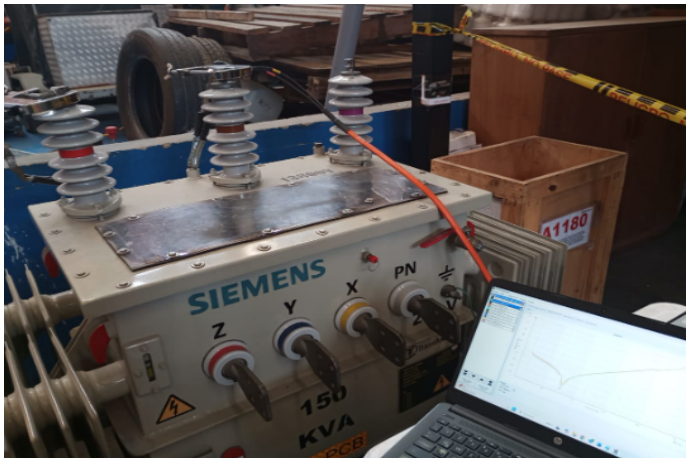
De acuerdo a lo establecido por la IEEE. C57.149-2012, se recomienda como mínimo realizar todas las pruebas de admitancia de circuito abierto y cortocircuito, seguido se realizan las conexiones de la tabla 1 para transformadores bidevanados.

5) Admitancia de circuito abierto: Cada devanado se excita por separado, mientras que todos los demás terminales permanecen abiertos. Las tensiones se miden en cada extremo del devanado excitado, tomando como referencia tierra.

Fig. 24. Prueba de Admitancia de circuito abierto H2-H1/H3-H2/H1-H3



Conexión H2-H1



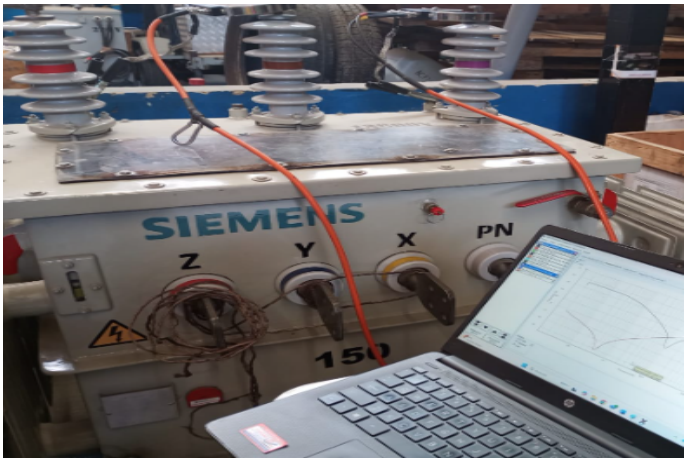
Conexión H3-H2



Conexión H1-H3

6) Admitancia de cortocircuito: La medición de cortocircuito se realiza en el extremo de alta tensión del transformador, mientras que el devanado de baja tensión asociado está en cortocircuito. Para efectos de repetibilidad y para crear el modelo equivalente de cortocircuito, todas las bobinas de baja tensión deben estar en cortocircuito en transformadores trifásicos.

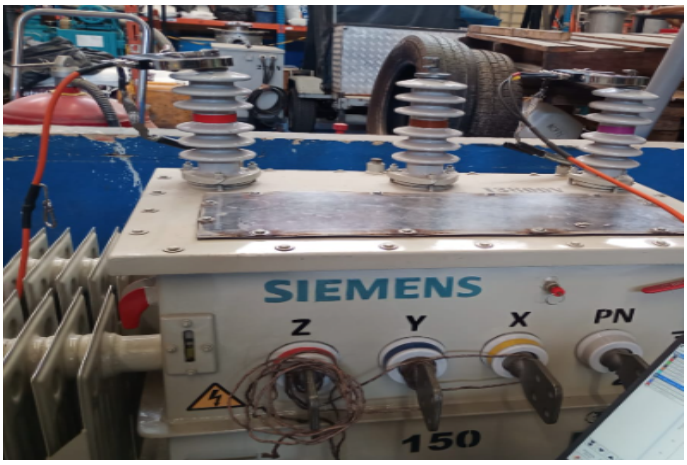
Fig. 25. Prueba de Admitancia de cortocircuito



Conexión H2-H1 (Corto X1-X2-X3)



Conexión H3-H2 (Corto X1-X2-X3)



Conexión H1-H3 (Corto X1-X2-X3)

7) Resultados del ensayo al transformador No. 1: Los resultados de la prueba se presentan a continuación, mostrando las curvas de magnitud y fase obtenidas en cada tipo de conexión, así como el análisis de acuerdo a la correlación que genera el software del equipo.

Análisis de correlación mediante el analizador DL/T 911-2004, comparación entre fases.

Fig. 26. **Resultados prueba de admitancia de circuito abierto Alta tensión**

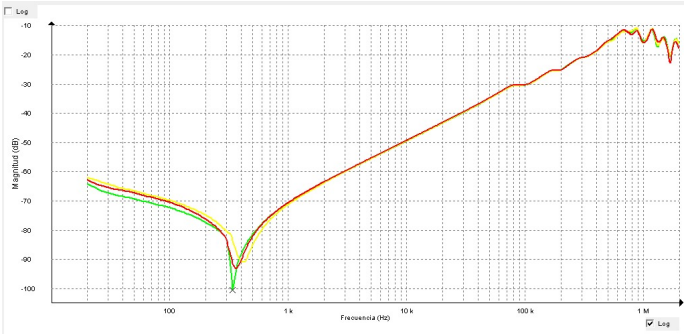


Fig. 27. Análisis de correlación DL/T 911-2004

Interpretación de acuerdo a DL/T 911-2004, China 01-06-2005

Análisis de la Respuesta en Frecuencia en deformación de devanados de Transformadores de Potencia

	Valor	Distorsión severa	Distorsión Obvia	Distorsión ligera	Normal
R-LF (1kHz - 100kHz)	4.77	R-LF < 0.6	0.6 < R-LF < 1	1 <=R-LF < 2	2 <= R-LF
R-MF (100kHz - 600kHz)	4.15		R-MF < 0.6	0.6 <=R-MF < 1:	1 <= R-MF
R-HF (600kHz - 1MHz)	1.91				0.6 <= R-HF

Conclusión: Normal

Fig. 28. **Resultados prueba de admitancia de circuito abierto Baja tensión**

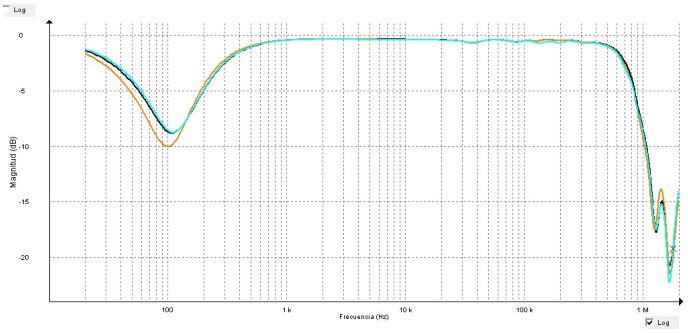


Fig. 29. Análisis de correlación DL/T 911-2004

Interpretación de acuerdo a DL/T 911-2004, China 01-06-2005

Análisis de la Respuesta en Frecuencia en deformación de devanados de Transformadores de Potencia

	Valor	Distorsión severa	Distorsión Obvia	Distorsión ligera	Normal
R-LF (1kHz - 100kHz)	2.45	R-LF < 0.6	0.6 < R-LF < 1	1 <=R-LF < 2	2 <= R-LF
R-MF (100kHz - 600kHz)	2.80		R-MF < 0.6	0.6 <=R-MF < 1:	1 <= R-MF
R-HF (600kHz - 1MHz)	3.95				0.6 <= R-HF

Conclusión: Normal

Fig. 30. **Resultados prueba de admitancia de cortocircuito**

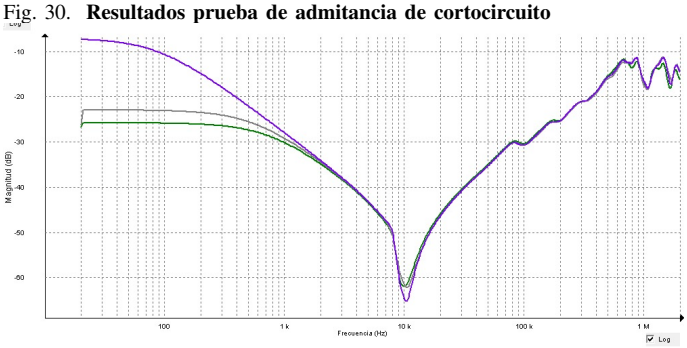


Fig. 31. Análisis de correlación DL/T 911-2004

Interpretación de acuerdo a DL/T 911-2004, China 01-06-2005

Análisis de la Respuesta en Frecuencia en deformación de devanados de Transformadores de Potencia

	Valor	Distorsión severa	Distorsión Obvia	Distorsión ligera	Normal
R-LF (1kHz - 100kHz)	2.76	R-LF < 0.6	0.6 < R-LF < 1	1 <=R-LF < 2	2 <= R-LF
R-MF (100kHz - 600kHz)	2.92		R-MF < 0.6	0.6 <=R-MF < 1:	1 <= R-MF
R-HF (600kHz - 1MHz)	0.78				0.6 <= R-HF

Conclusión: Normal

Fig. 33. Placa de características

Número de serie	P9-108039-12310
Potencia (kVA)	10000
Tensión AT (V)	115000
Tensión BT (V)	6600
Marca	Siemens
Año de Fabricación	1991
Vol. Aceite (Gal)	2125.8
Tipo conmutador	OLTC (Bajo carga)
No. posiciones	21
Posición actual	11b
Grupo vectorial	YNd1
Tipo de refrigeración	ONAF
Medio de aislamiento	Aceite mineral

B. Transformador No. 2

Fig. 32. Transformador Siemens Subestación Tominé



Transformador ubicado en subestación embalse Tominé, marca Siemens, de 10 MVA, grupo vectorial YND1, a continuación se presentan sus características en la placa de identificación.

Al transformador se le realiza prueba de SFRA antes y después de realizar un mantenimiento correctivo, durante este mantenimiento se realiza tratamiento de aceite el cual se ve reflejado en las gráficas, acontinuación se presentan los resultados luego de aplicar los pasos anteriormente descritos.

Fig. 34. Resultado antes y después admitancia de circuito abierto H1-H0

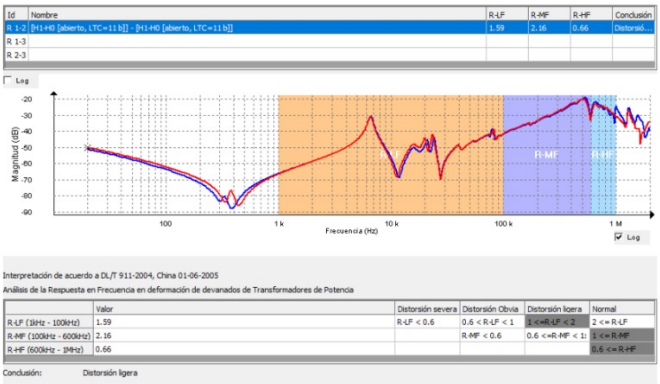


Fig. 35. Resultado antes y después admitancia de circuito abierto H2-H0

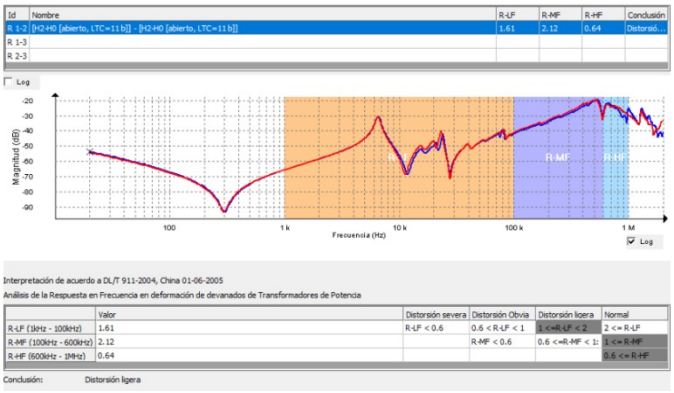


Fig. 36. Resultado antes y después admitancia de circuito abierto H3-H0

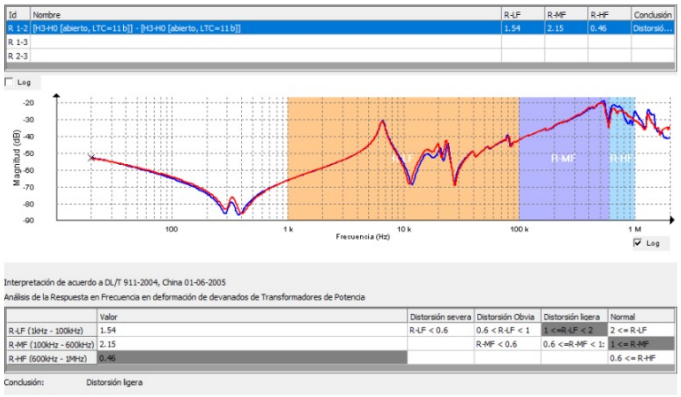


Fig. 37. Resultado antes y después admitancia de circuito abierto X1-X2

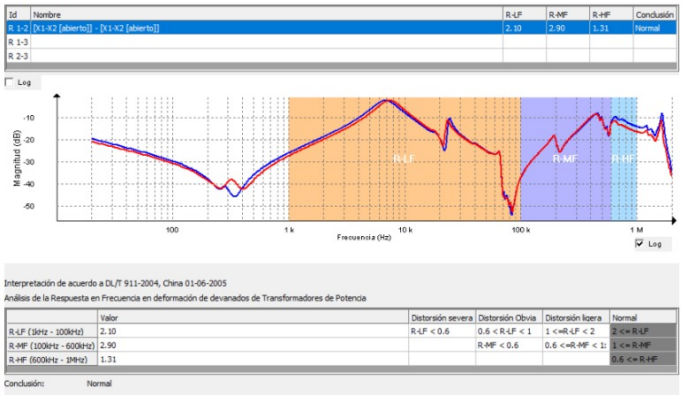


Fig. 38. Resultado antes y después admitancia de circuito abierto X2-X3

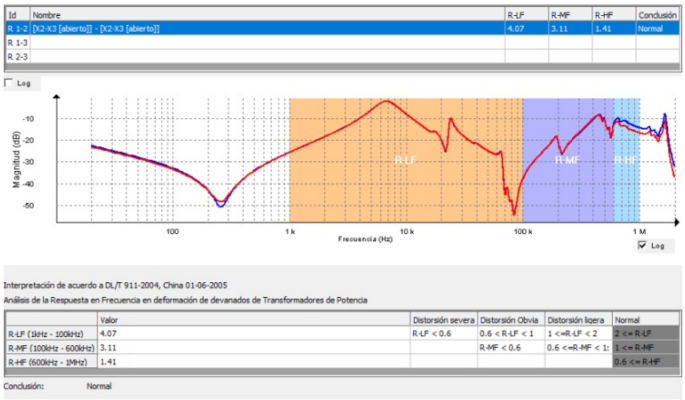


Fig. 39. Resultado antes y después admitancia de circuito abierto X3-X1

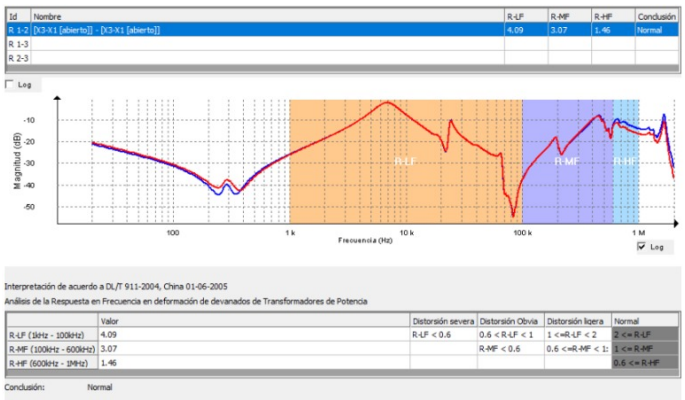


Fig. 40. Resultado antes y después admitancia de Cortocircuito H1-H0

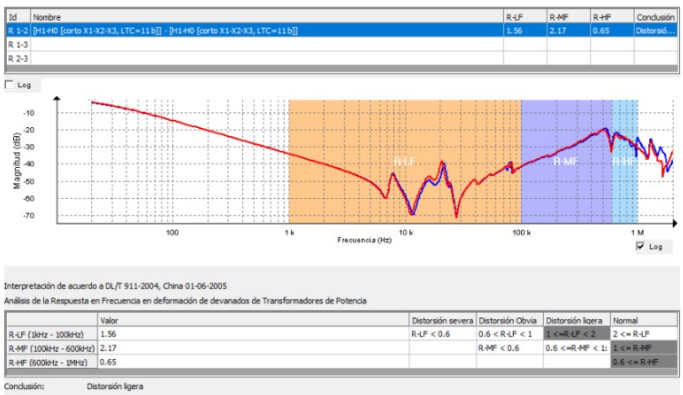
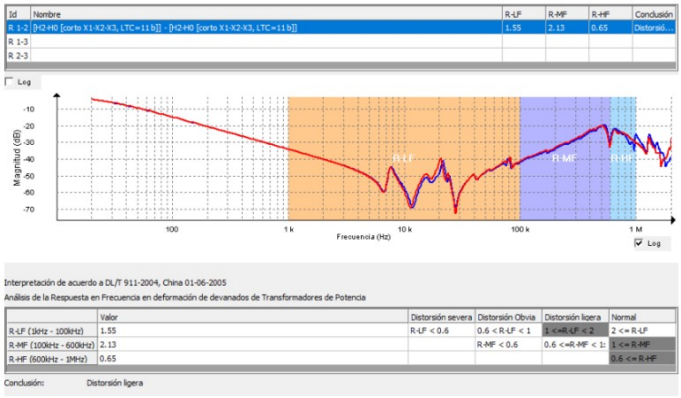


Fig. 41. Resultado antes y después admitancia de Cortocircuito H2-H0



VIII. Observaciones

- De acuerdo a las comparaciones entre las pruebas iniciales y finales del transformador No. 2, se detectan variaciones en las bajas y medias frecuencias. Esto es lo esperado, ya que, debido al tratamiento de aceite efectuado, cambian las propiedades internas del transformador (red RLC compleja del transformador), haciendo que estos cambios sean normales. La respuesta entre bobinas sigue siendo igual, lo que indica que la simetría entre ellas es correcta y se mantiene después del tratamiento.
- Basado en los resultados obtenidos, el transformador No.1 se encuentra en condiciones normales y sus propiedades internas no muestran ninguna variación.

IX. Presupuesto para la ejecución de la prueba

Presupuesto para la implementación de la prueba SFRA en mantenimiento predictivo de transformadores.

- Equipo FRAX, incluye el software de análisis, $103.375.000 COP
- Capacitación y certificación del personal para diagnóstico de SFRA, $10.337.500 COP
- Desarrollo de procedimientos y protocolos, $4.135.000 COP
- Calibración anual del equipo, $8.270.000COP
- Reposición de accesorios, $3.308.000COP
- Total costos de implementación $129.425.500COP

Este presupuesto es estimado y puede variar según las necesidades específicas de cada empresa. Para no asumir costos elevados, se recomienda recurrir a empresas especializadas en este tipo de actividad, como Transequipos S.A., una empresa certificada y de alta calidad en el mantenimiento y diagnóstico de transformadores.

X. Conclusiones

- La prueba SFRA es eficaz para la detección temprana de deformaciones y defectos estructurales en transformadores de potencia, previniendo fallas catastróficas.
- Al garantizar la integridad mecánica de los transformadores, la prueba SFRA contribuye a la confiabilidad y continuidad del sistema eléctrico, evitando interrupciones repentinas y costosas.
- SFRA verifica la integridad mecánica de los transformadores después del transporte, asegurando que no hayan sufrido daños mecánicos durante el traslado.
- Es importante tener registro de las huellas digitales de los transformadores para asegurar una amplia vida útil del activo
- La prueba SFRA utiliza un método comparativo para evaluar el estado del transformador, comparando los resultados actuales con referencias previas o de transformadores similares.
- Durante el desarrollo del presente documento se incluyeron todos los objetivos propuestos para el cumplimiento de la pasantía.

References

[1] CIGRE Technical Brochure N° 342 “Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)” April 2008.
[2] IEEE C57.149 - 2012, “IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers”.
[3] IEC 60076-18 - 2012, “Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response”.
[4] DL/T 911 - 2004, “Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”. The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China