

**PRUEBA DE RESPUESTA DE BARRIDO EN FRECUENCIA PARA  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA: DOCUMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE  
LA PRUEBA CON BASE EN LA GUÍA IEEE STD.C57.149<sup>TM</sup>-2012.**

**LENNIS ERNESTO CHAPARRO GRANADOS  
MÓNICA RONDÓN GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2015**

**PRUEBA DE RESPUESTA DE BARRIDO EN FRECUENCIA PARA  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA: DOCUMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE  
LA PRUEBA CON BASE EN LA GUÍA IEEE STD.C57.149<sup>TM</sup>-2012.**

**LENNIS ERNESTO CHAPARRO GRANADOS  
MÓNICA RONDÓN GARCÍA**

**Trabajo de Grado para optar al título de: Ingeniero Electricista**

**Director:  
GERARDO LATORRE BAYONA  
Ingeniero Electricista, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **DEDICATORIA**

*A papito DIOS por ser mi bastón, mi guía, mi luz y mi todo. Sin Él, simplemente imposible de lograrlo.*

*A mi Madre por darme la vida, el apoyo y las oportunidades para crecer en todo sentido.*

*A Mare; mi esposa, amante y amiga por estar siempre ahí, en todo momento y por darme la bendición de ser Padre.*

*A mis hijos, Matteo y Matias por ser el motor de mi vida y la razón de ser.*

*A mis hermanos Angelo, Claudia y Leidy por estar pendientes de mí y brindarme su apoyo.*

**Lennis Ernesto Chaparro Granados**

## DEDICATORIA

“Realmente soy un soñador práctico; mis sueños no son bagatelas en el aire. Lo que yo quiero es convertir mis sueños en realidad”.

*Mahatma Gandhi (1869-1948)*

*A mis padres Guillermo y Betty quienes con todo su apoyo, entrega, ejemplo, amor y sacrificio, me dieron la valentía para luchar por mis sueños. Los Amo.*

*A mi prometido Andrés Suárez por su apoyo incondicional y por caminar a mi lado en esta etapa de mi vida. Te Amo.*

*A mi hermano compañero y amigo Juan Guillermo por su vital colaboración.*

*A mi familia, amigos y profesores que aportaron de alguna manera en la consecución de este logro.*

***Mónica Rondón García.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Ha sido uno camino con muchas enseñanzas; por lo que no es fácil nombrar a todas las personas que han contribuido y han hecho parte en la realización de este logro.

Primero que todo debo agradecer a papito DIOS por darme la fortaleza para seguir adelante y por rodearme de personas que a diario han compartido sus conocimientos y experiencias.

Mi familia es el pilar que sostiene mi vida y en especial mi Madre, mi esposa y mis hijos; son los responsables del alcance de este objetivo.

A mi padre Ernesto que aunque nuestra relación no ha sido ideal, se ha convertido en un apoyo más en mi vida.

La Universidad Industrial de Santander, mi segundo hogar, donde mi vida se ha transformado y he conseguido lo que hasta hoy me rodea.

La misión de la Academia es posible gracias a sus maestros, por tal motivo mis más sinceros agradecimientos a ellos; en especial al profesor Gerardo Latorre Bayona, Director y actor fundamental de este proyecto. También cito a los profesores Johan Petith, Liliana Jaimes, José Amaya, Gabriel Ordoñez, Cesar Duarte, Julio Cesar Chacón y al maestro de todos, el profesor Julio Rúgeles. Gracias a sus aportes y conocimientos transmitidos.

Mis amigos y compañeros William, Marvin, Sergio Ramírez, Fredy Bautista, José Luis Calderón, Sergio Betas, Diego Carreño, Francisco Cordero, Ricardo Vanegas,

Vladimir Murillo, Jairo Grass, Julio, Samuel, Andrés, José Alberto de la Hoz, Deiny, Juan Manuel, Luis Carlos, Oscar, Pablo, Wilson, Edwin Martínez, entre muchos otros.

A Mónica; mi compañera de trabajo de grado por su compromiso, trabajo, investigación, constancia y acompañamiento en las diferentes etapas de la Tesis.

A la Empresa Copower; en especial a los Ingenieros Jairo Serrano, Jorge Urquijo y Alexander Pinzón Ávila, que me abrieron sus puertas y han estado siempre dispuestos para fomentar temas de investigación.

A la familia Trevejo por la oportunidad de trabajar; en especial a Doña Liliana y Don Orlando. Allí también encontré una fuente de conocimiento y crecimiento personal.

**Lennis Ernesto Chaparro Granados**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mis padres por su apoyo, por brindarme la oportunidad de estudiar para ser profesional, por su ejemplo, amor y entrega en todos estos años, por su confianza a pesar de los tropiezos y por ser el motor que mueve mi vida.

Quiero agradecer al Doctor Gerardo Latorre Bayona, director del proyecto, por todo su tiempo y dedicación, porque sin su ayuda no habría sido posible la realización de este trabajo de investigación.

Quiero también agradecer de manera especial, a mi compañero de proyecto de grado, por toda la colaboración, empeño y paciencia en el proceso de la realización de éste libro.

Gracias a la Empresa Copower Ltda por toda su colaboración, por abrirnos sus puertas y por facilitarnos el equipo de medición para la realización de las pruebas. Gracias al Ingeniero Jairo Serrano, por toda la paciencia disposición y tiempo dedicado.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander, por ser parte fundamental en el proceso de formación como profesional.

Agradezco a cada uno de los profesores que compartieron sus conocimientos aportando cada uno un grano de arena en el desarrollo del aprendizaje.

Finalmente, gracias a cada uno de los amigos que acompañaron mi estancia en la universidad, porque además de la formación académica hicieron parte importante de mi formación como persona.

***Mónica Rondón García.***

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	24
1. ESTADO DEL ARTE	26
2. MARCO TEÓRICO	31
3. MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE BARRIDO EN FRECUENCIA (SFRA).	36
3.1 ESCENARIOS PARA UTILIZACIÓN DE LA PRUEBA SFRA	37
3.2 CATEGORÍAS PARA LA APLICACIÓN DE LA PRUEBA SFRA.	38
3.2.1 Medición de la línea de base SFRA	38
3.2.2 SFRA como prueba de diagnóstico	39
3.3 PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA LA MEDICIÓN DE PRUEBA SFRA.	40
4. REALIZACIÓN DE LA PRUEBA SFRA	41
4.1 PROCEDIMIENTO	41
4.2 PREPARACIÓN DEL ENTORNO DE LA PRUEBA	41
4.3 PREPARACIÓN DEL OBJETO DE PRUEBA	42
4.4 PRUEBA DEL CONJUNTO (SET)	43
4.5 PRUEBA DE LOS CABLES	44
4.6 TIPOS DE MEDICIÓN	45
4.6.1 Medición de circuito abierto	45
4.6.2 Medición de cortocircuito	46
4.6.3 Medición de la capacitancia entre bobinas	47
4.6.4 Medición de la inductancia entre bobinados	48

4.7 POSICIONES DE LTC Y DETC	49
4.8 CONEXIONES DE PRUEBA	50
5. DOCUMENTACIÓN DE LA PRUEBA	59
5.1 REGISTROS DE LA PRUEBA	59
5.1.1 Formato de los datos	60
5.1.2 Datos	60
5.1.2.1 Datos del transformador	61
5.1.2.2 Datos del equipo de medición	61
5.1.2.3 Datos de la compañía que realiza la prueba	62
5.1.2.4 Configuración de la prueba	62
5.1.3 Resultados de las pruebas	62
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA MEDICIÓN	64
6.1 CARACTERÍSTICAS DE LA GRÁFICA	64
6.1.1 Prueba de circuito abierto	65
6.1.2 Prueba de corto circuito	66
6.1.3 Prueba de capacitancia entre bobinados	67
6.1.4 Prueba de inductancia entre bobinados	67
6.2 COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS	68
6.2.1 Inspección gráfica	68
6.2.2 Diferencia del trazado	69
6.2.3 Coeficientes de correlación	69
6.2.4 Datos de línea base	70
6.2.5 Unidades similares	71
6.2.6 Comparación entre fases	72
6.3 SFRA Y OTRAS PRUEBAS DIAGNÓSTICAS A TRANSFORMADORES	73
6.3.1 Corriente de excitación monofásica	73
6.3.2 Relación de vueltas	74
6.3.3 Impedancia de corto circuito	74

6.3.4 Resistencia de devanado DC	74
6.4 MODOS DE FALLA	74
6.4.1 Deformación radial de devanado	76
6.4.2 Elongación axial de devanado - "Telescopio"	79
6.4.3 Movimiento localizado	81
6.4.4 Defectos en el núcleo	82
6.4.5 Resistencia de contacto	85
6.4.6 Bobinado en corto circuito	87
6.4.7 Devanado en circuito abierto	89
6.4.8 Bobinado suelto debido al transporte	91
6.4.9 Magnetismo residual	92
7. PRUEBAS REALIZADAS	93
7.1 REALIZACIÓN DE LINEA BASE "HUELLA".	93
7.1.1 Preparación del entorno de la prueba	95
7.1.2 Preparación del objeto de prueba	95
7.1.3 Prueba del conjunto (set)	96
7.1.4 Prueba de los cables	97
7.1.5 Configuración de la prueba	98
7.1.6 Prueba de circuito abierto	98
7.1.7 Prueba de corto circuito	99
7.1.8 Medición de la capacitancia entre bobinas	101
7.1.9 Medición de la inductancia entre bobinas.	102
7.1.10 Resultados de la prueba	102
7.2 COMPARACIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS A TRANSFORMADORES GEMELOS	111
7.2.1 Análisis de resultados	117
7.3 COMPARACIÓN ENTRE FASES	120
7.3.1 Análisis de resultados	123

8. OBSERVACIONES	127
9. CONCLUSIONES	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
BIBLIOGRAFÍA	133
ANEXOS	135

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Red de dos puertos	33
Figura 2. Diagrama general de conexión.	35
Figura 3. Conexión para prueba de circuito abierto	46
Figura 4. Conexión para prueba de corto circuito	47
Figura 5. Conexión para prueba de capacitancia entre bobinas	48
Figura 6. Conexión para prueba de inductancia entre bobinados	48
Figura 7. Curvas típicas para deformación radial	78
Figura 8. Curvas típicas de elongación axial de devanado	80
Figura 9. Curvas típicas para defectos en el núcleo	84
Figura 10. Curvas características para resistencia de contactos	86
Figura 11. Curvas típicas de devanado en corto circuito	88
Figura 12. Curvas típicas de devanado en circuito abierto	90
Figura 13. Curva típica de bobinado suelto debido a transporte	91
Figura 14. Placa del transformador	94
Figura 15. Equipo de medición Frax 101	94
Figura 16. Transformador aislado de fuente de alta tensión debidamente conectado a la malla de puesta a tierra	95
Figura 17. Desconexión de bornes de baja tensión	96
Figura 18. Conexión a tierra del equipo de medición	96
Figura 19. Forma de conexión para la auto-evaluación y gráfica obtenida	97
Figura 20. Cables equipo de medición	97
Figura 21. Temperatura y humedad relativa	98
Figura 22. Conexión H2-H1 prueba de circuito abierto	99
Figura 23. Conexión H3-H2 prueba de circuito abierto	99
Figura 24. Conexión H1-H3 prueba de corto circuito	100

Figura 25. Conexión H2-H1 prueba de corto circuito	100
Figura 26. Conexión H1-X1 prueba de capacitancia entre bobinados	101
Figura 27. Conexión H2-X2 prueba de capacitancia entre bobinados	101
Figura 28. Conexión H1-X1 prueba inductacia entre bobinados	102
Figura 29. Conexión H2-X2 prueba de inductancia entre bobinados	102
Figura 30. Resultados prueba circuito abierto devanado de alta tensión	106
Figura 31. Resultados prueba circuito abierto devanado de baja tensión	107
Figura 32. Resultados prueba corto circuito devanado alta tensión	108
Figura 33. Resultados prueba de capacitancia interdevanados	109
Figura 34. Resultados de la prueba de inductancia entre bobinados.	110
Figura 35. Conexión a malla de puesta a tierra de los transformadores	112
Figura 36. Placas de transformadores gemelos	112
Figura 37. Neutro sin conexión a malla de puesta a tierra	113
Figura 38. Posición del cambiador de tomas para los transformadores	113
Figura 39. Mínima distancia de conexión al sistema de puesta a tierra	114
Figura 40. Tipos de cables utilizados	114
Figura 41. Resultados de la prueba de circuito abierto, conexión H3-H2	115
Figura 42. Resultados de la prueba de circuito abierto, conexión X3-X0	115
Figura 43. Resultados de la prueba de corto circuito, conexión H2-H1	116
Figura 44. Resultados de la prueba de inter-devanados capacitiva conexión H3-X3	116
Figura 45. Resultados de la prueba de inter-devanados inductiva conexión H3-X3	117
Figura 46. Resultados de la prueba de circuito abierto, devanado de alta tensión	121
Figura 47. Resultados de la prueba de circuito abierto, devanado de baja tensión	121
Figura 48. Resultados de la prueba de corto circuito	122
Figura 49. Resultados de la prueba de capacitancia inter-devanados	122
Figura 50. Resultados de la prueba de inductancia inter-devanados	123

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Transformadores bidevanados – 15 pruebas	51
Tabla 2. Autotransformadores sin terciario – 12 pruebas	52
Tabla 3. Autotransformadores con terciario-33 pruebas	53
Tabla 4. Autotransformadores con terciario puesto a tierra	54
Tabla 5. Transformadores tridevanados. Parte 1	55
Tabla 6. Transformadores tridevanados. Parte 2	57
Tabla 7. Deformación radial de devanado	76
Tabla 8. Elongación axial de devanado	79
Tabla 9. Movimiento localizado	81
Tabla 10. Defectos en el núcleo	82
Tabla 11. Resistencia de contacto	85
Tabla 12. Bobinado en corto circuito	87
Tabla 13. Devanado en circuito abierto	89
Tabla 14. Correlación prueba de circuito abierto at conexión H3-H2	117
Tabla 15. Correlación prueba de circuito abierto BT conexión X3-X0	118
Tabla 16. Correlación prueba de corto circuito conexión H2-H1	118
Tabla 17. Correlación prueba inter-devanados capacitiva conexión H3-X3	118
Tabla 18. Correlación prueba inter-devanados inductiva conexión H3-X3	119
Tabla 19. Prueba de circuito abierto at correlación entre conexión H3-H2 y H1-H3:	123
Tabla 20. Prueba de circuito abierto bt correlación entre conexión X1-X0 Y X3-X0:	124
Tabla 21. Prueba de corto circuito correlación entre conexión H1-H3 Y H3-H2:	124

Tabla 22. Prueba inter-devanados capacitiva correlación entre conexión H1-X1 Y H2-X2:	125
Tabla 23. Prueba inter-devanados inductiva correlación entre conexión H1-X1 Y H2-X2:	125

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. FORMATO PARA DILIGENCIAR LOS DATOS DEL TRANSFORMADOR	136
ANEXO B. FORMATO PARA DILIGENCIAR DATOS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	138
ANEXO C. FORMATO PARA DILIGENCIAR DATOS DE LA COMPAÑÍA	139
ANEXO D. FORMATO PARA DILIGENCIAR CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA	140
ANEXO E. FORMATO PARA DILIGENCIAR CATEGORIA DE LA PRUEBA	141
ANEXO F. FORMATO PARA DILIGENCIAR EL TIPO DE MÉTODO A UTILIZAR	142
ANEXO G. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	143
ANEXO H. CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN EQUIPO DE MEDICIÓN	144
ANEXO I. GRAFICA DE AUTO-EVALUACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN SUMINISTRADA POR EL FABRICANTE	145
ANEXO J. CÁLCULO DE CORRELACIÓN DEL SOFTWARE DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	146

## RESUMEN

**TÍTULO:** PRUEBA DE RESPUESTA DE BARRIDO EN FRECUENCIA PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA: DOCUMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA PRUEBA CON BASE EN LA GUÍA IEEE STD.C57.149<sup>TM</sup>-2012<sup>\*</sup>.

**AUTORES:** LENNIS ERNESTO CHAPARRO GRANADOS  
MÓNICA RONDÓN GARCÍA<sup>\*\*</sup>

**PALABRAS CLAVES:** admitancia, atenuación, diagrama de Bode, desviación, dominio de la frecuencia, análisis de respuesta en frecuencia (FRA), IEEE C57.149<sup>TM</sup>, impedancia, magnitud, ángulo de fase, la resonancia, la red RLC, función de transferencia.

### DESCRIPCIÓN:

La prueba de respuesta de barrido en frecuencia para transformadores de potencia, es una prueba o técnica de diagnóstico que sirve para detectar el desplazamiento y deformación de bobinado (siendo estas las principales causas de fallas en transformadores). Hay dos métodos diferentes para llevar a cabo la prueba de la respuesta de frecuencia: Análisis de Respuesta de barrido en frecuencia - SFRA e Impulso de baja tensión - LVI. SFRA tiene importantes ventajas frente a LVI tales como: menor afectación de señales de ruido, mayor porcentaje de repetitividad y reproducibilidad y menos requerimientos de los equipos de medición. Una desventaja de la SFRA con respecto a LVI es el tiempo requerido para la medición. El tiempo necesario para la realización de una prueba de SFRA (típicamente varios minutos) se relaciona con el ancho de banda de frecuencias, que no está universalmente definido.

La prueba respuesta de barrido en frecuencia (FRA) a transformadores de potencia está documentada en este libro, que además incluye algunos resultados de pruebas hechas a transformadores. El objetivo principal es proporcionar algunas recomendaciones, requisitos y especificaciones de los instrumentos, los procedimientos para la realización de las pruebas, las técnicas para el análisis de los datos, así como recomendaciones para el almacenamiento a largo plazo de los datos y resultados. Los resultados de pruebas realizadas a transformadores se basaron en la guía IEEE Std.C57.149TM

Es necesario destacar la importancia de la prueba SFRA tanto para las empresas que suministran energía como para las fábricas que utilizan transformadores de potencia. La prueba SFRA permite verificar el estado de los transformadores antes de la puesta en servicio y detectar posibles cambios que puedan ocurrir durante su vida útil, como un diagnóstico temprano para realizar los correctivos necesarios y evitar la suspensión del servicio y los costos que ello acarrea.

---

<sup>\*</sup> Proyecto de Grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Gerardo Latorre Bayona.

## ABSTRACT

**TITLE:** TEST FREQUENCY RESPONSE SWEEP FOR POWER TRANSFORMERS: DOCUMENTATION AND PERFORMANCE TEST BASED ON GUIDE STD.C57.149TM IEEE - 2012<sup>\*</sup>.

**AUTHORS:** LENNIS ERNESTO CHAPARRO GRANADOS  
MÓNICA RONDÓN GARCÍA<sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS:** admittance, attenuation, Bode plot, deviation, frequency domain, frequency response analysis (FRA), IEEE C57.149<sup>TM</sup>, impedance magnitude, phase angle, resonance, RLC network transfer function.

### DESCRIPTION:

The Sweep frequency response test for power transformers is a test or diagnostic technique use to detect the movement and deformation of winding (mayor causes in failures in transformers). There are two different methods to carry out the frequency response test: Sweep Frequency Response Analysis - SFRA and Low Voltage Impulse - LVI. SFRA has important advantages over LVI such as: Reduced allocation of noise signals, a higher percentage of repeatability and reproducibility and less requirements for measuring equipment. A disadvantage regarding the SFRA LVI is the time required for measurement. The time required for conducting a test SFRA (typically several minutes) is related to the frequency bandwidth, which is not universally defined.

The Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) to power transformers is documented in this book, which also includes some of the test results made on transformers. The main objective is to provide some recommendations, requirements and specifications of the instruments, procedures for conducting the tests, techniques for data analysis and recommendations for long-term storage of data and results. The results of the tests on transformers were based on Guide IEEE Std.C57.149TM.

It is necessary to emphasize the importance of SFRA test for both companies that supply energy and factories using power transformers. The SFRA test checks the status of the processors prior commissioning and detect changes that may occur during its life time, as a nearly diagnosis to make the necessary corrections and avoid suspension of the service and the costs that this entails.

---

<sup>\*</sup> Degree Project

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physical – Mechanical Engineering.Electrical, Electronics and Telecommunications engineering school. Director: : Ph.D. Gerardo Latorre Bayona

## INTRODUCCIÓN

La prueba de análisis de la respuesta de barrido en frecuencia (SFRA)<sup>1</sup> es una herramienta que sirve para detectar fallas eléctricas y mecánicas en transformadores sumergidos en aceite; tales como: desplazamientos luego de sobre corrientes producidas por fallas pasantes, sincronizaciones fallidas, fallas en el núcleo, problemas de puesta a tierra y apantallamiento. Otras aplicaciones son la verificación de la condición mecánica luego del transporte y la detección de cualquier problema que produzca cambios en la distribución de inductancia o capacitancia en el transformador.

Esta prueba implica la realización de una medición, que evalúa cómo se encuentran los devanados del transformador, transmitiendo una señal de baja tensión que varía en frecuencia. Por tanto está relacionada con la impedancia y la capacitancia del transformador; elementos que están íntimamente relacionados con la construcción física del mismo. De esa forma, la respuesta medida por técnicas de SFRA puede indicar un cambio físico en el interior del transformador. El correcto análisis de los resultados de la prueba permite identificar posibles desplazamientos y prever una posible falla a corto, mediano o largo plazo.

El análisis de la prueba de barrido en frecuencia a transformadores de potencia sumergidos en aceite ha ganado popularidad en el mercado eléctrico, porque la industria se ve obligada a disminuir el tiempo y los costos asociados al mantenimiento y evaluación de la condición mecánica de este tipo de transformadores. Además el incremento de la demanda de energía eléctrica es considerable; razón por la cual se hace indispensable utilizar técnicas de

---

<sup>1</sup> SFRA por su nombre en Inglés "*Sweep Frequency Response Analysis*" y conocida en español como *Análisis del Barrido de la Respuesta en Frecuencia*

diagnóstico que ofrezcan la posibilidad de aumentar la vida útil de los transformadores existentes.

La prueba de diagnóstico SFRA es una herramienta potente y precisa, no invasiva, que permite evaluar la integridad de los devanados, el núcleo y las conexiones internas del transformador; al medir la función de transferencia en un amplio rango de frecuencias, mediante la inyección de una señal de frecuencia variable en uno de los terminales y con la medición de la respuesta en el otro terminal.

La comparación de señales de entrada y salida genera una respuesta en frecuencia, que debe ser contrastada, preferiblemente, con datos de referencia obtenidos en pruebas de fábrica.

La prueba realizada en la fábrica se conoce como “Huella Digital” del transformador y suministra información de las condiciones electromecánicas internas del equipo al salir del lugar donde debe tener las mejores condiciones de calidad.

## 1. ESTADO DEL ARTE

El *Análisis del Barrido de la Respuesta en Frecuencia SFRA* como técnica para la evaluación de las condiciones electromecánicas internas en transformadores es el resultado del mejoramiento de diversas técnicas estudiadas y aplicadas a lo largo del tiempo.

El inicio de la técnica del SFRA se deriva del método LVI<sup>2</sup>, que consiste en la aplicación de un corto impulso de baja tensión en uno de los devanados del transformador y del registro de las formas de onda del impulso aplicado y de la corriente capacitiva. De forma análoga al SFRA, los cambios de las capacitancias entre los devanados y en las capacitancias entre espiras causados por el movimiento de los devanados, se reflejan en la variación de las formas de onda medidas de la corriente y la tensión.

Las investigaciones del SFRA se iniciaron en 1966 con los polacos **Lech y Tyminski** (1) quienes proponen el método como un subproducto de la aplicación de impulsos de baja tensión LVI para detectar deformaciones de los devanados de un transformador durante la prueba de corto circuito. El método se fundamenta en el hecho que cualquier deformación del devanado se manifiesta como un cambio en la respuesta de frecuencia debida a las capacitancias e inductancias internas del transformador, lo que a su vez se refleja en las formas de ondas obtenidas durante la prueba de corriente y tensión.

Más adelante en 1972, **Rogers Humbard y Gilies** (2) proponen una técnica de instrumentación para la aplicación del método del LVI, que consiste en proporcionar un sensor a la entrada y a la salida del transformador con el

---

<sup>2</sup> LVI de la sigla en inglés de “*Low Voltage Impulse*” o en español *impulso de bajo voltaje*

propósito de eliminar la limitación de frecuencia impuesta por la característica de impedancia de los cables y de esta manera minimizar las reflexiones de onda y obtener mediciones útiles a frecuencias mucho más altas (20MHz). Uno de sus principales aportes está ligado a la repetitividad de la técnica y al estudio sobre la sensibilidad de acuerdo con la magnitud del impulso de la onda de tensión de entrada.

Años después en **1978**, **Dick y Erven** (3) de Ontario Canadá, proponen el FRA "*Frequency Response Analysis*" como método de detección de deformaciones en transformadores.

En el artículo describen su experiencia con el método después de haber realizado la prueba a cinco transformadores de hasta 500MVA. Destacando ventajas sobre el método LVI; describen la forma de realizar la prueba de FRA y los equipos requeridos para el barrido en frecuencia hasta 1MHz. Encuentran que para ciertos daños en transformadores no siempre es necesario tener una prueba de referencia, pero que hay mucho camino por recorrer en cuanto al método, para lograr determinar las fallas analizando los cambios en la función de transferencia.

Años después de expuesta la técnica, en **1988**, **Malewski y Poulin** (4) hacen uso de un procedimiento avanzado para diagnosticar transformadores fuera de línea, donde las diferentes mediciones de diagnóstico podían hacerse con un mismo dispositivo. En particular, se encontró que los defectos más comunes podían ser fácilmente detectados. Pusieron a prueba una gran población de transformadores sumergidos en aceite y observaron que un número sustancial mostraba degradación de contacto. Uno de sus aportes fue la relación de los cambios de amplitud de resonancia con fenómenos de descargas parciales.

Este mismo año, **Malewski** en unión con **Douville y Lavallée**, (5) desarrollan un aparato de medición de señales transitorias; éste equipo de medición, alojado en

una carcasa blindada, tiene una entrada con conexión a tierra capacitiva y contacto de aislamiento para aparatos de alta tensión. Además, con apantallado eléctrico conectado a un circuito de detección de salida y medios para generar señales que son réplicas de las ondas transitorias de alta tensión; éste circuito de medición tiene un ancho de banda entre 1 Hz y 1 MHz.

**Malewski, Douville y Lavallée** proponen el uso de las funciones de transferencia como técnica para la determinación de deformaciones en línea; presentan los resultados de su proyecto de monitoreo en línea de los transitorios de una subestación de 735 kV y realizan una comparación de los transitorios medidos contra las ondas normalizadas de la prueba de impulso para probar transformadores por medio del uso de la función de transferencia.

En **1992, Vaessen y Hanique** (6) presentan un novedoso método de análisis de la respuesta de frecuencia (FRA). Este método se aplica a señales de tiempo grabadas digitalmente; proporciona los espectros de frecuencia de alta resolución en magnitud y fase. Utiliza una fuente de impulso especial de baja tensión para evitar el aliasing<sup>3</sup>. A esta técnica se le denominó IFRA<sup>4</sup>.

Para este momento surge la necesidad de una “huella digital” o referencia del transformador, como base de la efectividad del método en el diagnóstico de deformaciones a partir de la comparación.

En **1995, Lapworth y Noonan** (7) realizan un valioso aporte al método que hoy se conoce como SFRA. En su artículo exponen cómo hacer detección de fallas menores en transformadores mediante Análisis de Respuesta de Barrido de Frecuencia (SFRA) desde 5Hz hasta 10MHz. En este método, se toma la respuesta de frecuencia de un transformador en fábrica, al salir del proceso de

---

<sup>3</sup> Aliasing pérdida de datos después de un proceso o transferencia de información.

<sup>4</sup> IFRA “*Impulse Frequency Response Analysis*”

producción y en el sitio de puesta en marcha. Al comparar los dos resultados, es posible verificar el estado del transformador y predecir fallas en caso que se presente algún desajuste. Uno de sus principales aportes es el inicio de la caracterización de las fallas en anchos de bandas específico.

De **1998** a **1999**, Vandermaar, Wang y otros presentan varios artículos (8) (9) (10) donde demuestran que el método de impulso de baja tensión es efectivo.

En **1999 Feser y Leibfried** (11) realizan un trabajo de monitoreo en línea a transformadores. Introducen el concepto de bandas de tolerancia para la correcta interpretación de resultados, permitiendo incluir el efecto de los errores de cuantificación. Mencionan además que la temperatura entre mediciones no debe diferir en más de 20 K. Finalmente, comentan la dificultad para monitorear transformadores en línea especialmente los transformadores trifásicos con conexión delta y las diferencias entre respuestas para las distintas posiciones del cambiador de derivaciones de operación, con o sin carga.

En 2000, **Zhijian, Jingtao y Zihu** en (12) establecen el “coeficiente de correlación” como un parámetro de entrada en la red. Este coeficiente determina el grado de correspondencia que existe entre las funciones de transferencia tomadas antes y después que haya ocurrido algún incidente en el equipo. La correspondencia entre dos curvas es completa cuando este coeficiente es unitario.

Este mismo año **DOBLE Engineering Company** (13) lanza un equipo de medición especializado en análisis de respuesta en frecuencia en transformadores. **B&C Company** (14) también desarrolla un equipo que utiliza la técnica de barrido en frecuencia “Traftek” similar al equipo de DOBLE Engineering Company.

Bajo estas circunstancias, distintas organizaciones mundiales de estandarización inician debates sobre la aplicación del método como opción dentro del grupo de pruebas establecidas para el dictamen de deformaciones y fallas en devanados de transformadores.

En el año **2002** el **CIGRE**<sup>5</sup> (15) presenta el estado del arte hasta ese año de las investigaciones realizadas sobre el comportamiento de transformadores de potencia en pruebas de cortocircuito.

En relación con los métodos de FRA y LVI se mencionan las formas actuales de la realización de estas pruebas y la necesidad de crear un estándar o guía para la ejecución de las mismas e interpretación de los resultados.

En **2002**, el **IEEE**<sup>6</sup> establece un grupo de trabajo llamado Task Force (TF), referente a FRA; debido a sus buenos resultados y a la popularidad adquirida por el método, el grupo recibió el aval de IEEE en 2004 para convertirse en Grupo de Trabajo, en Inglés, Working Group (WG); la finalidad de este WG, denominado PC 57.149, era la creación de la guía para la aplicación e interpretación de SFRA para transformadores sumergidos en aceite. Al igual que para el estándar chino, IEEE quería recomendar un método de tres componentes principales: fuente, referencia y medida.

Finalmente en marzo 8 de 2013 el IEEE publica la guía de aplicación **IEEE Std C57.149™-2012** que se utiliza como base para la realización de este proyecto de grado.

---

<sup>5</sup> Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.

<sup>6</sup> Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

## 2. MARCO TEÓRICO

SFRA se basa en el análisis de la función de transferencia de los elementos internos del transformador. Una señal de baja tensión de referencia generada es conectada a un devanado del transformador y su respuesta es medida, ya sea en el neutro del mismo devanado o en otro devanado, dependiendo de cuál parte del transformador se quiere analizar.

El generador de señales produce un barrido de señales (senoidales) de frecuencia que va desde los 10Hz hasta los 2MHz. Las tensiones de referencia y respuesta se registran y se procesan en una curva de respuesta. Esta curva muestra la relación entre las dos tensiones como una función de la frecuencia.

La manera como la señal de salida se comporta respecto a la señal de entrada afectada por las características físicas del transformador, se describe matemáticamente como la función de transferencia.

$$H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$

Dado que se requiere analizar los componentes de transformadores y éstos son modelados como una impedancia compleja, debido a la interacción de los diferentes componentes de estos dispositivos (núcleos, espiras, devanados); es necesario fijar la atención en la impedancia. La impedancia compleja es el conjunto de componentes RLC, evidentes para diferentes frecuencias de excitación.

Lo anterior fue aprovechado en la implementación de la prueba de barrido de frecuencia SFRA para diagnóstico de transformadores de potencia, basada en la

dependencia que existe entre la reactancia inductiva  $X_L$  y reactancia capacitiva  $X_C$  del transformador con respecto a la frecuencia  $f$  :

$$X_L = 2\pi fL \quad (2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$

$2\pi f$  es la frecuencia angular en radianes por segundo;  $X_L$  y  $X_C$  son las reactancias en ohm del inductor  $L$  y capacitor  $C$ .

Para altas frecuencias el capacitor se comporta como un conductor ideal y a bajas frecuencias como circuito abierto. Lo contrario ocurre con la reactancia inductiva: a bajas frecuencias disminuye, comportándose como un conductor ideal y para las altas frecuencias como circuito abierto.

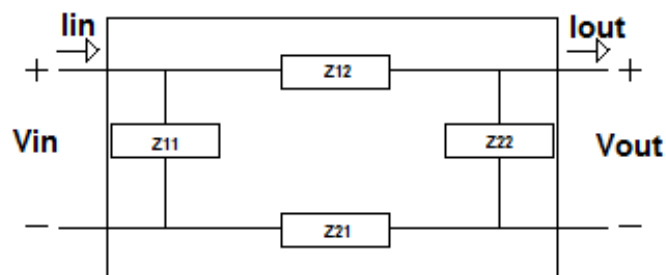
El modelo del transformador en un amplio rango de frecuencias implica la consideración de todos y cada uno de los elementos y acoplamientos inductivos y capacitivos del interior del transformador, los cuales se harán evidentes en frecuencias bajas, medias o altas. Cabe resaltar que no es posible hacer una representación exacta del circuito equivalente del transformador, ya que son múltiples los acoplamientos de los distintos circuitos RLC involucrados y los efectos de éstos se verán reflejados a diferentes frecuencias.

Por lo anterior el circuito del transformador debe analizarse a groso modo como una caja negra con una relación entrada-salida. Así la representación de la impedancia interna del transformador como una relación de ganancias en forma de decibeles, resulta más apropiada para el análisis de los resultados de la prueba.

De esta manera, cuando predomine el efecto inductivo se verá reflejado con una pendiente negativa que precisa la atenuación de la señal de salida con respecto a la señal de entrada. Si predomina el efecto capacitivo, se reflejará una pendiente positiva con su correspondiente ganancia de la señal de salida con respecto a la señal de entrada. Adicionalmente, el valor de la impedancia obtenida dependerá de la frecuencia a la cual se excita el modo de operación respectivo.

SFRA hace una representación general del transformador para el análisis de la prueba, modelando el transformador como una red de dos puertos con cuatro terminales, tal y como se muestra en la Figura 1:

**Figura 1. Red de dos puertos**



Para esta conexión se tiene  $V_{in}$  y  $V_{out}$  referidas a tierra.

Las ecuaciones que describen esta red de dos puertos pueden ser:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (4)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (5)$$

$Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}$  Son los parámetros de impedancia de circuito abierto.

$V_1, V_2, I_1, e I_2$  Hacen referencia a  $V_{in}, V_{out}, I_{in}$  e  $I_{out}$  respectivamente.

El comportamiento de la red compleja al inyectar una señal de tensión en un rango de frecuencias de 2Hz a 2MHz, se puede entender como un modelado en donde existe una relación directa entre la impedancia y la frecuencia, dando como resultado la función de transferencia de la red RLC en el dominio de la frecuencia.

Al realizar la prueba a transformadores de potencia trifásicos, se debe excitar por separado cada uno de los devanados, teniendo en cuenta la impedancia propia de los cables de prueba. En particular, el equipo a utilizar emplea un cable con una impedancia de 50 ohm, prácticamente constante para frecuencias por debajo de 1MHz.

Así, la impedancia del cable y la impedancia propia del transformador  $Z(j\omega)$  estarán directamente incorporadas a la función de transferencia  $H(j\omega)$  de la siguiente manera:

$$H(j\omega) = \frac{50}{Z(j\omega)+50} \quad (6)$$

El método SFRA refleja la respuesta de impedancia como una relación de ganancias en decibeles, que representa la magnitud (ecuación 7) y fase (ecuación 8) de la función de transferencia.

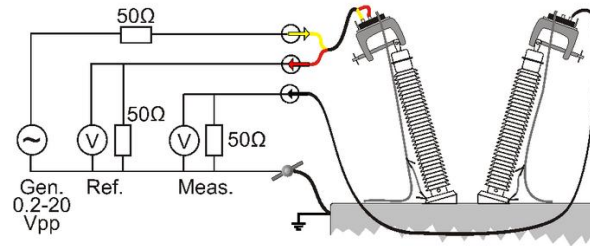
$$A(dB) = 20\log_{10}|H(j\omega)| \quad (7)$$

$$A(\theta) = \tan(H(j\omega)) \quad (8)$$

SFRA inyecta una tensión senoidal que puede estar entre 5V y 20V de pico a pico en un rango de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz (ver Figura 2) y va identificando para cada punto la respuesta de impedancia y los cambios de resonancia en cada

rango de frecuencias. Esto permite identificar la geometría interna del transformador y las características propias del diseño del mismo.

**Figura 2. Diagrama general de conexión.**



Fuente: Frax User's Manual.

### **3. MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE BARRIDO EN FRECUENCIA (SFRA).**

La medición SFRA proporciona información de diagnóstico, en forma de una función de transferencia, vinculada con los componentes RLC del circuito de prueba. Los componentes RLC están integralmente relacionados con la geometría física y la construcción del transformador.

Los cambios físicos dentro del transformador alteran los parámetros internos RLC, que a su vez, alteran la función de transferencia. El comportamiento de la función de transferencia puede revelar una amplia gama de cambios mecánicos o eléctricos en el equipo sometido a prueba. Los diversos modos de falla del transformador producen sus propios cambios en la red de admitancias, alterando la función de transferencia de manera diferente. También es posible que un modo de fallo particular no tenga ningún efecto reconocible en la función de transferencia.

SFRA puede detectar graves defectos del transformador, como lo hacen otras pruebas eléctricas. Sin embargo, debido a la sensibilidad de la prueba, el beneficio principal de FRA es su potencial para la detección de defectos en la integridad mecánica o eléctrica del transformador que no son evidentes con otras pruebas eléctricas.

El SFRA es un método comparativo que evalúa la condición del transformador mediante la comparación de un conjunto real de resultados de la prueba de respuesta de barrido en frecuencia, con resultados de referencia.

Tres métodos se utilizan comúnmente para evaluar las medidas:

- Basado en el tiempo - SFRA resultados actuales se comparan con los resultados anteriores de la misma unidad.
- Basado en el Tipo - SFRA de un transformador se comparará con un tipo igual de transformador.
- Por comparación entre fases - SFRA resultados de una fase serán comparados con los resultados de las otras fases del mismo transformador.

### **3.1 ESCENARIOS PARA UTILIZACIÓN DE LA PRUEBA SFRA**

Dado que la prueba SFRA se utiliza para detectar movimientos mecánico o daños en transformadores, es conveniente realizar este tipo de prueba después de algún evento o condición que genere la posibilidad de causar movimiento mecánico o daños eléctricos en el interior el transformador. Algunos de los escenarios típicos donde se pueden utilizar las mediciones SFRA son los siguientes:

- Prueba de cortocircuito en la fábrica.
- Instalación o la reubicación.
- Después de un evento significativo de falla.
- Como parte del protocolo de rutina.
- Como medición de diagnóstico.
- Después de una señal de alarma (presión repentina, detección de gas, Buchholz).
- Después de un cambio notorio en las condiciones eléctricas del transformador.
- Con propósito de modelado de sistemas.

## **3.2 CATEGORÍAS PARA LA APLICACIÓN DE LA PRUEBA SFRA.**

Hay dos categorías para la aplicación de la prueba FRA: medición de línea de base y medición de diagnóstico. En ambos casos, se deben seguir los procedimientos y tomar las precauciones necesarias para generar una buena medición.

**3.2.1 Medición de la línea de base SFRA** La prueba SFRA para generar la línea de base se puede hacer en fábrica o en campo, y proporciona información para ser utilizada posteriormente. Las diferentes razones para generar la línea de base en la prueba SFRA son las siguientes:

- Para proporcionar un estándar de comparación para futuras mediciones de diagnóstico.
- Para diagnósticos después del transporte.
- Cuando es requerido por especificación del cliente.
- Antes de la prueba de cortocircuito.
- Como garantía de calidad.

Cuando se realiza la prueba para generar la línea de base SFRA es necesario determinar las conexiones que pueden ser necesarias posteriormente con propósitos de diagnóstico: documentar el método, las conexiones y verificar los resultados; todo esto con el fin de garantizar la repetibilidad de la prueba.

La configuración del transformador tiene impacto en los resultados de las pruebas. Es posible que sea difícil determinar variaciones de menor importancia por cambios en la configuración del transformador o algún cambio físico al interior del mismo. Por lo tanto, es importante documentar la configuración y conexiones para garantizar la repetibilidad de la prueba en el futuro.

**3.2.2 SFRA como prueba de diagnóstico** Las razones para realizar la prueba de medición SFRA como prueba de diagnóstico dentro de un ambiente de fábrica o en el campo son las siguientes:

- Verificar que no se causaron daños durante una prueba de corto circuito.
- Reubicación y puesta en marcha.
- Verificación después de falla: relámpago, falla externa, corto circuito interno, evento sísmico, entre otros.
- Diagnóstico de rutina.
- Evaluación de la condición de transformadores antiguos.
- Evaluación de los transformadores usados o de respaldo.
- Envío y recepción.

Al hacer mediciones SFRA como prueba de diagnóstico se debe verificar que las pruebas se realicen con el correspondiente instrumento de medición y los mismos parámetros utilizados en la pruebas de línea de base, para tomarlos como referencia. Cuando los datos de línea base no estén disponibles, se pueden utilizar datos de transformadores idénticos o realizar comparación entre fases de un transformador trifásico. Los datos de otros transformadores del mismo tipo también pueden ser útiles para la comparación.

Pueden ser necesarios métodos especiales en ciertos campos de aplicación debido al envejecimiento de los equipos y conexiones, cuando se ha realizado tratamiento a los bujes, modificación al transformador después que las mediciones de línea de base fueron hechas, o problemas en la toma de buenas conexiones a tierra.

### **3.3 PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA LA MEDICIÓN DE PRUEBA SFRA.**

El equipo de medición para las pruebas debe producir una medición de respuesta de frecuencia con las siguientes características:

- Amplia gama de frecuencias para que se puedan diagnosticar problemas en el núcleo, devanados e interconexiones.
- Resolución adecuada para que los diagnósticos sean inequívocos.

El equipo de medición de la prueba debe tener los siguientes atributos:

- Calibrado a un nivel aceptable.
- Potencia de salida de la fuente de excitación suficiente para suministrar energía en todo el rango de frecuencia que permita una medición coherente de la función de transferencia a través de la gama de frecuencias.
- Amplio rango dinámico de frecuencia con el fin de dar cabida a la mayoría de los objetos de prueba del transformador.
- Un mínimo de 200 mediciones por década, ya sea espaciadas linealmente o logarítmicamente.
- El sistema de prueba (set y cables) debe tener impedancia característica conocida y constante. Las impedancias características de set y cables deben ser iguales.
- Conjunto de tres cables: señal, referencia y prueba, con características que permitan reducir su influencia en la medición.
- Los cables de prueba deben ser coaxiales, de la misma longitud en tanto sea posible y menos de 30 m (100 pies) de longitud. Los cables de prueba apantallados deben tener la capacidad de conectarse a tierra en ambos extremos.
- La magnitud y ángulo de fase de la función de transferencia deben medirse y registrarse.

## **4. REALIZACIÓN DE LA PRUEBA SFRA**

### **4.1 PROCEDIMIENTO**

Como en toda prueba eléctrica, una medición de la respuesta de frecuencia se debe hacer de manera segura y controlada sin tener en cuenta la ubicación de prueba. Las consideraciones de seguridad en pruebas eléctricas no sólo se aplican al personal, sino también al entorno, equipo de prueba y el transformador. Antes de la prueba, el personal involucrado debe discutir el procedimiento para asegurar que el trabajo a realizar y las precauciones de seguridad se entienden claramente. Otros aspectos de seguridad están asociados a estándares de la industria, empresas o regulaciones locales y el manual de instrucciones del fabricante.

### **4.2 PREPARACIÓN DEL ENTORNO DE LA PRUEBA**

- Cualquier transformador bajo prueba deberá estar completamente aislado de la fuente de alta tensión o sistema de potencia.
- El tanque del transformador deberá estar conectado a tierra.
- El equipo de medida debe estar conectado a tierra adecuadamente para cada configuración, y aislado de la fuente de alta tensión o sistema de potencia. Evite someter el instrumento de medida, los cables de prueba y la fuente de alimentación a estaciones cableadas con sobretensiones e interferencia externa.
- Durante la prueba, deber haber estricta adhesión a las normas de seguridad generales y directrices locales.

### **4.3 PREPARACIÓN DEL OBJETO DE PRUEBA**

Se recomienda que la configuración del transformador esté lo más cercana posible a la configuración "en servicio".

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

Siempre que sea posible, las conexiones de los cables de prueba deben hacerse directamente a los bujes terminales. Cualquier longitud adicional del conductor que se incluya en la ruta del circuito influirá en el resultado de la prueba SFRA. Tramos cortos no influyen sensiblemente en la medición, siempre y cuando los conductores de prueba estén conectados directamente a los bujes terminales después de la barra colectora, de manera que ésta no sea parte del circuito de prueba.

Cuando no es posible conectar directamente los cables de prueba a un buje del transformador, se deben realizar las mediciones de respuesta de frecuencia con una sección corta de la barra colectora. Esto afectará los resultados, pero puede ser aceptable como una prueba donde es imposible excluir tales longitudes cortas del circuito. Como ejemplo se incluyen conexiones rígidas en espacios de trabajo reducidos. Es importante tener en cuenta el estado del transformador bajo prueba a fin de proporcionar un método consistente. Cuando a un transformador se le ha realizado la prueba previamente con pequeñas longitudes de barra, en pruebas futuras deberá ser probado de la misma manera. Posteriormente, si una comparación con datos históricos es necesaria, el análisis de los resultados debe tener en cuenta las variaciones que puedan ser causados por las conexiones y sus soportes. Como pauta general, conexiones externas de barras deben ser evitadas.

Al probar un transformador sin aceite se deben tomar precauciones especiales de seguridad para que no se induzcan sobretensiones en un ambiente inflamable. Los resultados de las mediciones de SFRA cambian cuando se retira el aceite. Las pruebas con aceite son más comunes y preferibles para el análisis de la prueba de respuesta de frecuencia.

Si los transformadores de corriente internos están presentes, deben ser configurados para las condiciones de servicio.

#### **4.4 PRUEBA DEL CONJUNTO (SET)**

El equipo de prueba debe estar conectado a tierra de acuerdo con las recomendaciones del fabricante; si éstas no existen, la conexión a tierra debe hacerse en el mismo punto que el transformador bajo prueba. Generalmente, la conexión a tierra del tanque del transformador se considera como referencia para la medición de SFRA. Cabe señalar que en todas las mediciones de SFRA, las técnicas de puesta a tierra tienen un efecto significativo en los resultados. La técnica de conexión a tierra que incluye la selección de los conductores y sus rutas, debe ser precisa, repetible y documentada.

El equipo de prueba debe estar siempre dentro del intervalo de calibración recomendado. Antes de su uso se debe realizar una auto-evaluación del equipo usando un objeto de prueba estándar con una respuesta SFRA conocida; esto asegura el correcto funcionamiento del equipo de prueba. Esta comprobación es especialmente valiosa para el control de equipos de prueba SFRA, porque no hay manera de saber intuitivamente si el equipo de prueba está dando resultados correctos al hacer mediciones de campo.

## 4.5 PRUEBA DE LOS CABLES

Deben utilizarse tres cables coaxiales:

- Excitación ó "fuente"
- Cable de entrada "de referencia"
- Cable de salida " de medida"

Estos cables deben tener la misma longitud como sea posible y tener una impedancia característica igual o similar. Idealmente deben ser de la misma longitud o cómo mínimo, los cables de "referencia" y "medida" deben ser idénticos.

Se debe revisar la continuidad e integridad de los cables de prueba antes de su uso. La mejor forma para hacer esta revisión es llevar a cabo la auto-comprobación SFRA utilizando el objeto de prueba estándar.

Cuando se utilicen cables en una configuración de cortocircuito como parte de una prueba, éstos deben ser aislados de tierra, y ser tan cortos como sea posible puesto que la impedancia de estos cables influirá en los resultados de la prueba.

Cuando el procedimiento de prueba requiere hacer un cortocircuito en uno de los terminales, la selección del cable conductor para el cortocircuito y su longitud deben ser precisos, repetibles, y documentados.

En empresas donde se requiera realizar la prueba con bobinados puestos a tierra por recomendación o lineamientos, los cables que se utilicen deben ser tan cortos como sea posible y estar conectados al mismo sistema de puesta a tierra del transformador. Si bien la prueba SFRA no queda desvirtuada por la presencia de cables adicionales, la respuesta que se obtiene por éstos puede ser única y no debe ser comparada con resultados previos de la prueba SFRA obtenidos sin

estos cables conectados. Para que la prueba tenga validez, el transformador se debe configurar exactamente como lo recomienda el fabricante del equipo de prueba. Si es necesario, se debe solicitar a la autoridad competente el permiso temporal para quitar la conexión entre los devanados y el sistema de puesta a tierra, siempre y cuando el transformador esté completamente aislado de otras fuentes de energía, y no existan riesgos para la seguridad generados por la proximidad de los terminales del transformador a otros equipos de la subestación energizada. En todos los casos, debe haber permiso de la autoridad competente para desviarse de los lineamientos locales.

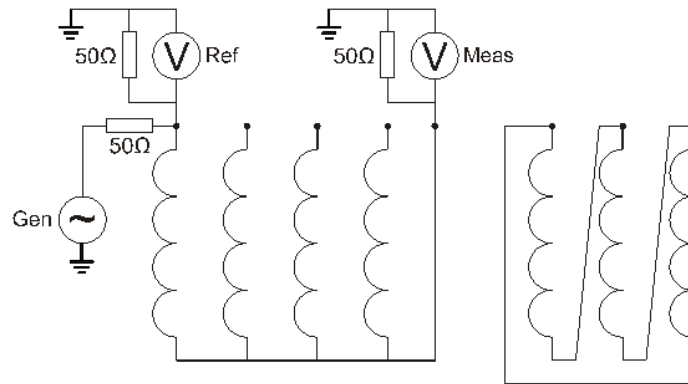
## **4.6 TIPOS DE MEDICIÓN**

A continuación se describe los tipos de medición y los parámetros involucrados en cada una de ellas. Las figuras 3 a la 6 muestran esquemáticamente la conexión de fuente de alimentación, referencia y medida de SFRA.

**4.6.1 Medición de circuito abierto.** Una medición de circuito abierto se hace en un extremo del transformador con todos los terminales del otro extremo abiertos (ver Figura 3). La prueba de circuito abierto se debe aplicar a una sola fase o a las tres fases en transformadores trifásicos. Las pruebas de circuito abierto 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 de la impedancia del núcleo del transformador alrededor de la frecuencia fundamental. Las pruebas en circuito abierto se pueden realizar en conjunto con la prueba de corriente de excitación para determinar los modos de falla que afectan el circuito magnético del transformador.

**Figura 3. Conexión para prueba de circuito abierto**

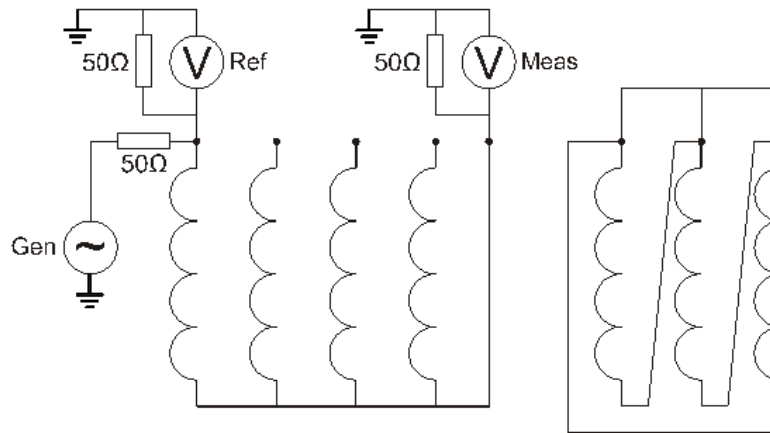


Fuente: Frax User's Manual.

**4.6.2 Medición de cortocircuito** La medición de cortocircuito se hace en el extremo de alta tensión del transformador, mientras que el devanado de baja tensión asociado está en cortocircuito (ver Figura 4). Para efectos de repetibilidad, para crear el modelo equivalente de corto – circuito, todas las bobinas de baja tensión deben estar en cortocircuito en transformadores trifásicos. Esto asegura que las tres fases tengan la impedancia de cortocircuito similar o constante. La conexión a neutro no debe ser incluida en la prueba de cortocircuito.

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

**Figura 4. Conexión para prueba de corto circuito**

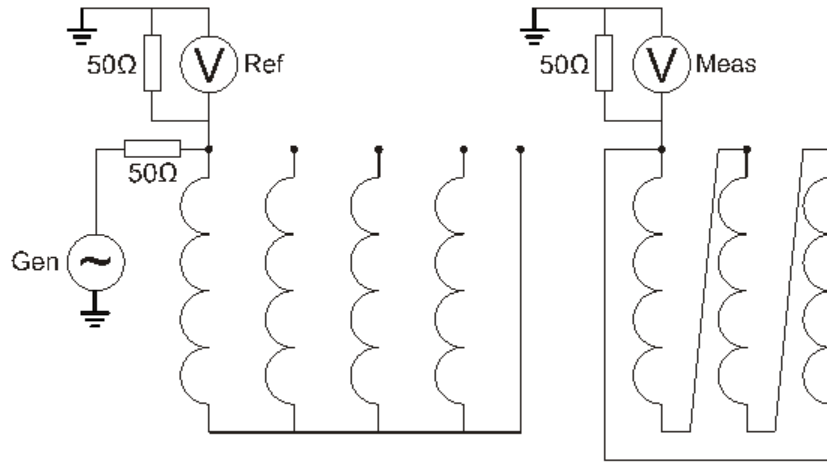


Fuente: Frax User`s Manual

**4.6.3 Medición de la capacitancia entre bobinas** La medición de la capacitancia entre bobinados se realiza entre dos devanados eléctricamente aislados. Esta medición de la capacitancia entre bobinas se hace en uno de los terminales extremos de un arrollamiento y los terminales del otro bobinado, con todos los demás terminales abiertos (ver Figura 5). Las medidas inter- bobinado son capacitivas puras. Estas mediciones muestran una alta impedancia a bajas frecuencias ( $< 100$  Hz); la impedancia generalmente disminuye a medida que la frecuencia aumenta.

La medición de H1 a X1 en un transformador de dos devanados y de H1 a Y1 en un autotransformador con terciario, son medidas de la capacitancia entre bobinados, pero la medición de H1 a X1 en un autotransformador no es una medición inter bobinado; es una medición de circuito abierto del devanado en serie.

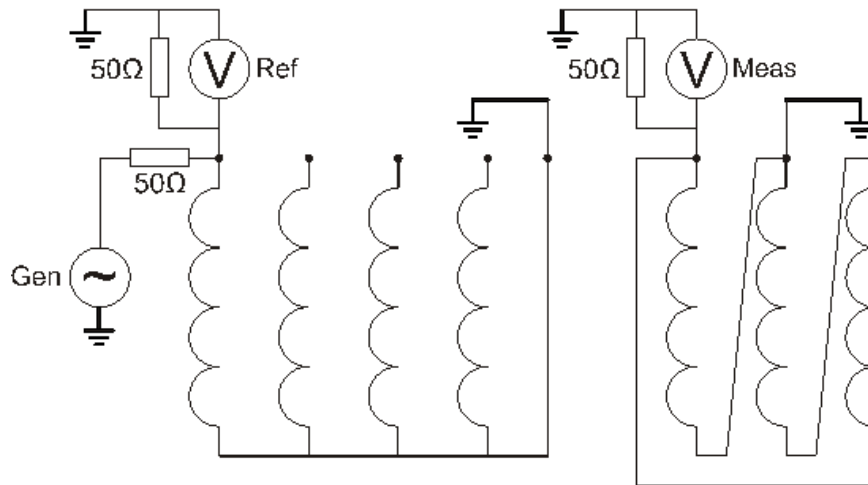
**Figura 5. Conexión para prueba de capacitancia entre bobinas**



Fuente: Frax User`s Manual.

**4.6.4 Medición de la inductancia entre bobinados** La medición de la inductancia entre devanados o tensión de transferencia, se realiza entre dos devanados con un extremo de cada devanado a tierra. Todos los otros terminales que no están bajo prueba deben permanecer abiertos (ver Figura 6). La medición inductiva inter-bobinado muestra la relación de vueltas del transformador alrededor de la frecuencia fundamental.

**Figura 6. Conexión para prueba de inductancia entre bobinados**



Fuente: Frax User`s Manual.

#### **4.7 POSICIONES DE LTC<sup>7</sup> Y DETC<sup>8</sup>**

En el informe de la prueba las posiciones del tap deben registrarse para cada tipo prueba. En general, para la prueba de bobinados con LTC, el tap debe estar en la misma posición de derivación para todos los devanados. Se recomienda que el LTC esté en la posición superior. Cuando las pruebas se llevan a cabo en una posición neutral del tap LTC, la posición del éste debe registrarse porque el bobinado resultante a través del tap influye en el resultado de la prueba.

Realizar las pruebas tal como se hizo anteriormente es clave para el análisis de los resultados. Se recomienda que mediciones en posición neutral del tap se hagan después de realizar la prueba en la posición de tap sugerida.

Para la prueba el DETC debe estar en la misma posición que cuando se encuentra en servicio, porque algunos transformadores en servicio presentan problemas debido al movimiento del DETC; no se recomienda que la posición DETC sea alterado para la prueba de FRA. La excepción está en las pruebas de fábrica en un transformador nuevo, donde se puede suponer que el DETC está en condiciones satisfactorias.

Las posiciones recomendadas para el LTC y DETC son las siguientes:

- LTC – Extremo superior
- DETC - Como Encontrado

---

<sup>7</sup> LTC: Load Tap Changer, Cambiador de tomas bajo carga.

<sup>8</sup> DETC: Cambiador de tomas desenergizado.

## 4.8 CONEXIONES DE PRUEBA

La base del análisis de SFRA es la comparación con mediciones de referencia; si las mediciones de referencia están disponibles, se recomienda que al realizar la prueba se repitan las mediciones exactamente como se realizaron las de referencia.

Todas las nuevas medidas deben seguir como principio básico medir los bobinados de "cabeza a cola"; las conexiones de prueba recomendadas dependen de configuración del transformador. Las conexiones de prueba en las tablas de esta sección son para configuraciones de Grupo 1 (sin carga / atraso) y Grupo 2 (30 grados en atraso). Cuando se requieran configuraciones de devanado de transformadores que no están incluidos en los cuadros 1 a 6, consulte la placa de identificación del transformador. El tipo de configuración del transformador determina el procedimiento de prueba.

Las conexiones de prueba descritas aquí no incluyen pruebas de repetición para diferentes posiciones de tap. Los bujes que no estén bajo prueba, incluyendo los neutrales, deben ser desconectados del sistema de puesta a tierra, a menos que se requiere la conexión por normas específicas del lugar donde se realiza la prueba.

Es conveniente realizar todas las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito. Se recomienda realizar las pruebas 1 a 9 de la Tabla 1 como mínimo.

A continuación se presentan alternativas para la secuencia de las pruebas, que pueden ser seleccionadas de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de transformadores, del equipo de medida, del usuario y del tipo de tensión aplicada.

A todos los bobinados se les deben realizar las pruebas, como se muestra a continuación en las tablas de conexión.

- Tabla 1 – Transformadores de dos devanados
- Tabla 2 - Autotransformador sin terciario
- Tabla 3 - Autotransformador con terciario
- Tabla 4 - Autotransformador con terciario puesto a tierra
- Tabla 5 - Transformador de tres devanados. Parte 1
- Tabla 6 - Transformador de tres devanados. Parte 2

**Tabla 1. Transformadores bidevanados – 15 pruebas**

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$ $\Delta$ - Y Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ Y - $\Delta$ Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ $\Delta$ - $\Delta$ Grupo 1 $\theta = 0^\circ$	3 $\phi$ Y - Y Grupo 1 $\theta = 0^\circ$	1 $\phi$
AT Circuito abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	1	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	3	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
BT Circuito abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	4	X1-X0	X1-X2	X1-X3	X1-X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2-X0	X2-X3	X2-X1	X2-X0	
	6	X3-X0	X3-X1	X3-X2	X3-X0	
Corto circuito (CC) corto [X1 - X2 - X3] <sup>a</sup>	7	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2
	8	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	Corto
	9	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	[X1-X2] <sup>a</sup>
Capacitancia entre bobinados 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	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia baja(BT) tierra[ H y X] <sup>b</sup>	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 Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

<sup>a</sup> Indica que terminales están en corto, pero no conectados al sistema de puesta a tierra. El neutro no se incluye para transformadores trifásicos conectados en Y, pero puede estar incluido para transformadores monofásicos.

<sup>b</sup> Denota el otro extremo del devanado; opuesto a las conexiones de referencia y de medida.

**Tabla 2. Autotransformadores sin terciario – 12 pruebas**

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$	1 $\phi$
Devanado serie abierto. Todos los demás terminales abiertos	1	H1-X1	H1-X1
	2	H2-X2	
	3	H3-X3	
Devanado común abierto. Todos los demás terminales abiertos	4	X1-H0X0	X1-H0X0
	5	X2-H0X0	
	6	X3-H0X0	
Corto circuito de alta (AT) hacia baja(BT) corto[ X1-X2-X3] <sup>a</sup>	7	H1-H0X0	H1-H0X0 Corto [X1-H0X0] <sup>a</sup>
	8	H2-H0X0	
	9	H3-H0X0	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia baja(BT) tierra[H0X0] <sup>a</sup>	10	H1-X1	H1-X1
	11	H2-X2	Tierra
	12	H3-X3	[H0X0]

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

<sup>a</sup> Indica en la prueba de corto circuito: cuales terminales se encuentran cortocircuitados al tiempo, pero no puestos al sistema de puesta a tierra. El neutro no se incluye en transformadores conectados en Y, pero puede ser incluido en transformadores monofásicos.

**Tabla 3. Autotransformadores con terciario-33 pruebas**

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$	1 $\phi$
Devanado serie abierto. Todos los demás terminales abiertos	1	H1-X1	H1-X1
	2	H2-X2	
	3	H3-X3	
Devanado común abierto. Todos los demás terminales abiertos	4	X1-H0X0	X1-H0X0
	5	X2-H0X0	
	6	X3-H0X0	
Devanado terciario abierto. Todos los demás terminales abiertos	7	Y1-Y2	Y1-Y2 (Y1-Y0)
	8	Y2-Y3	
	9	Y3-Y1	
Corto circuito de alta (AT) hacia baja(BT) corto[ X1-X2-X3] <sup>a</sup>	10	H1-H0X0	H1-H0X0 Corto [X1-H0X0] <sup>a</sup>
	11	H2-H0X0	
	12	H3-H0X0	
Corto circuito de alta (AT) hacia media(MT) corto[ Y1-Y2-Y3] <sup>a</sup>	13	H1-H0X0	H1-H0X0 Corto [Y1-Y2] <sup>a</sup>
	14	H2-H0X0	
	15	H3-H0X0	
Corto circuito de baja (BT) hacia media(MT) corto[ Y1-Y2-Y3] <sup>a</sup>	16	X1-H0X0	X1-H0X0 Corto [Y1-Y2] <sup>a</sup>
	17	X2-H0X0	
	18	X3-H0X0	
Capacitancia entre bobinados de alta (AT) hacia terciario(MT) Todos los demás terminales abiertos	19	H1-Y1	H1-Y1
	20	H2-Y2	
	21	H3-Y3	
Capacitancia entre bobinados de baja (BT) hacia terciario(MT) Todos los demás terminales abiertos	22	H1-Y1	X1-Y1
	23	H2-Y2	
	24	H3-Y3	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia baja(BT) tierra[H0X0] <sup>a</sup>	25	H1-X1	H1-X1 Tierra [H0X0]
	26	H2-X2	
	27	H3-X3	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia media(MT) tierra[H0X0 y Y] <sup>b</sup>	28	H1-Y1	H1-Y1 Tierra [H0X0-Y2]
	29	H2-Y2	
	30	H3-Y3	
Inductancia entre bobinados de baja (BT) hacia media(MT) tierra[H0X0 y Y] <sup>b</sup>	31	X1-Y1	X1-Y1 Tierra [H0X0-Y2]
	32	X2-Y2	
	33	X3-Y3	

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

<sup>a</sup> Indica que terminales están corto, pero no conectados a tierra. El neutro no se incluye para transformadores trifásicos conectados en Y, pero puede estar incluido para transformadores monofásicos.

<sup>b</sup> Denota el otro extremo del devanado; opuesto a las conexiones de referencia y de medida.

**Tabla 4. Autotransformadores con terciario puesto a tierra**

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$	1 $\phi$
Devanado serie abierto. Todos los demás terminales abiertos	1	H1-X1	H1-X1
	2	H2-X2	
	3	H3-X3	
Devanado común abierto. Todos los demás terminales abiertos	4	X1-H0X0	X1-H0X0
	5	X2-H0X0	
	6	X3-H0X0	
Corto circuito de alta (AT) hacia baja(BT) corto[ X1-X2-X3] <sup>a</sup>	7	H1-H0X0	H1-H0X0 Corto [X1-H0X0] <sup>a</sup>
	8	H2-H0X0	
	9	H3-H0X0	
Capacitancia entre bobinados de alta (AT) hacia media(MT) Todos los demás terminales abiertos	10	H1-Y1	H1-Y1
	11	H2-Y2	
	12	H3-Y3	
Capacitancia entre bobinados de baja (AT) hacia media(MT) Todos los demás terminales abiertos	13	X1-Y1	X1-Y1
	14	X2-Y2	
	15	X3-Y3	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia baja(BT) tierra[H0X0]	16	H1-X1	H1-X1 Tierra [H0X0]
	17	H2-X2	
	18	H3-X3	

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

<sup>a</sup> Indica en la prueba de corto circuito: cuales terminales se encuentran cortocircuitados al tiempo, pero no puestos al sistema de puesta a tierra. El neutro no se incluye en transformadores conectados en Y, pero puede ser incluido en transformadores monofásicos.

**Tabla 5. Transformadores tridevanados. Parte 1**

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$ $\Delta - \Delta - \Delta$ Grupo 1 $\theta = 0^\circ$	3 $\phi$ $\Delta - \Delta - Y$ Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ $\Delta - Y - \Delta$ Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ $\Delta - Y - Y$ Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	1 $\phi$
AT Circuito abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	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 abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	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 (vacío) Todos los demás terminales abiertos	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 (CC) AT hacia BT corto [X1 - X2 - X3] <sup>a</sup>	10	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H0 corto [X1-X2] <sup>a</sup>
	11	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	
	12	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	
Corto circuito (CC) AT hacia MT corto [y1 - y2 - y3] <sup>a</sup>	13	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H0 corto [Y1-Y2] <sup>a</sup>
	14	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	
	15	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	
Corto circuito (CC) BT hacia MT corto [y1 - y2 - y3] <sup>a</sup>	16	X1-X3	X1-X3	X1-X0	X1-X0	X1-X2 corto [Y1-Y2] <sup>a</sup>
	17	X2-X1	X2-X1	X2-X0	X2-X0	
	18	X3-X2	X3-X2	X3-X0	X3-X0	
Capacitancia entre bobinados 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	
Capacitancia entre bobinados 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	

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$ $\Delta - \Delta - \Delta$ Grupo 1 $\theta = 0^\circ$	3 $\phi$ $\Delta - \Delta - Y$ Grupo 2 $\theta$ $= 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ $\Delta - Y - \Delta$ Grupo 2 $\theta$ $= 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ $\Delta - Y - Y$ Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	1 $\phi$
Capacitancia entre bobinados 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	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia baja(BT) tierra[ H y X] <sup>b</sup>	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	
Inductancia entre bobinados de alta (AT) hacia media (MT) tierra[ H y Y] <sup>b</sup>	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	
Inductancia entre bobinados de baja (BT) hacia media (MT) tierra[ X y Y] <sup>b</sup>	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 Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

<sup>a</sup> Indica que terminales están en corto, pero no conectados al sistema de puesta a tierra. El neutro no se incluye para transformadores trifásicos conectados en Y, pero puede estar incluido para transformadores monofásicos.

<sup>b</sup> Denota el otro extremo del devanado; opuesto a las conexiones de referencia y de medida.

**Tabla 6. Transformadores tridevanados. Parte 2**

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$ Y - Y - Y Grupo 1 $\theta = 0^\circ$	3 $\phi$ - Y - $\Delta$ Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ - $\Delta$ - Y Grupo 2 $\theta = 30^\circ$ ATRASO	3 $\phi$ Y - $\Delta$ - $\Delta$ Grupo 1 $\theta = 0^\circ$ ATRASO
AT Circuito abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	1	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	2	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	3	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
BT Circuito abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	4	X1-X0	X1-X0	X1-X2	X1-X2
	5	X2-X0	X2-X0	X2-X3	X2-X3
	6	X3-X0	X3-X0	X3-X1	X3-X1
MT Circuito abierto (vacío) Todos los demás terminales abiertos	7	Y1-Y0	Y1-Y2	Y1-Y0	Y1-Y2
	8	Y2-Y0	Y2-Y3	Y2-Y0	Y2-Y3
	9	Y3-Y0	Y3-Y1	Y3-Y0	Y3-Y1
Corto circuito (CC) AT hacia BT corto [X1 - X2 - X3] <sup>a</sup>	10	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	11	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	12	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
Corto circuito (CC) AT hacia MT corto [Y1 - Y2 - Y3] <sup>a</sup>	13	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	14	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	15	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
Corto circuito (CC) BT hacia MT corto [Y1 - Y2 - Y3] <sup>a</sup>	16	X1-X0	X1-X0	X1-X2	X1-X2
	17	X2-X0	X2-X0	X2-X3	X2-X3
	18	X3-X0	X3-X0	X3-X1	X3-X1
Capacitancia entre bobinados AT hacia BT Todos los demás terminales abiertos	19	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
Capacitancia entre bobinados AT hacia MT Todos los demás terminales abiertos	22	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
Capacitancia entre bobinados BT hacia MT Todos los demás terminales	25	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

Tipo de prueba	Prueba #	3 $\phi$ Y - Y - Y Grupo 1 $\theta = 0^\circ$	3 $\phi$ Y - Y - $\Delta$ Grupo 2 $\theta =$ 30° ATRASO	3 $\phi$ Y - $\Delta$ - Y Grupo 2 $\theta =$ 30° ATRASO	3 $\phi$ Y - $\Delta$ - $\Delta$ Grupo 1 $\theta = 0^\circ$ ATRASO
abiertos					
Inductancia entre bobinados De alta (AT) hacia baja(BT) tierra[ H y X] <sup>b</sup>	28	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	29	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2
	30	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3
Inductancia entre bobinados De Alta (AT) hacia Media (MT) Tierra[ H y Y] <sup>b</sup>	31	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
	32	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2
	33	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3
Inductancia entre bobinados De Baja (BT) hacia Media (MT) Tierra[ X y Y] <sup>b</sup>	34	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
	35	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2
	36	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

<sup>a</sup> Indica que terminales están en corto, pero no conectados al sistema de puesta a tierra. El neutro no se incluye para transformadores trifásicos conectados en Y, pero puede estar incluido para transformadores monofásicos.

<sup>b</sup> Denota el otro extremo del devanado; opuesto a las conexiones de referencia y de medida.

## **5. DOCUMENTACIÓN DE LA PRUEBA**

La medición de respuesta de frecuencia proporciona gran cantidad de información con respecto a la geometría interna de un transformador. Para realizar una prueba que arroje buenos resultados, es importante que las mediciones se realicen siguiendo una metodología, en forma organizada y consistente. A diferencia de las mediciones del factor de potencia, donde es posible tomar medidas basadas en el análisis del diseño del transformador y algo de Ingeniería Eléctrica básica, circuitos eléctricos, SFRA requiere realizar mediciones de la misma forma que se realizaron las mediciones previas de otras unidades similares.

Es importante que cualquier parámetro que afecte los resultados de la prueba se registre de forma clara, concisa, en el formato de tal manera que las gráficas SFRA se puedan reconstruir.

### **5.1 REGISTROS DE LA PRUEBA**

Es necesario registrar todos los elementos de la prueba, para asegurar que se pueda repetir posteriormente bajo las mismas condiciones y comparar con resultados anteriores o con datos de pruebas realizadas a otros transformadores.

Los detalles dados aquí separan los distintos elementos de cada configuración de prueba, pero no deben ser tomados como una receta. La información mínima requerida está marcada como “necesaria”; otra información puede inferirse de los datos del fabricante del transformador.

Como parte de este trabajo se incluyen unos formatos que se deben diligenciar en cada prueba para que ésta sea organizada y se generen registros confiables que conduzcan a buenos resultados.

**5.1.1 Formato de los datos** Los datos deben ser visibles, estar en un formato estándar que permita el análisis flexible de los resultados, la comparación entre los resultados de diferentes pruebas, y se deben incluir en el informe. Debido a que los registros de SFRA se pueden almacenar durante muchos años antes de ser recordados para la comparación, se recomienda evitar cualquier formato de archivo asociado con aplicaciones o instrumentos actuales, ya que pueden cambiar con el tiempo o no ser apoyado 15 o 20 años después de que hayan sido almacenados. Debido a esto, se sugiere que se utilice un formato de archivo XML. Este es un formato bien conocido, abierto, que está disponible desde 1990.

**5.1.2 Datos** El objeto de prueba es un transformador. Además de los datos de placa de identificación del transformador, hay una serie de factores que influyen en los resultados de la prueba y deben ser registrados. Son los siguientes:

- Transformador: Objeto de prueba, se debe registrar toda la información contenida en los datos de la placa.
- Equipo de prueba: Toda la información referente al equipo de prueba debe ser consignada.
- Organización de la prueba: Se deben seguir los procedimientos recomendados con el fin de detectar errores sistemáticos, que pueden conducir a resultados erróneos.
- Configuración de la prueba: Se debe verificar y consignar el estado del transformador, nivel de aceite, estado de los bujes, posición del tap, temperatura, etc.
- Resultados de la prueba: Se debe anotar la fecha, hora, frecuencia, magnitud y ángulo de fase.

Cómo parte de este trabajo de grado se realizaron unos formatos que facilitan el registro de datos de la prueba SFRA para optimizar y agilizar la realización del informe final que contiene los resultados de la misma.

#### **5.1.2.1 Datos del transformador**

- a) Fabricante
- b) Año
- c) Número de serie - Requerido
- d) Valoración de MVA para diversos modos de enfriamiento (ONAN, OFAF, ODAF, etc.)
- e) Régimen de voltaje: HV, LV1, LV2, Terciario
- f) Identificación del transformador (ID transformador) - Requerido
- g) Grupo de conexión
- h) Número de fases
- i) Impedancia - por ejemplo, HV-LV1, LV2-HV, HV-Terciario; -LV Terciario
- j) Tipo de transformador - GSU, Potencia XFMR, Dist, horno, etc
- k) Tipo de bobinado - Auto, bidevanado, etc
- l) Construcción del transformador.
- m) LTC campos: Fabricante, Número de Serie, Año fabricación.
- n) DETC campos: Fabricante, Número de Serie, Año fabricación.
- o) La conexión y el estado de puesta a tierra de cualquier bobinado terciario enterrado.

Formato para registrar los datos del transformador. Ver anexo 1.

#### **5.1.2.2 Datos del equipo de medición**

- a) Nombre, número de serie y modelo del equipo.
- b) Fabricante

- c) Fecha de última calibración
- d) Impedancia del equipo

Formato para registrar los datos del equipo de medición. Ver anexo 2

#### **5.1.2.3 Datos de la compañía que realiza la prueba**

- a) Empresa
- b) Ubicación
- c) Operador

Formato para registrar los datos de la compañía que realiza la prueba. Ver anexo 3.

#### **5.1.2.4 Configuración de la prueba**

- a) Temperatura del aceite.
- b) Nivel de aceite
- c) Situación de aceite (si inmersos o no)
- d) Circuitos externos conectados a los bujes (longitud de barra, etc) - Requerido
- e) Motivo de la prueba
- f) Tipo de prueba

Formatos para registrar los datos de configuración de la prueba. Ver anexos 4, 5 Y 6

**5.1.3 Resultados de las pruebas** Los resultados de la prueba deben quedar consignados en un informe ejecutivo que contenga todos los datos reales de la prueba como configuraciones específicas de la medición, del transformador. Cada

medición en la prueba da como resultado un bloque de datos que se codifican en un archivo y se visualizan mediante un software especializado.

- a) Nombre del cliente.
- b) Fecha y hora de la medición.
- c) Posición de LTC, incluyendo la posición anterior si es neutral - Requerido
- d) Posición DETC.
- e) Tipo de medición: Circuito abierto, corto circuito, inductancia de bobinados y tensión aplicada.
- f) Posición de los terminales: Fuente, referencia, medida, cortocircuito, puesta a tierra.
- g) Datos de la gráfica: Amplitud vs frecuencia y ángulo de fase vs frecuencia.
- h) Gráfica resultante de cada prueba: Amplitud y fase vs frecuencia.
- i) Tensión aplicada.

## **6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA MEDICIÓN**

En el proceso de medición pueden presentarse resultados que no concuerdan con características de graficas típicas de transformadores del mismo tipo; se debe revisar si hay error en el proceso de medición, verificando conexiones. Se recomienda realizar nuevamente la prueba. Si después de revisar conexiones los resultados siguen siendo inesperados es conveniente proceder a analizarlos e interpretarlos.

Se deben utilizar dos estrategias para el análisis e interpretación de resultados: **1)** La identificación de características de las huellas que se espera, y **2)** La comparación de una huella con resultados de referencia. El objetivo principal del análisis SFRA es determinar la condición física del transformador, asegurando así que componentes internos no se han movido como resultado de transporte, daños en el aislamiento, o corrientes de falla.

### **6.1 CARACTERÍSTICAS DE LA GRÁFICA**

Los diseños de transformadores y su configuración varían de acuerdo con su aplicación; por tanto, los resultados de la prueba SFRA varían de acuerdo a las diversas propiedades y características de los mismos. Los trazos de SFRA, en rangos de frecuencia específicas, tienen un grado de previsibilidad; en las bajas frecuencias se reflejan características del núcleo, las características del devanado principal se observan en las respuestas de las pruebas de corto circuito. Estas respuestas esperadas pueden usarse para identificar los problemas básicos que pueden existir dentro de un transformador. Además, las diferentes configuraciones de devanado generalmente exhiben patrones distintos debido a su

relación entre las fases y el núcleo. Al entender la relación entre el rango de frecuencias y la configuración del transformador, las deformaciones físicas del transformador pueden ser ubicadas en rangos específicos de la gráfica.

Los distintos tipos de medida producen diferentes formas y características de trazo pero los cambios esperados en los trazos con relación a la huella son similares. Algunas características del trazo indican deformaciones o degradaciones significativas en el aislamiento de un devanado. El indicador de cambio más significativo es la presencia de uno o varios picos de resonancia adicionales en la gráfica de magnitud - frecuencia o la pérdida de uno o varios picos de resonancia respecto a la gráfica de referencia. El siguiente indicador significativo es un cambio en la frecuencia de resonancia para uno o varios picos existentes. Estos son ejemplos de deformación de bobinados.

Otro indicador característico ocurre cuando un trazo continúa aumentando en magnitud, manteniendo la forma similar, en comparación con el trazo original, al aumentar la frecuencia. Esto indica que un bobinado está flojo. La mayoría de las diferencias que se presentan en la gráfica de magnitud son acompañadas por diferencias significativas en la gráfica de ángulo de fase.

Cada tipo de prueba SFRA tiene características propias en el trazo, es decir que cada tipo de prueba tiene asociada una gráfica.

**6.1.1 Prueba de circuito abierto** La prueba de circuito abierto es la prueba más común SFRA que se realiza. De manera similar a una prueba de corriente de excitación, cada devanado es excitado por separado, mientras que todos los otros terminales están abiertos. Las tensiones son medidas en cada extremo del devanado excitado teniendo como referencia tierra. Esta prueba es apropiada 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 en caso de que exista alguna anomalía en el núcleo. Los bobinados de alta 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 por lo general 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; ésta puede ser una red simple o compleja.

Por encima de 500 kHz, los resultados continúan 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.

**6.1.2 Prueba de corto circuito** Las pruebas de cortocircuito están diseñadas para realizar la inspección de 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 cortocircuitados. Esta configuración es similar a una prueba de impedancia de corto circuito o prueba de reactancia de fuga.

La característica del trazo de la prueba de corto circuito es similar a la prueba de circuito abierto con la excepción de la región de bajas frecuencias. A frecuencias bajas, el aumento de la impedancia asociada con la resistencia del núcleo es eliminado. Esto se traduce en un aumento global de la magnitud del trazo SFRA en esta región, como 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. Si se examinan los resultados en un diagrama de Bode, una atenuación inductiva predecible se puede identificar, como se espera, en sistemas de primer orden.

**6.1.3 Prueba de capacitancia entre bobinados** La prueba de capacitancia mide la impedancia entre dos bobinados de diferente tensión. No existe una conexión galvánica entre los devanados que participan en la medición, porque los dos devanados están aislados; este trazo muestra una magnitud creciente en función de la frecuencia. En las frecuencias más bajas, la medición es altamente capacitiva como es de esperarse por la configuración de circuito abierto entre los dos terminales de prueba. A medida que aumenta la frecuencia, una serie de resonancias se forman con una tendencia general de aumento de magnitud. Estas resonancias se forman por las impedancias entre los dos bobinados de diferente tensión.

**6.1.4 Prueba de inductancia entre bobinados** La prueba de inductancia entre bobinados está diseñada para medir la relación de tensión entre dos devanados. Para la configuración de la prueba, la medición se hace uniendo dos terminales coincidentes que se aterrizan a cada lado. Esta configuración es similar a una prueba de espiras de una sola fase. El trazo está dominado por la respuesta de magnitud en las frecuencias más bajas. La magnitud en la región de baja frecuencia es igual a la relación de tensión entre los dos devanados a los que se les realiza la prueba. A mayor frecuencia, se forman una serie de resonancias que generalmente no se examinan, ya que no es el enfoque principal de esta prueba.

## 6.2 COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS

La comparación entre gráficas es la manera como se realiza el análisis de resultados de SFRA para saber el estado del transformador objeto de prueba. Se pueden hacer comparaciones en puntos de referencia con datos anteriores, resultados de una unidad hermana, o entre fases. Las huellas también pueden ser examinadas con los patrones esperados; este tipo de comparación requiere más experiencia, pero se previene que se recojan datos erróneos. Suponiendo que el equipo de prueba es compatible, las conexiones son las mismas, y no hay magnetismo residual, la expectativa inicial es que cualquier comparación de datos debe estar cerca de superposiciones perfectas.

Diversas herramientas y algoritmos están disponibles para comparar y analizar las mediciones de SFRA.

**6.2.1 Inspección gráfica** Las gráficas de la función de transferencia obtenidas mediante la prueba SFRA deben ser cuidadosamente revisadas y examinadas. Este método de análisis es el más común y se basa en un nivel razonable de habilidad. Software informático especializado u hojas de cálculo se utilizan comúnmente para presentar los datos. Es común mostrar las curvas en decibel (dB) versus la frecuencia logarítmica. Este tipo de curva también se conoce como diagrama de Bode. Los diagramas de Bode permiten fácil inspección de resonancias, ya que simplifican la visualización de impedancias cambiantes exponencialmente y son usados en la industria para el análisis de funciones de transferencia. Las curvas también pueden ser graficadas como impedancias o admitancias versus frecuencia; también se pueden utilizar escalas lineales o logarítmicas.

Las gráficas son inspeccionadas por patrones generales esperados debido a la configuración del transformador y por comparación de éstas con otros trazos. Los

otros trazos pueden ser de diferentes fases, unidades hermanas o resultados de línea base. Este método se basa en un examen cuidadoso de las resonancias y las desviaciones de magnitud / fase. Las desviaciones observadas debido a la comparación con otra unidad o fase podrían indicar la deformación física de un componente del transformador.

**6.2.2 Diferencia del trazado** Diferencia del trazado fue uno de los primeros métodos de análisis utilizados para las pruebas SFRA a transformadores. Este tipo de análisis toma dos trazos para compararlos y sustraer uno del otro. El resultado es la diferencia entre las curvas. Las regiones donde la diferencia del trazado es mayor a cero, indican problemas que requieren mayor escrutinio. La mayor variación de la gráfica se debe a cambios de resonancia o a desviación en la magnitud SFRA. Este método no determina la causa del problema, pero ayuda en la identificación de regiones altamente sospechosas. La diferencia de trazado no se utiliza en gráficas de ángulo de fase debido a la sensibilidad de la medición del ángulo de fase.

**6.2.3 Coeficientes de correlación** Los coeficientes de correlación son indicativos de 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 que tan 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. Entre más cerca sea la correlación a uno (1), los trazos son más similares los trazos. Si el valor es -1 indica una relación inversa. La meta para el análisis es obtener un número lo más cercano a uno (1) posible, lo cual indica un alto nivel de correlación entre las dos curvas.

Rangos individuales de frecuencia se pueden analizar por correlación cambiando los límites de frecuencia del algoritmo de correlación. La correlación se obtiene de

un algoritmo que se calcula con la ayuda de software SFRA especializado o programas matemáticos comercialmente disponibles. La covarianza se expresa como  $\sigma_{xy}$  (ecuación 9) y (ecuación 10) indica que tanto se desvían dos curvas una de la otra. El coeficiente de correlación (ecuación 11) se calcula determinando la covarianza de las dos curvas bajo prueba. En caso de aislar ciertas regiones, los límites deben ser cambiados por más o menos infinito en el espectro bajo cuestión.

$$cov(X, Y) = \sigma_{xy} \quad (9)$$

$$\sigma_{xy} = E[(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})] \quad (10)$$

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho \leq 1 \quad (11)$$

Donde:

$\sigma_{xy}$  es la covarianza de los valores medidos de X y Y

$E[ ]$  es la media de la covarianza de las variables X y Y

X es el trazo X y sus valores medidos

$\bar{X}$  es la media de los valores medidos del trazo X

Y es el trazo Y y sus valores medidos

$\bar{Y}$  es la media de los valores medidos del trazo Y

$\rho$  es la constante de correlación que es un valor entre -1 y 1

$\sigma_x$  es la desviación estándar de los valores medidos del trazo X

$\sigma_y$  es la desviación estándar de los valores medidos en el trazo Y

**6.2.4 Datos de línea base** Una medición de línea FRA se realiza en la fábrica cuando el transformador ha sido llenado con aceite y terminado, o como parte de pruebas rutinarias para unidades en servicio, o en una fecha temprana antes de la puesta en marcha en la subestación.

Los datos de línea base o anteriores deberían ser repetibles. Si no ocurre un cambio dentro del equipo bajo prueba, las curvas deberían ser coincidentes. Los trazos coincidentes son definidos como resultados SFRA obtenidos a partir de los mismos terminales de prueba y configuración de transformador. Como ejemplo se consideran las curvas obtenidas de las mismas bobinas, H1-H3, en diferentes fechas.

Se espera que los datos que se recogen antes y después del traslado del transformador deben ser coincidentes. Cualquier variación en tales comparaciones indica un problema. Una excepción, causada por el circuito magnético, se produce a bajas frecuencias y debe ser considerada durante la evaluación. La magnetización puede causar, en ciertos casos, que a frecuencias más bajas las curvas se desvíen ligeramente. Si se sabe que el magnetismo residual está presente, menor escrutinio se debe realizar en esta comparación. Gran diferencia de temperatura típica, más de 15°C, entre dos mediciones influirá ligeramente en la respuesta a frecuencias más altas.

Cabe señalar que la posición LTC y DETC influye en los resultados. Si la prueba se realiza en diferentes posiciones de tap, se debe esperar variación.

**6.2.5 Unidades similares** En unidades genuinas de idéntica fabricación, diseño, y construcción, se espera que los resultados de las pruebas realizadas resulten coincidentes. Se debe tener cuidado cuando se presenta similitud porque aún cuando 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 frecuente cuando se adquieren dos transformadores idénticos para diferentes aplicaciones con varios meses o años de diferencia. El fabricante puede haber realizado modificaciones en el diseño, que no cambia la funcionalidad del transformador, pero pueden presentarse variaciones en los rastros.

Todas las pruebas en unidades similares deben llevarse a cabo con el LTC y DECT en la misma posición. Las regiones de baja y media frecuencia se rigen por el circuito magnético del núcleo y los devanados principales, deben tener la mayor similitud. Es posible que haya mayores variaciones a frecuencias más altas generadas por los cambios en la colocación de la derivación. Entre más unidades hermanas sean comparadas, se puede determinar una huella que sea estable y acertada. Para inspección, es beneficioso comparar varias unidades hermanas con el mismo gráfico.

**6.2.6 Comparación entre fases** Las comparaciones de fase son las más difíciles y requieren mayor experiencia del operario para que se lleven a cabo correctamente. Algunos diseños de transformadores no son completamente simétricos. En estos casos siempre hay variaciones de fase a fase. Debido a esto, es fundamental que los datos de referencia sean obtenidos tan temprano en la vida de un transformador como sea posible. En la mayoría de los casos, las diferentes fases se superpondrán con similitud razonable.

La fase central, especialmente en transformadores de tipo de núcleo, exhibe la mayor desviación al comparar las tres fases. A menudo, las dos fases exteriores son similares. Las distintas trayectorias de flujo magnético que pasan por cada fase contribuyen a las diferencias observadas. Las características del núcleo se evidencian en las frecuencias más bajas; sin embargo, la influencia del núcleo puede solaparse en el intervalo de frecuencias más altas.

Los devanados reales de un transformador trifásico son casi idénticos, pero el esquema de conexión entre las fases puede ser diferente. Como ejemplo, las fases de un devanado en estrella están a diferentes distancias desde el neutro; las posiciones LTC caen en la misma categoría. Como los devanados no están equiláteramente espaciados, las longitudes de cable que entran y salen de cada bobinado son diferentes, afectando la función de transferencia de cada devanado.

En general, la simetría de fase parece ser una función compleja de la disposición física del transformador.

Cuando no existe ninguna prueba de línea base, y no hay ninguna unidad genuina hermana disponible para comparar, es posible determinar los modos de falla por comparación de fase entre bobinados adyacentes.

### **6.3 SFRA Y OTRAS PRUEBAS DIAGNÓSTICAS A TRANSFORMADORES**

Los resultados de SFRA (dependiendo de las conexiones de prueba particulares) se pueden utilizar para confirmar los resultados de otras pruebas de diagnóstico. Estas pruebas incluyen:

- a) Corriente de excitación monofásica.
- b) Relación de vueltas.
- c) Impedancia de corto circuito (Reactancia de fuga).
- d) Resistencia del devanado de DC.

**6.3.1 Corriente de excitación monofásica** Los resultados de la prueba de corriente de excitación monofásica pueden ser comparados con los resultados de la prueba SFRA de circuito abierto en las bajas frecuencias. La prueba de circuito abierto está fuertemente influenciada por las propiedades del núcleo en la frecuencia fundamental. A pesar de que las propiedades del núcleo dependen del nivel de tensión aplicada, se espera que los resultados de SFRA generen un patrón similar a la prueba de corrientes de excitación de una sola fase. Cuando se examinan las gráficas de magnitud en la región de baja frecuencia, sus decibel u ohm deben ser idénticos o muy similares al resultado que arroja la prueba de corriente de excitación realizada con la misma conexión y frecuencia.

**6.3.2 Relación de vueltas** Los resultados de prueba de la inductancia entre bobinas de SFRA en la frecuencia fundamental del transformador dan un resultado similar al de la prueba de relación de transformación. La función de transferencia en decibel u ohm coincide con el número de vueltas de la relación de transformación. Varias frecuencias alrededor de la frecuencia fundamental deben ser promediadas para estimar el valor de relación de transformación.

**6.3.3 Impedancia de corto circuito** La prueba de cortocircuito SFRA en las bajas frecuencias produce una respuesta asociada con la impedancia de corto circuito de los devanados. Esta respuesta se puede comparar con los resultados de la impedancia equivalente individual de cada fase, asumiendo que las pruebas se realizaron en las mismas posiciones de tap. Cualquier diferencia entre las fases en este rango de frecuencia se debe comprobar con un análisis de reactancia de fuga.

**6.3.4 Resistencia de devanado DC** Si la prueba de corto circuito SFRA produce una respuesta horizontal, para frecuencias menores que 30 Hz, los resultados pueden ser comparados con la prueba de resistencia de devanado de DC. Cualquier diferencia entre fases a bajas frecuencias debe comprobarse con una prueba de resistencia de devanado de DC.

## **6.4 MODOS DE FALLA**

En general, la prueba de SFRA es sensible a los defectos causados por cambios geométricos dentro de un transformador. Cualquier defecto de este tipo se conoce como modo de falla aunque dicho defecto no conduzca necesariamente a una falla catastrófica de los equipos. La popularidad de la prueba de SFRA se ha visto impulsada por el deseo de detección de fallas mecánicas en transformadores. Los modos de falla son exclusivos de las variaciones geométricas dentro de un

transformador y puede incluir variaciones en el circuito magnético del núcleo y resistencia de los contactos. Los resultados de prueba SFRA pueden tener variaciones causadas por un único tipo de falla o una combinación de dos o más. Como resultado del agotamiento del aislamiento producido por sobre-corrientes a través del transformador, éste experimenta fuertes y violentas fuerzas electromagnéticas que pueden conducir a modos de falla compuestas.

Estos eventos compuestos pueden complicar el análisis de SFRA, pero éste a menudo ayuda a comprender mejor la condición del transformador. A continuación se enumeran y explican los modos de falla conocidos.

1. Deformación radial de devanado
2. Elongación axial de devanado "Telescopio"
3. Movimiento localizado
4. Defectos en el núcleo
5. Resistencia de contacto
6. Devanado con cortocircuito
7. Devanado en circuito abierto
8. Devanado suelto debido a transporte
9. Magnetismo residual
10. Escudo flotante

Cabe señalar que los efectos de las deformaciones en las mediciones SFRA varían con el tipo de transformador y diseño. El mismo tipo de deformación puede afectar a diferentes transformadores de manera diferente. Los rangos de frecuencia para modos de fallo descritos en las tablas 7 a la 13, son aproximados y puede haber cierta superposición entre los rangos.

Las figuras 7 a la 13 muestran curvas típicas para algunos modos de fallo.

**6.4.1 Deformación radial de devanado** La deformación radial de devanado o "pandeo de aro" es una falla de compresión del bobinado que se caracteriza por un cambio pronunciado en la geometría radial de los devanados. Este tipo de falla puede ser el resultado de fuerzas electromagnéticas de gran intensidad causadas por sobre corrientes. El arrollamiento se somete a alta compresión radial (hacia dentro) y termina con un "pandeo" en toda su extensión. Las fuerzas se concentran en los devanados internos. La deformación radial ocurre de dos maneras: libre y forzada.

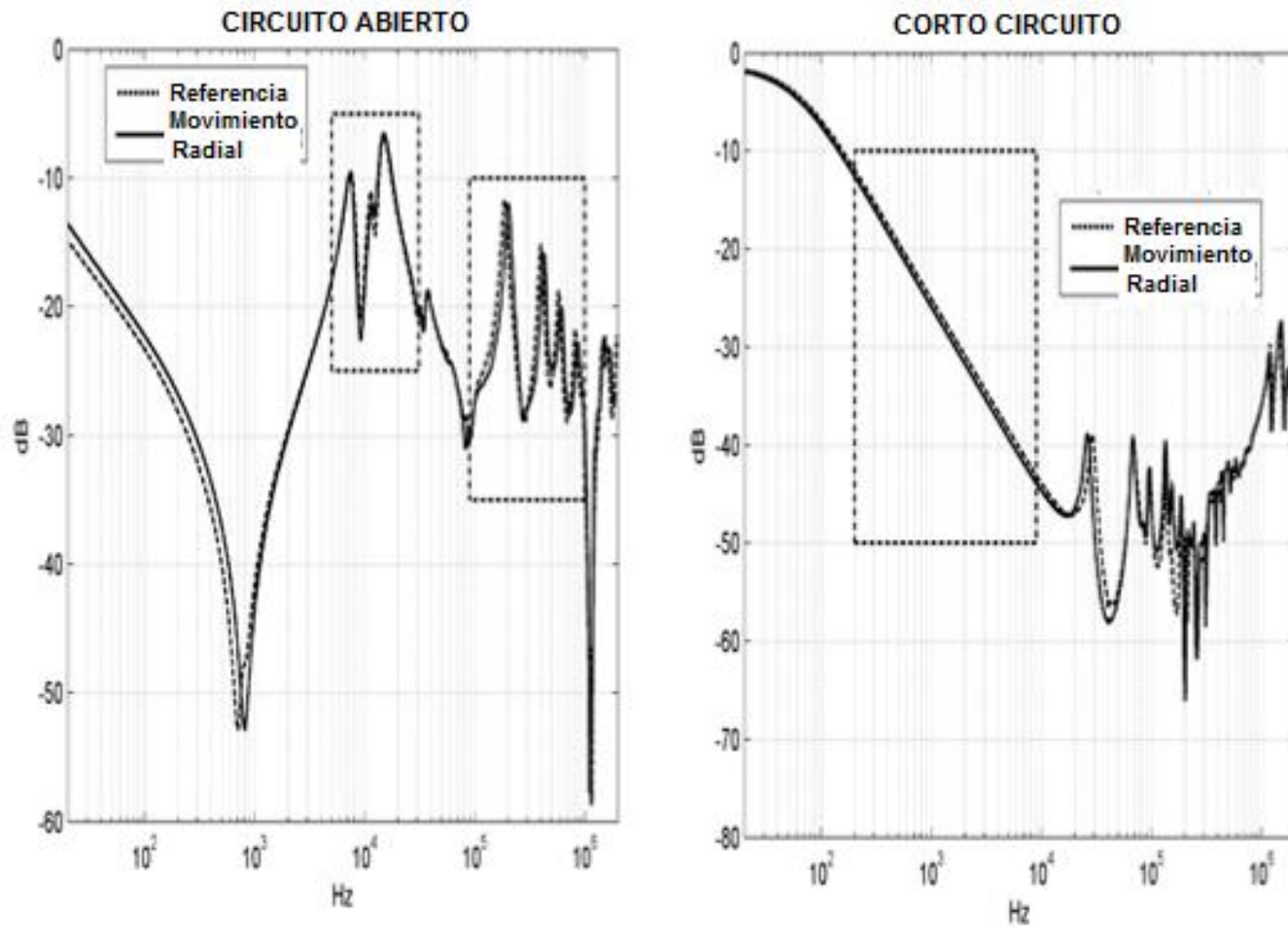
**Tabla 7. Deformación radial de devanado**

<b>Rango de frecuencia</b>	<b>Deformación radial de devanado</b> Si no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto:</b> La región del núcleo no es afectada durante la deformación radial de devanado.</p> <p><b>Pruebas de cortocircuito:</b> Se aumenta la impedancia. La curva SFRA en la fase afectada muestra una ligera atenuación hacia la parte interna.</p>
5 kHz - 100 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> 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.</p>
50 kHz - 1 MHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> 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.</p>

<b>Rango de frecuencia</b>	<b>Deformación radial de devanado</b> Si no existen otros modos de falla
> 1 MHz	<b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> 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 Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

Figura 7. Curvas típicas para deformación radial



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

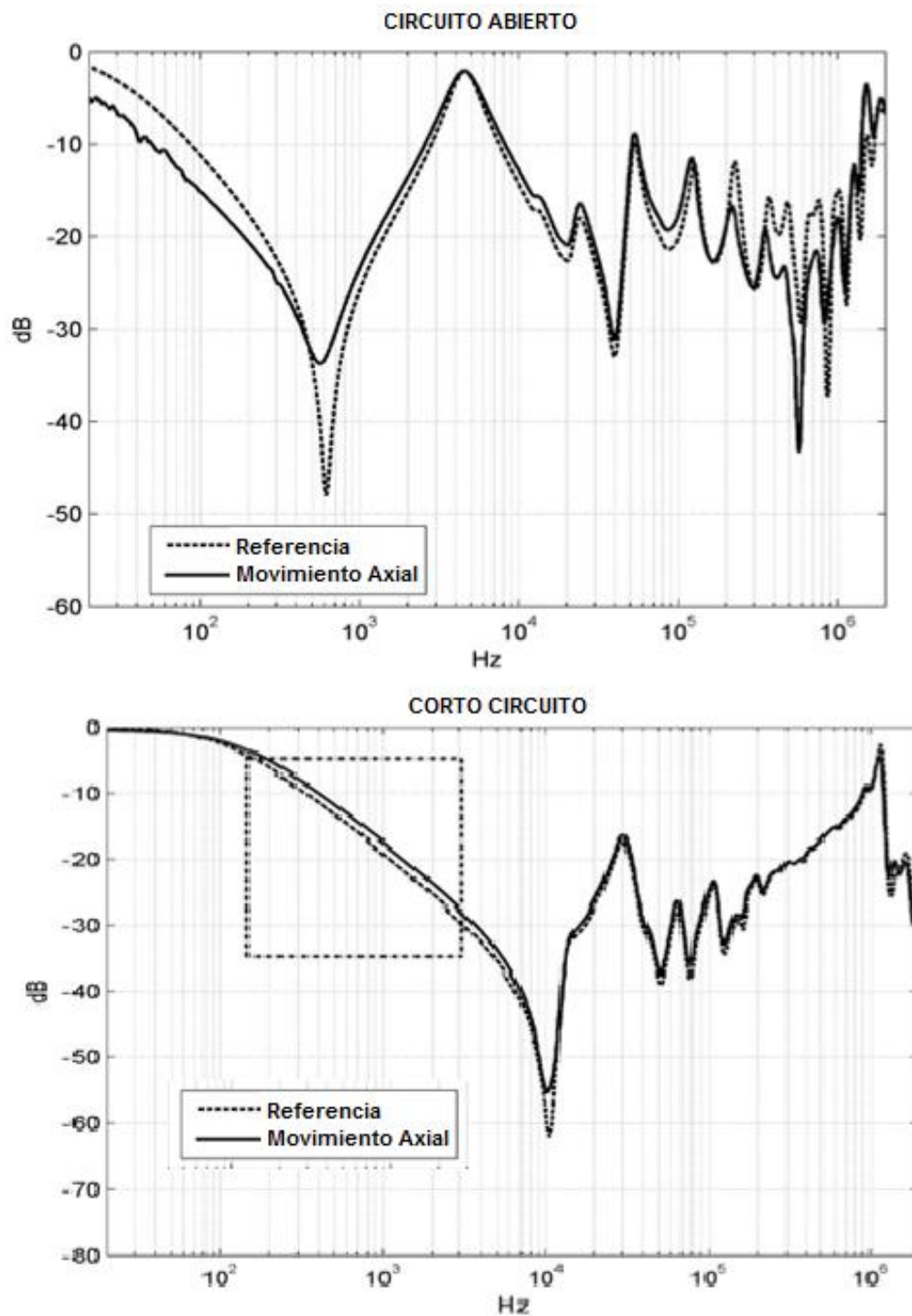
**6.4.2 Elongación axial de devanado - "Telescopio"** Un movimiento axial de bobinado incluye dos tipos de cambios geométricos en el mismo. El devanado se estira o "telescópica" y luego se encoje debido a una reducción en el radio de los devanados. Las variaciones geométricas inducidas por este tipo de falla son complejas y pueden conducir a múltiples resonancias cambiantes a través de una amplia gama de frecuencias.

**Tabla 8. Elongación axial de devanado**

<b>Rango de frecuencias</b>	<b>Elongación axial de devanado</b> Suponiendo, no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto:</b> Esta región (región del núcleo) generalmente no es afectada durante la deformación axial de bobinado.</p> <p><b>Pruebas de cortocircuito:</b> 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.</p>
5kHz - 100 kHz	<p><b>Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:</b> 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.</p>
50 kHz - 1 MHz	<p><b>Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:</b> 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.</p>
> 1 MHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y corto circuito:</b> La respuesta a la deformación axial de bobinado es impredecible.</p>

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

Figura 8. Curvas típicas de elongación axial de devanado



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

**6.4.3 Movimiento localizado** Este modo de falla está relacionado con el movimiento global de los devanados o de alguna sección de un devanado.

Teniendo en cuenta un movimiento global de devanados, las causas pueden deberse a varias razones. Generalmente, este tipo de falla se usa para describir el movimiento de las bobinas debido a choque físico, como resultado del paso de alta corriente o por transporte. El movimiento físico del transformador podría ser debido al envío o actividad sísmica.

**Tabla 9. Movimiento localizado**

<b>Rango de frecuencias</b>	<b>Movimiento localizado.</b> Si no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	<p><b>Pruebas en circuito abierto:</b> Esta región (región central) generalmente no es afectada durante movimiento de bobinado.</p> <p><b>Pruebas de cortocircuito:</b> Esta región generalmente no es afectada durante un movimiento de bobinado. Todas las fases deben ser similares.</p>
5 kHz - 100 kHz	<p><b>Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:</b> 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.</p>
50 kHz - 1 MHz	<p><b>Pruebas en circuito abierto y cortocircuito:</b> 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.</p>

<b>Rango de frecuencias</b>	<b>Movimiento localizado.</b> Si no existen otros modos de falla
> 1 MHz	<b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> Los cambios en la capacitancia CL pueden causar cambios de la curva de resonancia a estas frecuencias.

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

**6.4.4 Defectos en el núcleo** Defectos o fallos ocasionados en el núcleo son causa de cambios en el circuito magnético. Estos defectos básicamente pueden incluir láminas del núcleo quemadas, laminaciones centrales en cortocircuito, partes aterrizadas, pérdida de conexión a tierra y desajuste.

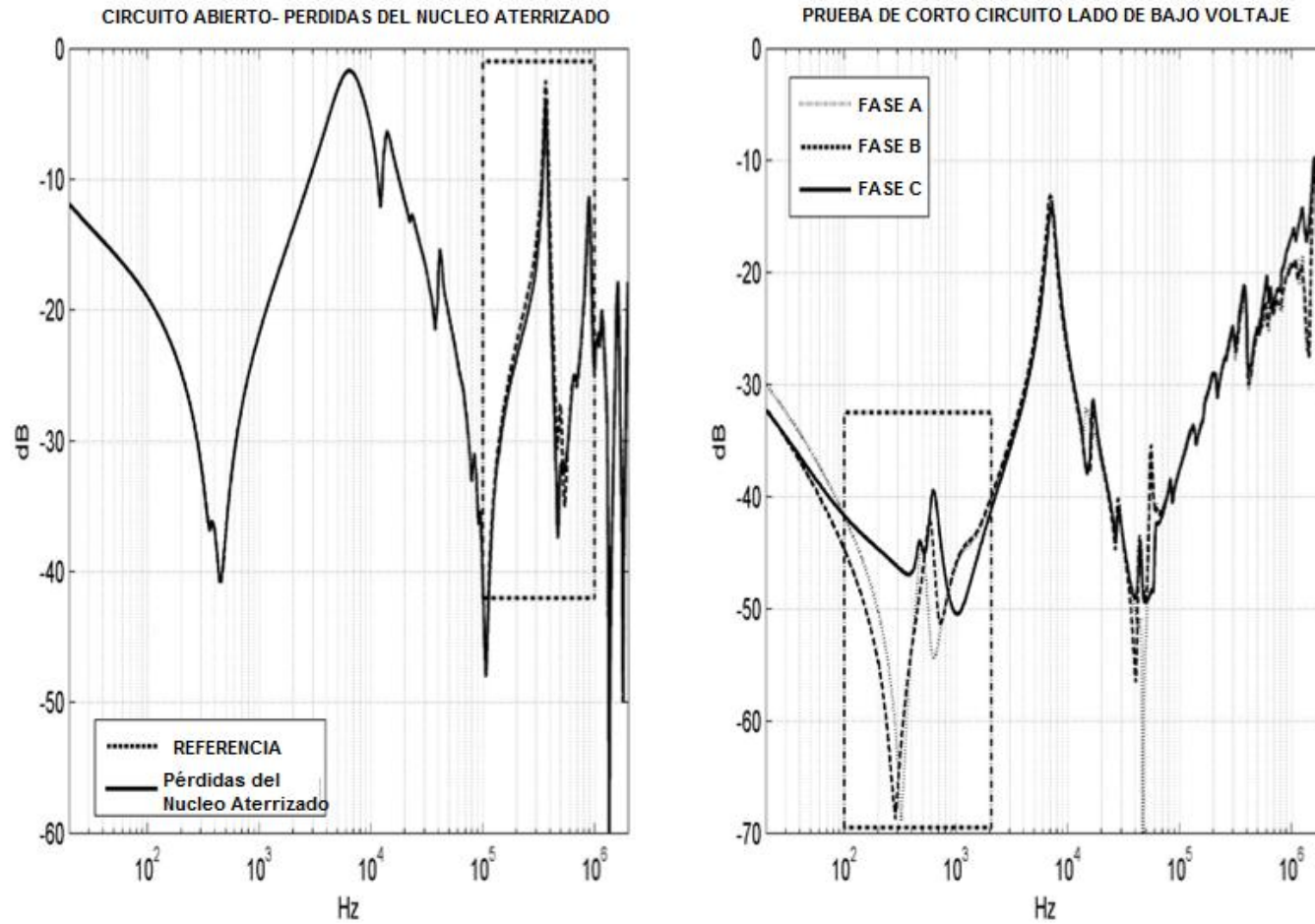
**Tabla 10. Defectos en el núcleo**

<b>Rango de frecuencias</b>	<b>Defectos en el núcleo.</b> Si no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto:</b> 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.</p> <p><b>Pruebas de cortocircuito:</b> Esta región generalmente no se ve afectada cuando hay daños en el núcleo. Todas las fases deben ser similares.</p>
5 kHz - 100 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> En este rango de frecuencias puede haber cambios o producir nuevos picos de resonancia y valles.</p>
50 kHz - 1 MHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> Generalmente, este rango de frecuencias no se ve afectado. Sin embargo, si la falla se debe a problemas con</p>

<b>Rango de frecuencias</b>	<b>Defectos en el núcleo.</b> Si no existen otros modos de falla
	la tierra del núcleo, los cambios de la curva de resonancia pueden aparecer en la parte superior de este rango de frecuencias.
> 1 MHz	<b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> Cambios en la capacitancia CL pueden causar cambios de resonancia.

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

Figura 9. Curvas típicas para defectos en el núcleo



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149<sup>TM</sup>-2012

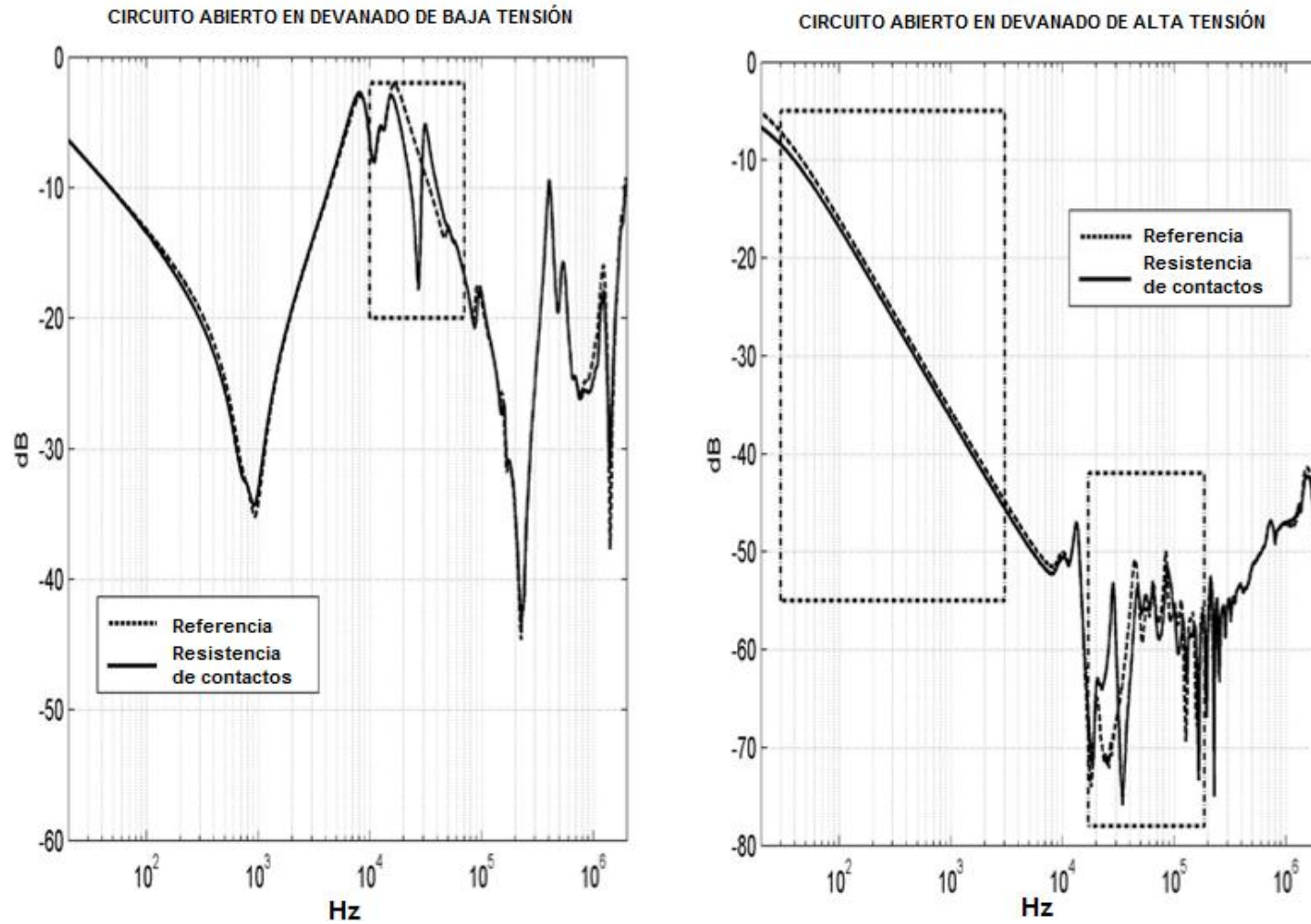
**6.4.5 Resistencia de contacto** Aunque no necesariamente es un modo de falla clásico, resistencias altas de contacto pueden detectarse mediante pruebas de SFRA. Cualquier metal en la superficie de contacto que se conecte a los devanados, LTC o DETC puede generar impedancias más altas en la prueba aplicada. El resultado final puede causar cambios en las frecuencias más altas y bajas. Baja resistencia de contacto puede ser causada por las conexiones sueltas, la corrosión o la quema.

**Tabla 11. Resistencia de contacto**

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

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

**Figura 10. Curvas características para resistencia de contactos**



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

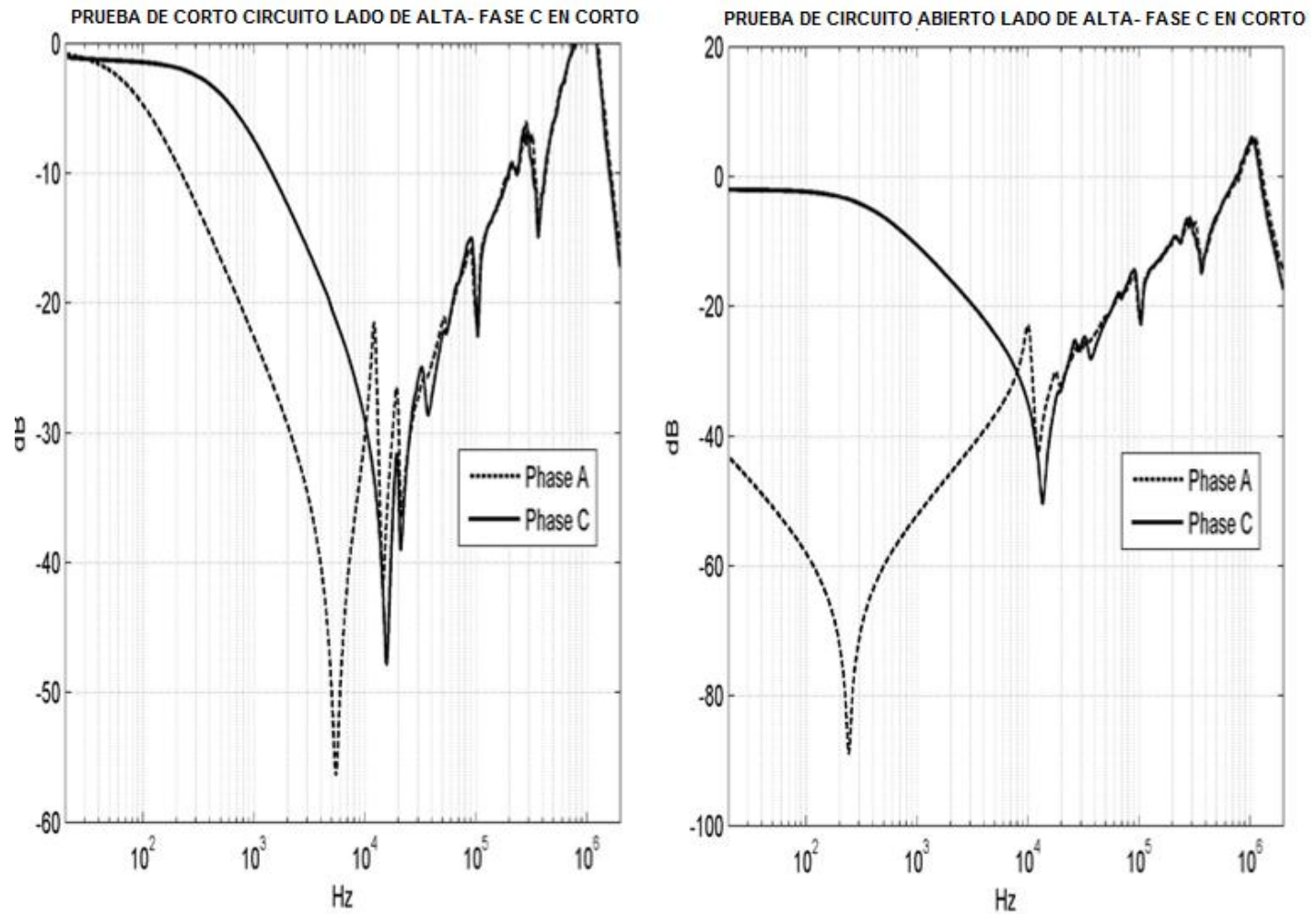
**6.4.6 Bobinado en corto circuito** Este tipo de falla es sin duda uno de los modos de falla más fáciles de identificar por la prueba de FRA. Los cortocircuitos pueden ocurrir entre dos espiras vecinas o entre fases. El corto puede ser una baja impedancia o corto circuito solido o alta resistencia a la línea de fuga.

**Tabla 12. Bobinado en corto circuito**

<b>Rangos de frecuencia</b>	<b>Bobinado en corto circuito</b> Si no existen otros modos de falla
20 Hz - 10 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto:</b> 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.</p> <p><b>Pruebas de cortocircuito:</b> Los resultados no se comparan favorablemente con datos de prueba anteriores o entre fases. El bobinado afectado está generalmente desplazado.</p>
5 kHz - 100 kHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.</p>
50 kHz - 1 MHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada.</p>
> 1 MHz	<p><b>Pruebas de circuito abierto y cortocircuito:</b> Este rango puede cambiar o producir nuevos picos de resonancia y valles. Los cambios serán mayores para la fase afectada</p>

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

Figura 11. Curvas típicas de devanado en corto circuito



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

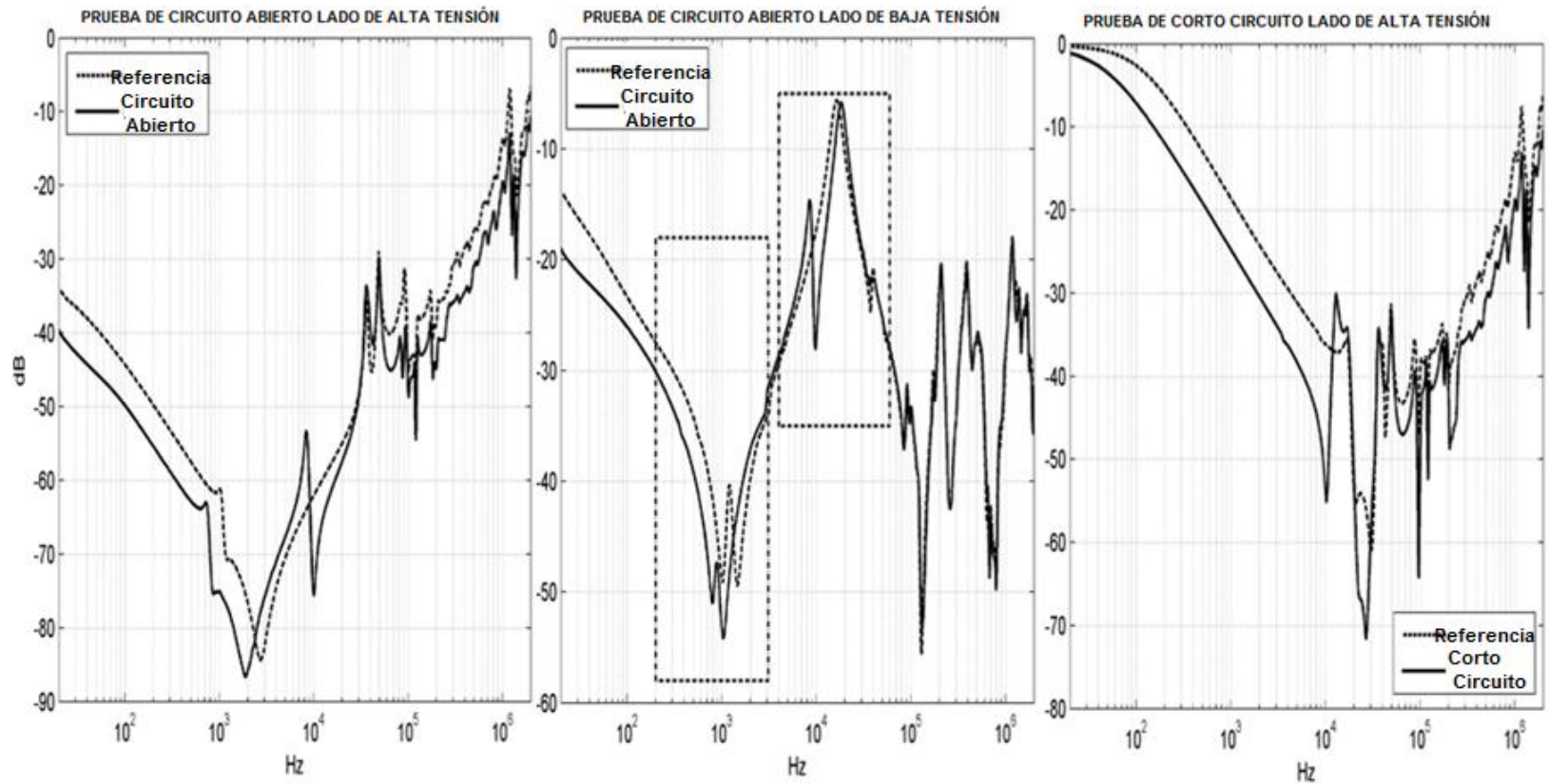
**6.4.7 Devanado en circuito abierto** Un circuito abierto puede ser causado por conexiones que vienen sueltas o bobinas que se quemaron debido a fallas por temperatura catastróficas. El resultado final una alta impedancia que se inserta en el circuito de medición. Es común que la función de transferencia se reduzca en un amplio espectro. Para circuitos abiertos completos, los resultados a menudo se pierden con el ruido de fondo de la medición.

**Tabla 13. Devanado en circuito abierto**

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

Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

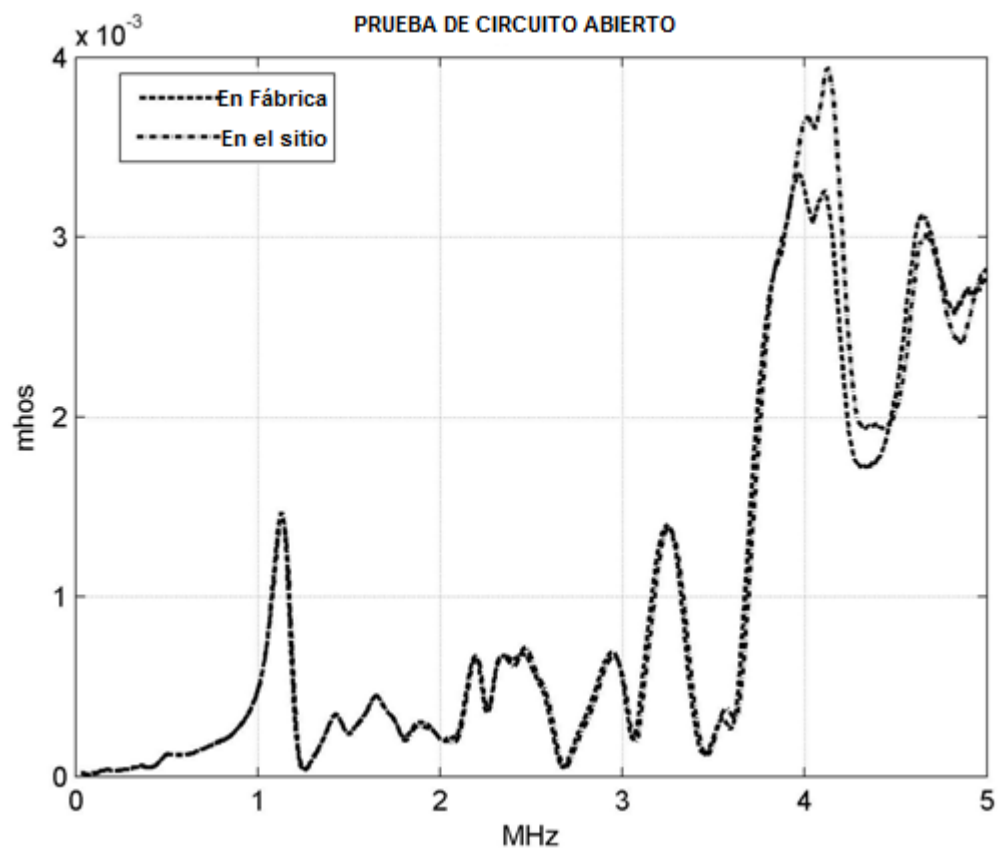
Figura 12. Curvas típicas de devanado en circuito abierto



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

**6.4.8 Bobinado suelto debido al transporte** Que un devanado esté suelto puede ser descrito como un desprendimiento gradual del bobinado generando una distancia axial a lo largo del mismo. Esta es una falla particular debida al transporte y se detecta al realizar la prueba sin aceite antes y después de transportar el transformador y comparar las funciones de transferencia de cada una. Al aplicar la prueba FRA sin aceite se puede notar en la curva alta actividad en las altas frecuencias debido a la reducción de capacitancia del bobinado. Una deformación física debido al transporte genera una diferencia en la curva de resonancia para altas frecuencias de 2MHz a 5MHz.

**Figura 13. Curva típica de bobinado suelto debido a transporte**



Fuente: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149™-2012

**6.4.9 Magnetismo residual** Aunque no es necesariamente una falla, el magnetismo residual debe ser identificado, a fin de no ser mal interpretadas 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 los fenómenos geomagnéticos son fuentes de éste fenómeno residual. Puede ser identificado por el desplazamiento hacia la derecha en las bajas frecuencias de la curva de resonancia en comparación con los resultados de la curva de resonancia sin efectos magnetizantes. La magnetización residual puede ser removida desmagnetizando el núcleo, y esto debe llevarse a cabo si existe preocupación de esta condición exista en el núcleo.

## **7. PRUEBAS REALIZADAS**

Las pruebas realizadas en campo siempre estuvieron monitoreadas, ejecutadas y vigiladas por personas altamente calificadas en pruebas eléctricas, seguridad industrial, ocupacional y ambiental, designadas por el cliente y por la empresa dueña del equipo (Copower Ltda) para garantizar su éxito. También hubo acompañamiento y asesoría académica por medio del director del trabajo de grado.

### **7.1 REALIZACIÓN DE LINEA BASE “HUELLA”.**

La prueba SFRA para generar la línea base fue realizada en campo, en casa bombas Miramar de la refinería Ecopetrol Barrancabermeja; antes de la puesta en marcha del transformador, después de ubicado en el sitio de servicio. Esta prueba se realizó con el fin de proporcionar un estándar de comparación para futuras mediciones de diagnóstico del transformador y por especificación del cliente, en este caso, Ecopetrol.

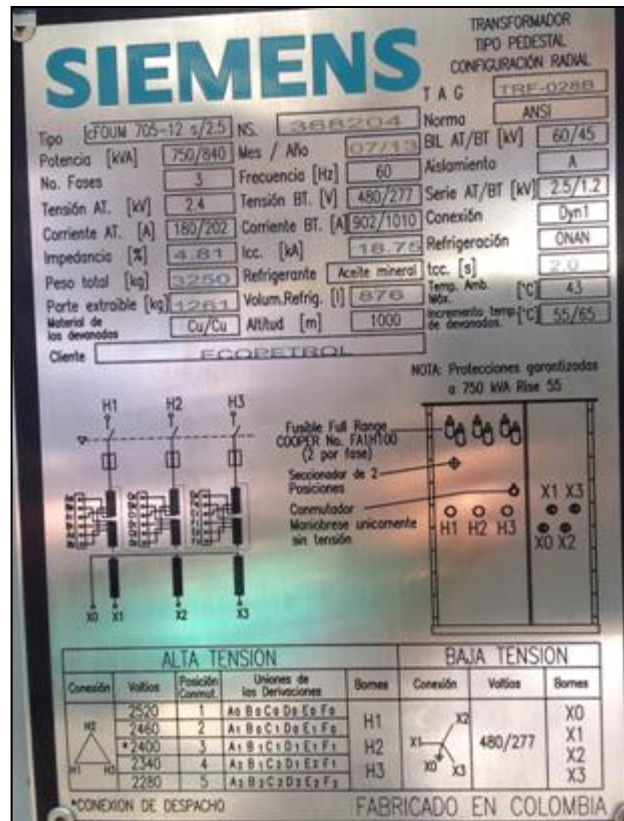
El transformador de marca Siemens, tipo pedestal configuración radial, de 750/840 kVA trifásico bidevanado, conexión Dyn1, tipo de refrigeración ONAN<sup>9</sup> y con datos de placa completos mostrados en la Figura 14.

Las conexiones para la prueba se hicieron siguiendo el procedimiento mencionado en la Tabla 1, con el fin de garantizar la repetibilidad de la prueba.

---

<sup>9</sup> Oil Natural Air Natural.

Figura 14. Placa del transformador



El equipo de medición utilizado para la prueba fue FRAX 101 de Megger (ver Figura 15). Las características del equipo de medición se muestran en el Anexo 7.

Figura 15. Equipo de medición Frax 101



**7.1.1 Preparación del entorno de la prueba** En primer lugar se verificó que el transformador bajo prueba se encontrara completamente aislado de la fuente de alta tensión o sistema de potencia y que el tanque del transformador se encontrara debidamente conectado a tierra (ver Figura 16).

**Figura 16. Transformador aislado de fuente de alta tensión debidamente conectado a la malla de puesta a tierra**



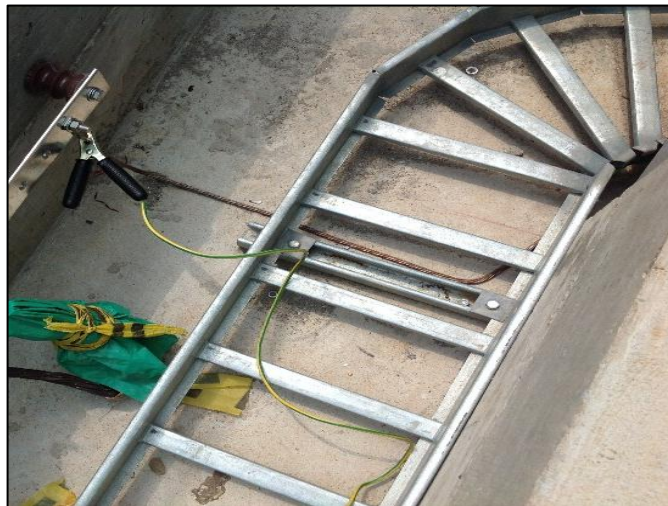
**7.1.2 Preparación del objeto de prueba** Se verifica que todos los bujes externos de conexión se encuentren desconectados, como se muestra en la Figura 17. Esto incluye conexiones de fase, conexiones de neutro, bobinas de estabilización, y tierras terciarias. Las conexiones de los cables de prueba deben hacerse directamente a los bujes terminales.

**Figura 17. Desconexión de bornes de baja tensión**



**7.1.3 Prueba del conjunto (set)** El equipo de prueba conectado al sistema de malla de puesta a tierra y su conexión se debe realizar en el mismo punto que el transformador bajo prueba (ver Figura 18).

**Figura 18. Conexión a tierra del equipo de medición**



El equipo de prueba utilizado se encuentra dentro del intervalo de calibración recomendado, certificado de calibración 70799; ver Anexo 8.

Antes de la prueba se realiza una auto-evaluación del equipo usando un objeto de prueba estándar con una respuesta SFRA conocida, tal y como se ilustra en la Figura 19; para asegurar el correcto funcionamiento del equipo de prueba. La gráfica suministrada por el fabricante del equipo, de la curva de verificación, se muestra en el Anexo 9.

**Figura 19. Forma de conexión para la auto-evaluación y gráfica obtenida**



**7.1.4 Prueba de los cables** Para la prueba se utilizan tres cables coaxiales: Excitación ó "fuente", cable de entrada ó "de referencia" y cable de salida ó "de medida" (ver Figura 20). Estos cables son de la misma longitud y de igual impedancia característica. Se verificó la continuidad e integridad de los cables de prueba antes de su uso con la auto-comprobación SFRA utilizando el objeto de prueba estándar (ver Figura 19).

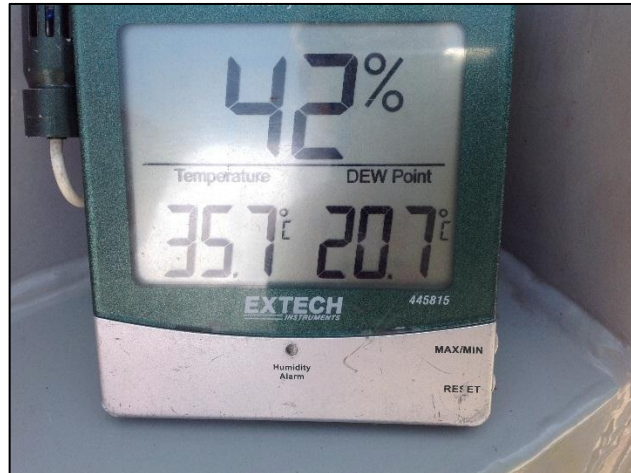
**Figura 20. Cables equipo de medición**



Fuente: Frax User's Manual.

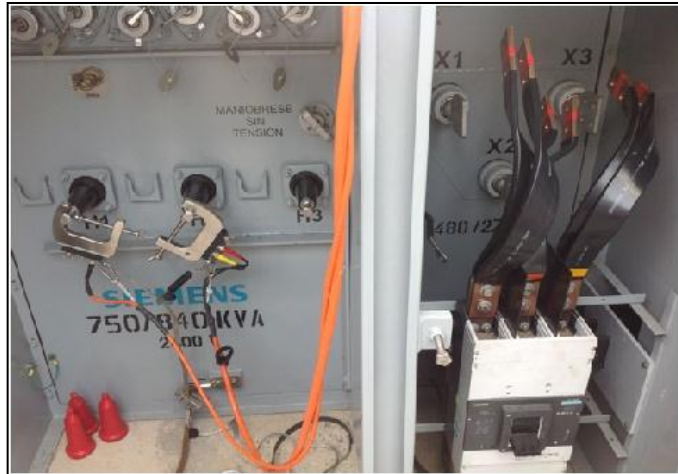
**7.1.5 Configuración de la prueba** Antes de realizar las mediciones se toman datos de temperatura del ambiente, humedad relativa (ver Figura 21), nivel de aceite, situación de aceite (si inmersos o no), motivo de la prueba, datos que se deben diligenciar en formatos estándar. Ver anexos 1 al 6.

**Figura 21. Temperatura y humedad relativa**



**7.1.6 Prueba de circuito abierto** Para la prueba de circuito abierto, cada devanado es excitado por separado, mientras que todos los otros terminales están abiertos; las tensiones son medidas en cada extremo del devanado excitado teniendo tierra como referencia (ver Figura 22 y 23). Todo esto teniendo en cuenta las conexiones de la Tabla 1. Tabla de conexiones para transformadores trifásicos bidevanados.

**Figura 22. Conexión H2-H1 prueba de circuito abierto**



**Figura 23. Conexión H3-H2 prueba de circuito abierto**



**7.1.7 Prueba de corto circuito** La medición de cortocircuito se hace en el extremo de alta tensión del transformador (ver Figura 24 y 25), mientras que el devanado de baja tensión asociado está en cortocircuito.

**Figura 24. Conexión H1-H3 prueba de corto circuito**

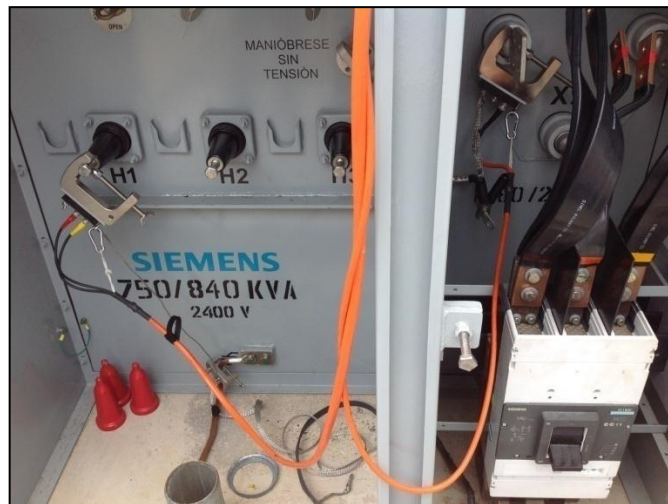


**Figura 25. Conexión H2-H1 prueba de corto circuito**



**7.1.8 Medición de la capacitancia entre bobinas** La medición de la capacitancia entre bobinados se realiza entre dos devanados eléctricamente aislados. Ésta medición se hace en uno de los terminales extremos de un arrollamiento y los terminales del otro bobinado, con todos los demás terminales abiertos (ver Figura 26 y 27).

**Figura 26. Conexión H1-X1 prueba de capacitancia entre bobinados**



**Figura 27. Conexión H2-X2 prueba de capacitancia entre bobinados**



**7.1.9 Medición de la inductancia entre bobinas.** La medición de la inductancia entre devanados o tensión de transferencia, se realiza entre dos devanados, con un extremo de cada devanado a tierra. Todos los otros terminales que no están bajo prueba deben permanecer abiertos (ver Figura 28 y 29).

**Figura 28. Conexión H1-X1 prueba inductacia entre bobinados**



**Figura 29. Conexión H2-X2 prueba de inductancia entre bobinados**



**7.1.10 Resultados de la prueba** Los resultados de la prueba deben quedar consignados en un informe ejecutivo que contenga todos los datos reales de la prueba, como configuraciones específicas de la medición del transformador. Cada

medición en la prueba da como resultado un bloque de datos que se codifican en un archivo y se visualizan mediante un software especializado.

A continuación se presenta el informe ejecutivo resultado de la prueba de barrido de frecuencia SFRA, medición de línea de base; utilizando los formatos mostrados en los anexos 1 al 6. De la Figura 30 a la 34 también se muestra las curvas de magnitud y fase obtenidas para cada tipo de conexión, de acuerdo con la Tabla 1. Tabla de conexiones para transformadores de potencia trifásicos bidevanados.



**RESULTADO PRUEBAS SFRA A TRANSFORMADORES DE POTENCIA  
REALIZADO A ECOPETROL**

**CIUDAD:** B/BERMEJA **REALIZADO POR:** LENNIS CHAPARRO  
**FECHA :** 01/09/2014 **MONICA RONDÓN**  
**HORA** 9:57 AM **EMPRESA QUE REALIZA LA PRUEBA:** UIS  
**UBICACIÓN:** CASA BOMBAS MIRAMAR

**DATOS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA:**

<b>FABRICANTE:</b>	SIEMENS	<b>AÑO:</b>	2013
<b>NUMERO DE SERIE:</b>	368604	<b>IDENTIFICACIÓN:</b>	TRF-128B
<b>POTENCIA MVA</b>	0.750/0.840	<b>TIPO DE REFRIGERACIÓN:</b>	ONAN
<b>NUMERO DE FASES:</b>	3	<b>TIPO DE TRANSFORMADOR:</b>	POTENCIA
<b>VOLTAJE NOMINAL AT [kV]</b>	2.4	<b>TIPO DE CONEXIÓN:</b>	Dyn1
<b>CORRIENTE NOMINAL AT[A]</b>	180/202	<b>VOLTAJE NOMINAL BT, [V]</b>	480/277
<b>IMPEDANCIA CC, % KVA</b>	4.81	<b>CORRIENTE NOMINAL BT [A]</b>	902/1010
<b>TIPO DE DEVANADO:</b>	BIDEVANADO	<b>CORRIENTE DE CC, [A]</b>	18.75
<b>NUMERO DE POSICIONES LTC:</b>	5	<b>MATERIAL DE DEVANADO:</b>	Cu/Cu
<b>POSICIÓN LTC ACTUAL:</b>	3	<b>NÚMERO POSICIONES DETC:</b>	5
<b>TENSIÓN ASOCIADA A POSICION ACTUAL [V]:</b>	2400	<b>POSICIÓN DETC ACTUAL:</b>	3

**OBSERVACIONES:** Ninguna



**RESULTADO PRUEBAS SFRA A TRANSFORMADORES DE POTENCIA  
REALIZADO A ECOPETROL**

**DATOS DEL EQUIPO DE PRUEBA**

<b>NOMBRE</b>	Analizador de Respuesta de Frecuencia de Barrido
<b>MODELO</b>	FRAX 101
<b>FABRICANTE</b>	MEGGER
<b>SERIAL</b>	1100501
<b>IMPEDANCIA</b>	50 ohms
<b>NOTA:</b>	Certificado de calibración # 70799

**DATOS DE CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA**

<b>INMERSO EN ACEITE/SECO</b>	<b>INMERSO EN ACEITE</b>
<b>TEMPERATURA DEL AMBIENTE</b>	35.7 °C
<b>TEMPERATURA DEL ACEITE</b>	39°C
<b>NIVEL DE ACEITE</b>	OK
<b>HUMEDAD RELATIVA</b>	42%
<b>NOTA:</b>	LA LONGITUD DE LOS CABLES PARA CORTO CIRCUITO ES DE 1 METRO

Figura 30. Resultados prueba circuito abierto devanado de alta tensión

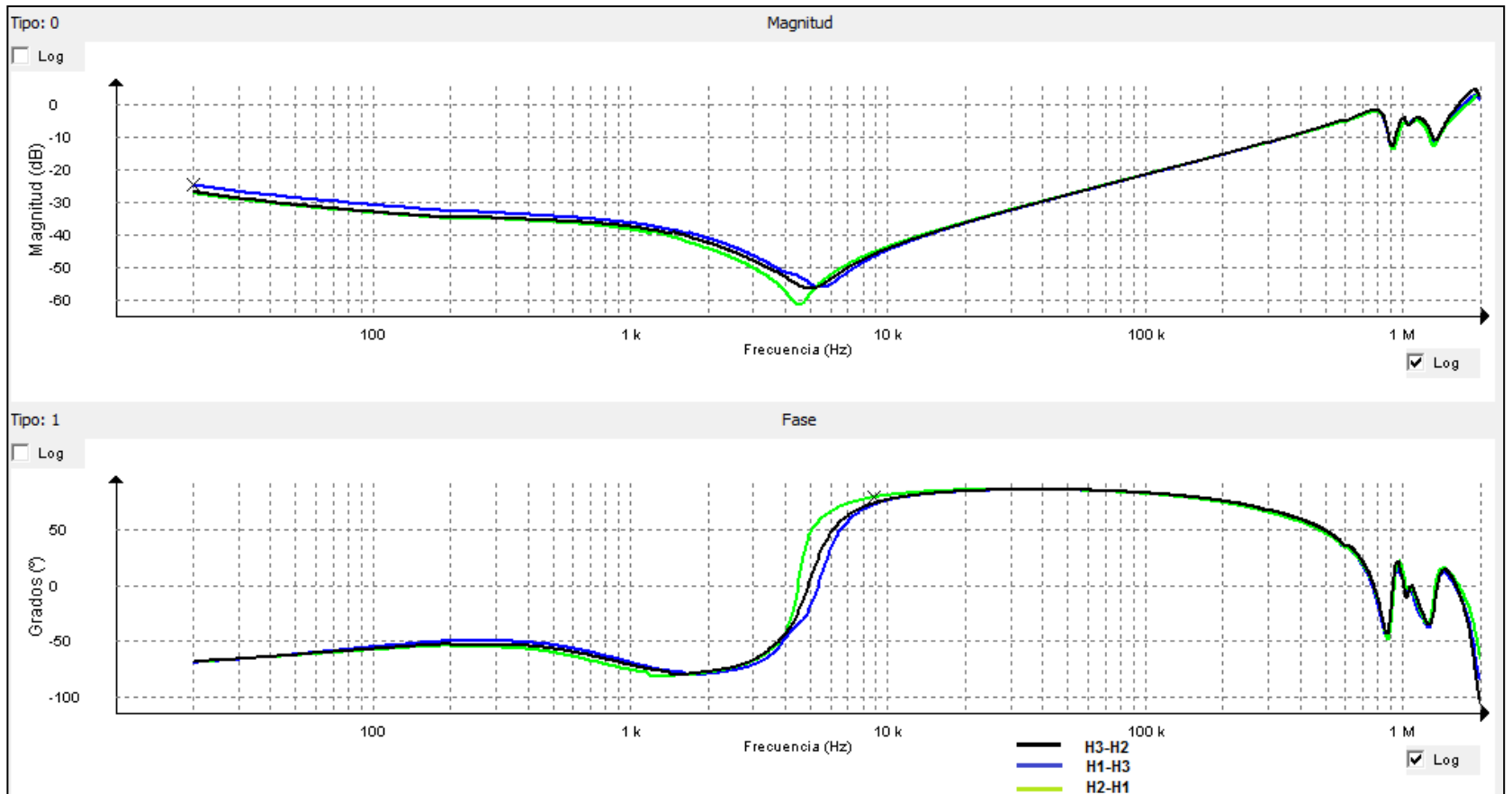


Figura 31. Resultados prueba circuito abierto devanado de baja tensión

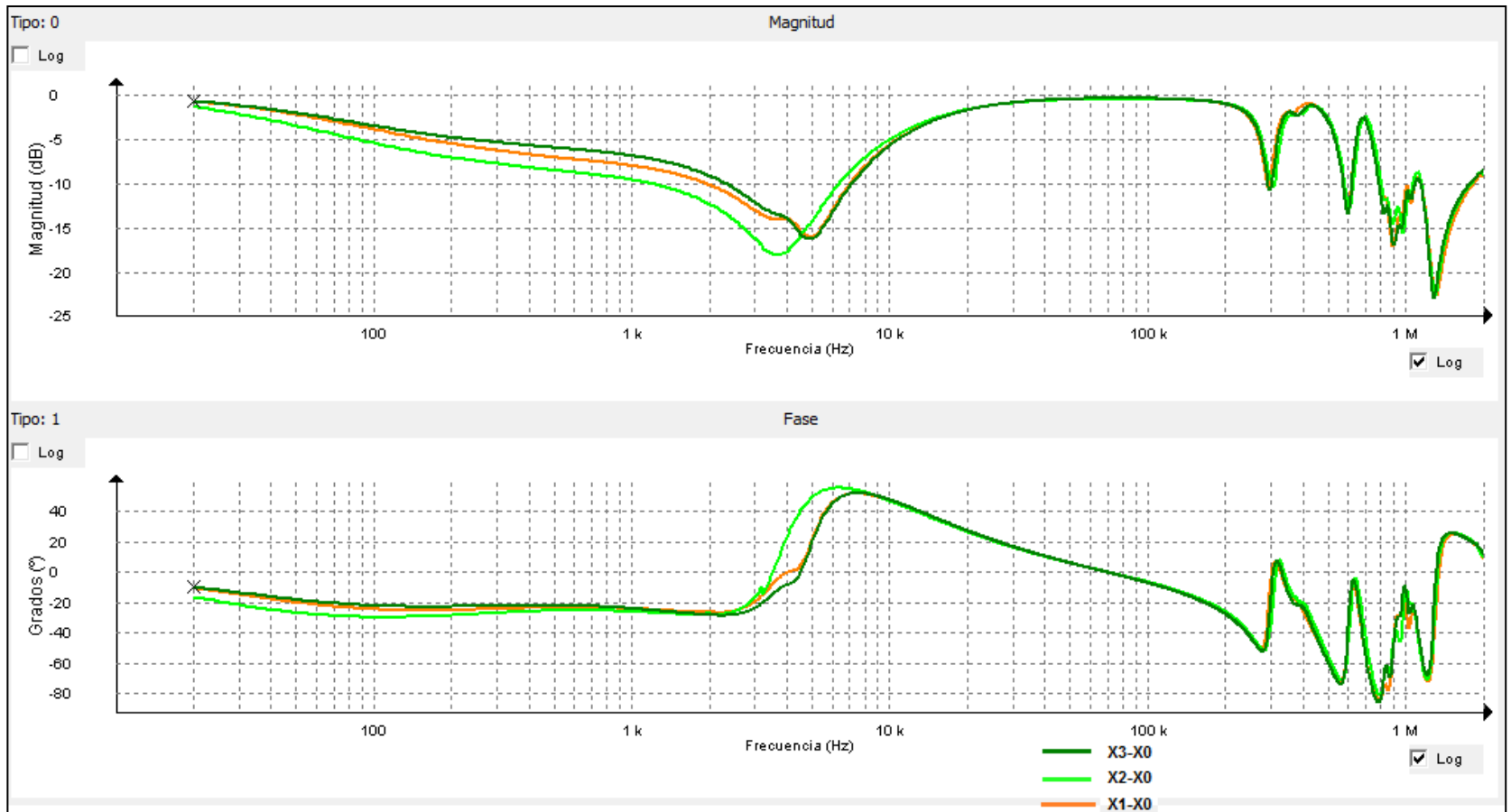


Figura 32. Resultados prueba corto circuito devanado alta tensión

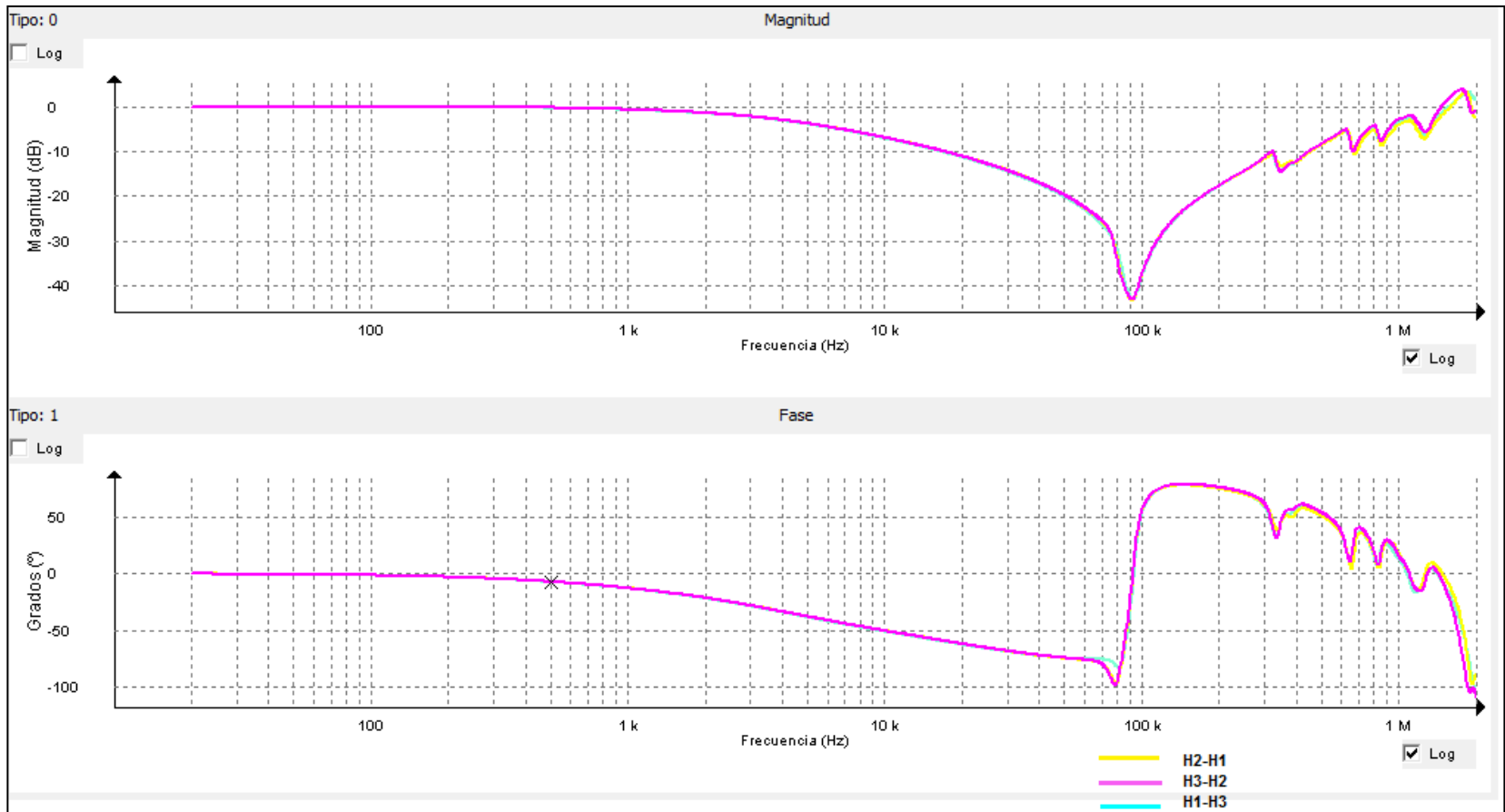


Figura 33. Resultados prueba de capacitancia interdevanados

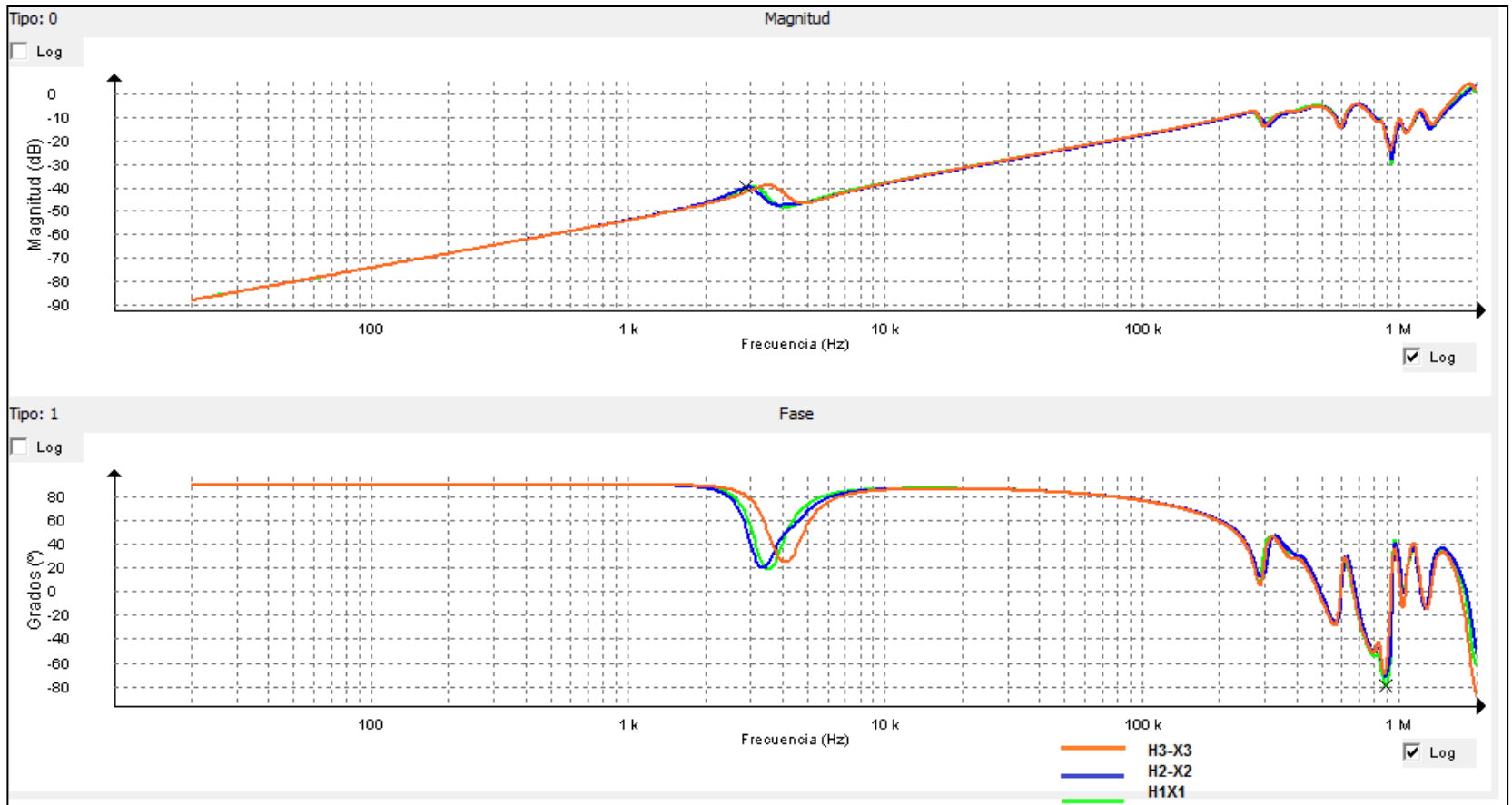
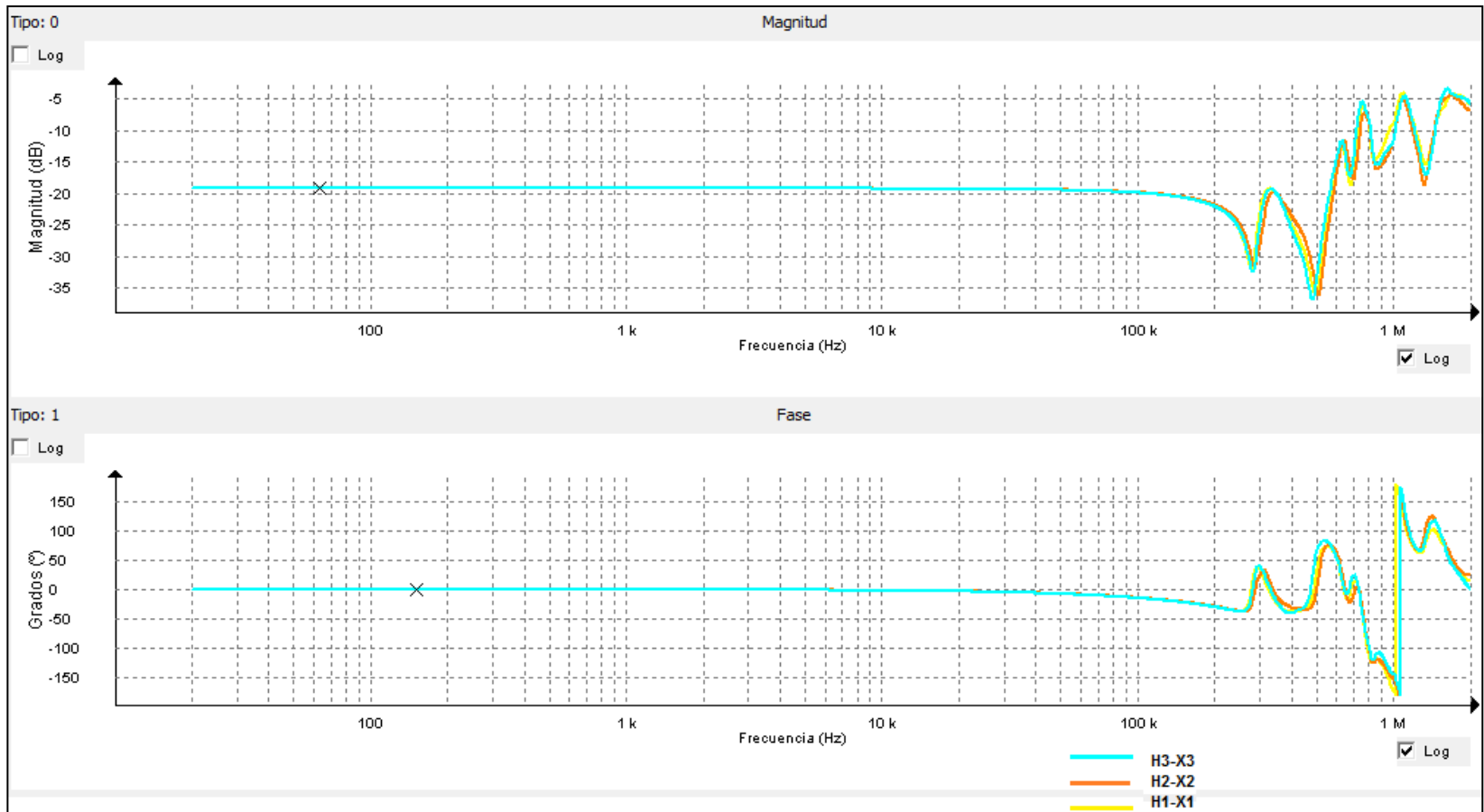


Figura 34. Resultados de la prueba de inductancia entre bobinados.



## **7.2 COMPARACIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS A TRANSFORMADORES GEMELOS**

La prueba SFRA para unidades similares fue realizada en campo, en casa bombas Miramar refinería Ecopetrol Barrancabermeja; antes de la puesta en marcha de los transformadores, después de su ubicación final en el sitio de servicio. Estas pruebas fueron realizadas entre unidades genuinas de idéntica fabricación, diseño, construcción e igual año de fabricación. Se espera que los resultados de las pruebas realizadas sean coincidentes con el fin de proporcionar un estándar de comparación para futuras mediciones de diagnóstico del transformador.

Los transformadores son marca Siemens, tipo pedestal configuración radial, de 750/840 kVA, trifásicos bidevanados, conexión Dyn1 y con tipo de refrigeración ONAN. Los datos de identificación son: TRF-028A y TRF-028B y números de serie 368203 y 368204 respectivamente.

Las conexiones realizadas para la prueba se hicieron al igual que para la línea Base y siguiendo el procedimiento mencionado en la Tabla 1, con el fin de garantizar la repetibilidad de la prueba.

Algunas condiciones especiales que se tuvieron en cuenta para la obtención de las curvas de barrido de respuesta en frecuencia en los transformadores gemelos son las siguientes:

- Condiciones ambientales similares tales como temperatura y humedad relativa (una variación menor al 15°C no representan cambios considerables en las mediciones).
- Los dos transformadores conectados a la misma malla de puesta a tierra (ver Figura 35).

**Figura 35. Conexión a malla de puesta a tierra de los transformadores**



- Características de funcionamiento idénticas: igual grupo de conexión, igual posición del cambiador de tomas (DETC), desconexión de tierra si existe conexión estrella en algún devanado. Para mayor detalle los datos de placa son mostrados en la Figura 36.

**Figura 36. Placas de transformadores gemelos**



- El nivel de aceite adecuado y similar. Un cambio a aceite nuevo produce un aumento en la permitividad y por ende un cambio en la capacitancia; por tanto

se produce, en un mismo factor, un desplazamiento de la curva hacia frecuencias bajas.

- Desconexión de la malla de puesta a tierra del punto neutral, debido a que los transformadores tienen conexión Dyn1 (ver Figura 37).

**Figura 37. Neutro sin conexión a malla de puesta a tierra**



- Igual posición del cambiador de tomas sin tensión y en la posición de trabajo (ver Figura 38).

**Figura 38. Posición del cambiador de tomas para los transformadores**



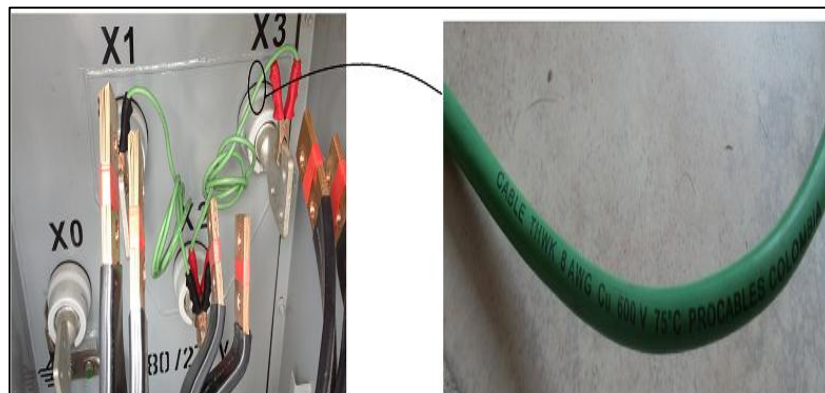
- Los cables de conexiones al sistema de puesta a tierra deben ser lo más cortos posibles, sin formar bucles o lazos (ver Figura 39).

**Figura 39. Mínima distancia de conexión al sistema de puesta a tierra**



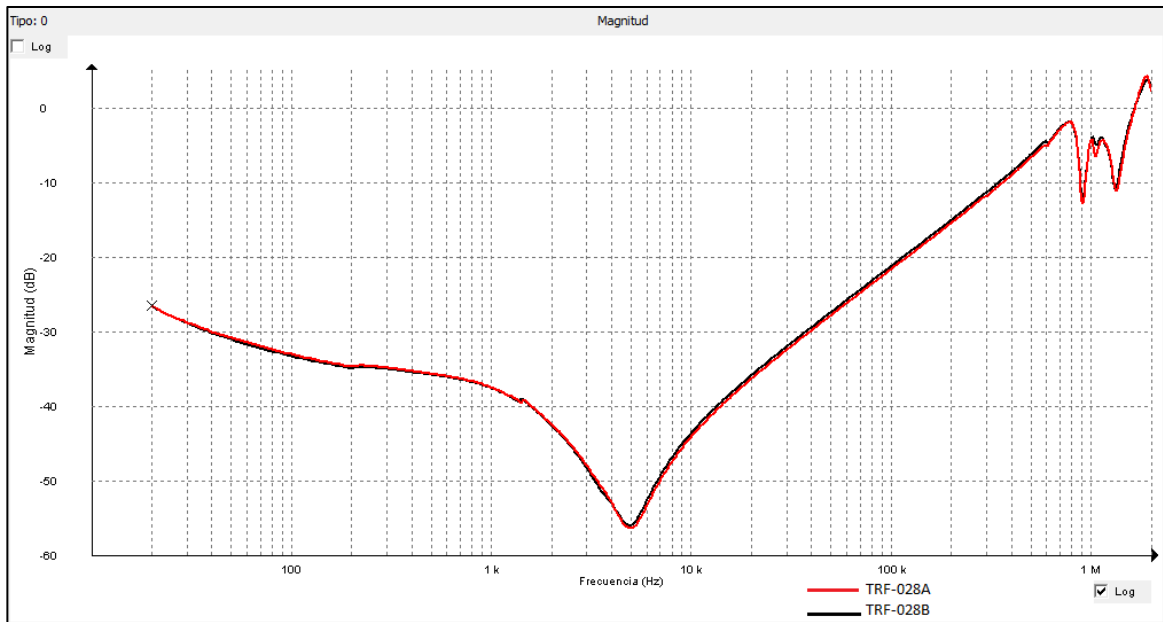
- Los cables con los que se realizan los cortocircuitos de los bornes en las diferentes pruebas deben ser de una longitud conocida y la menor posible (en este caso 1 m). Se deben registrar sus dimensiones y características (ver Figura 40).

**Figura 40. Tipos de cables utilizados**

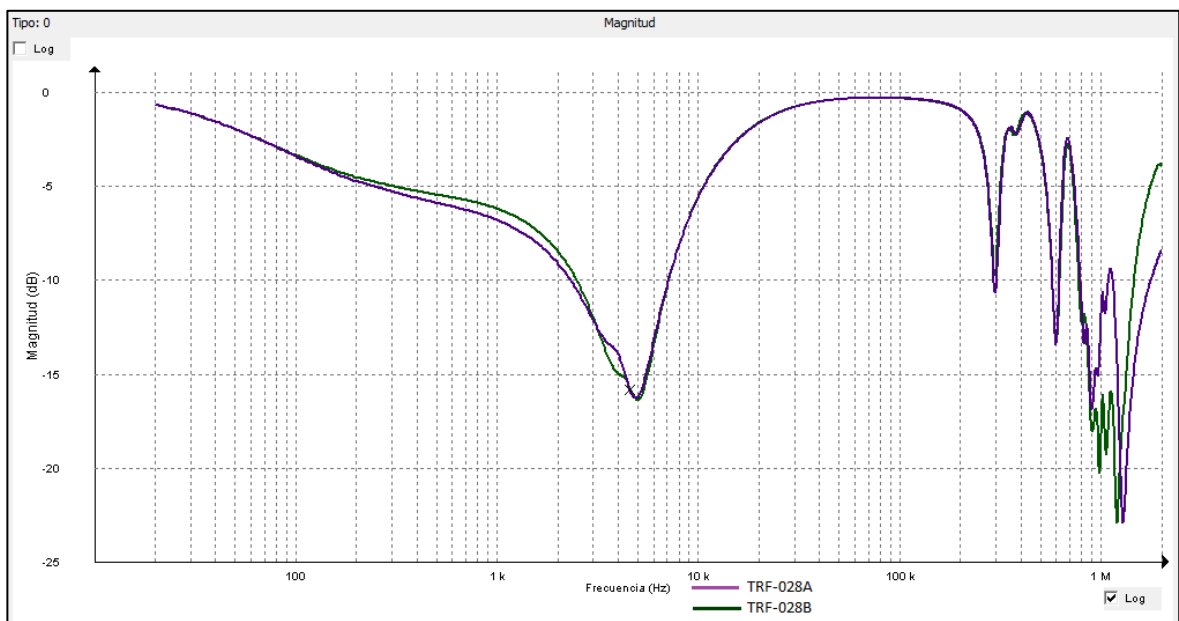


De la Figura 41 a la 45 se visualizan las curvas comparativas entre los transformadores gemelos para cada tipo de prueba y realizadas con conexiones de acuerdo a la Tabla 1.

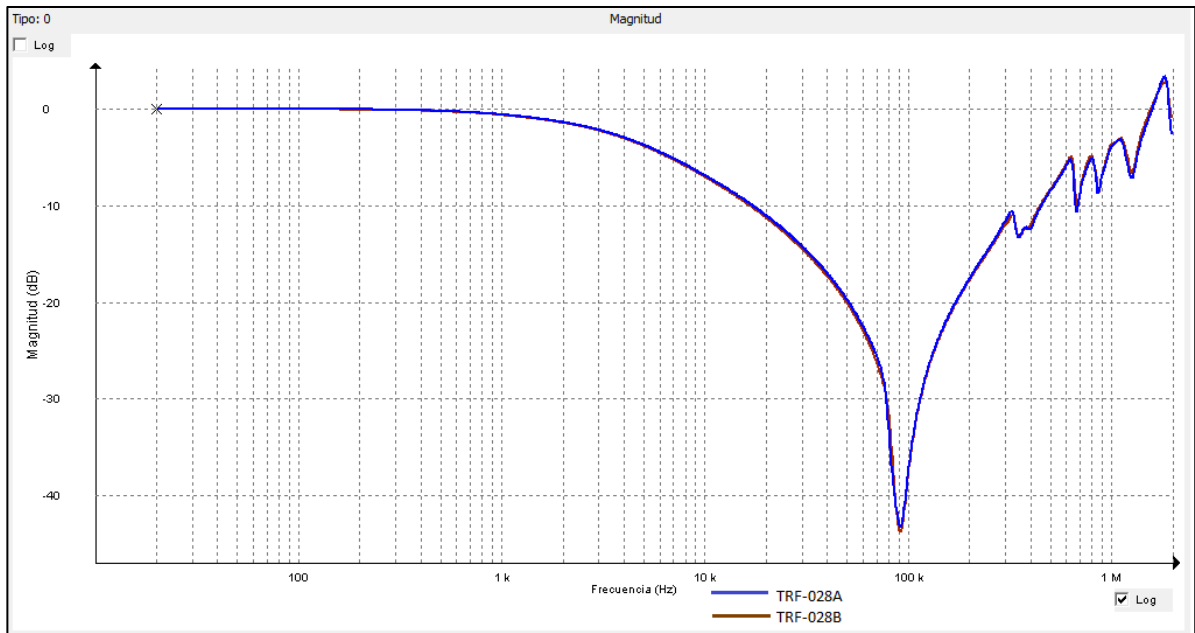
**Figura 41. Resultados de la prueba de circuito abierto, conexión H3-H2**



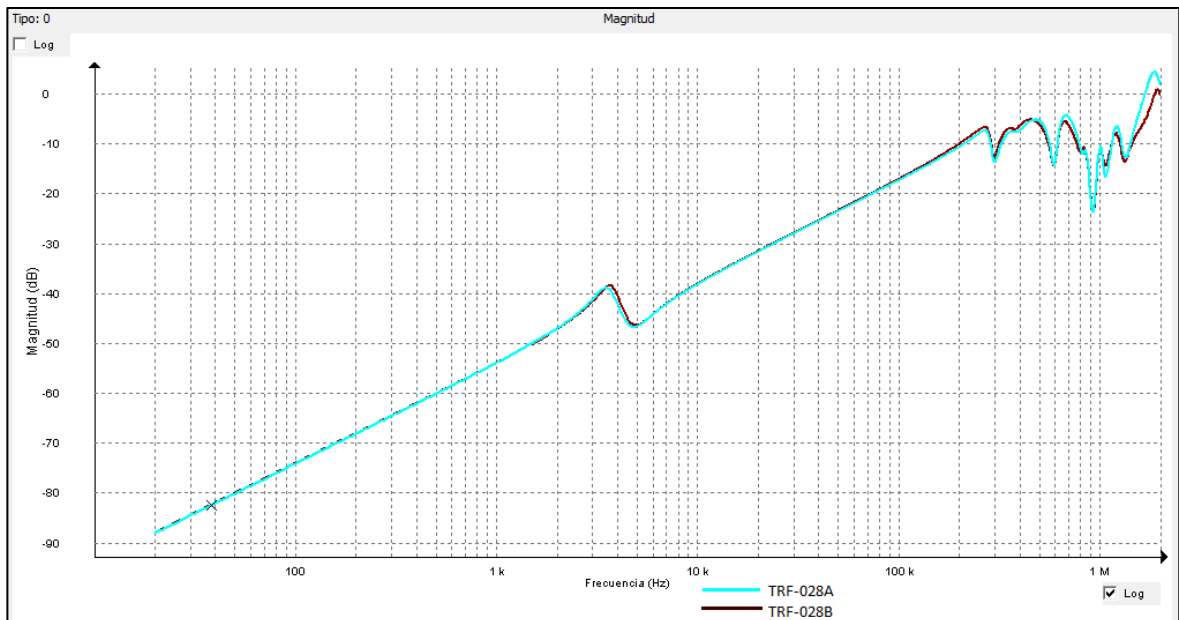
**Figura 42. Resultados de la prueba de circuito abierto, conexión X3-X0**



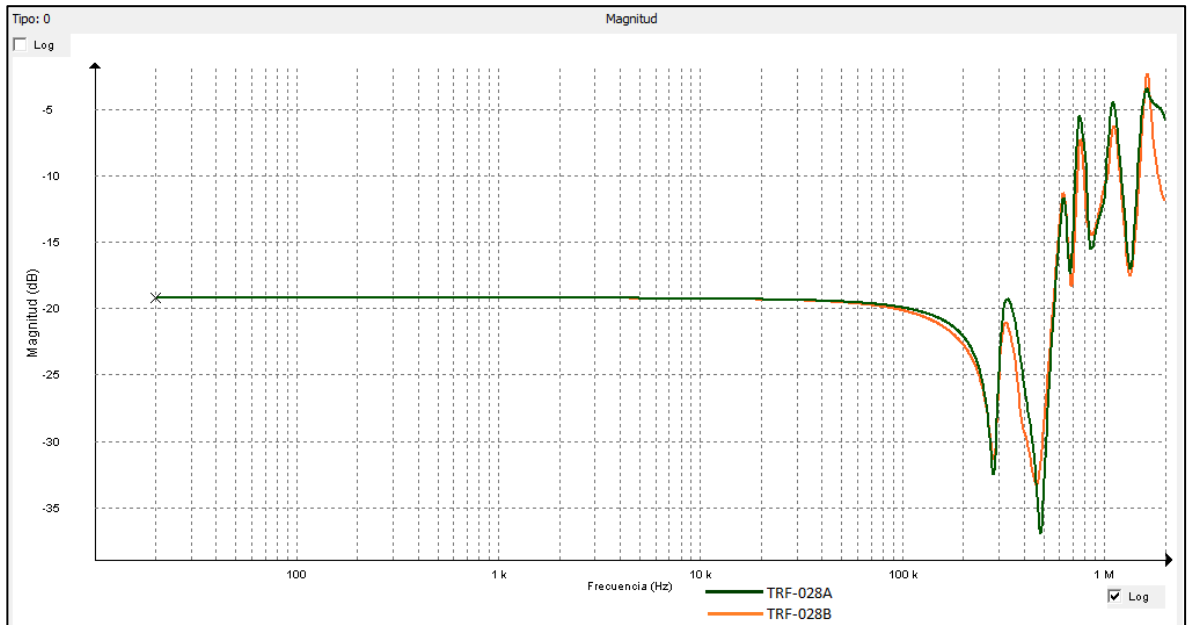
**Figura 43. Resultados de la prueba de corto circuito, conexión H2-H1**



**Figura 44. Resultados de la prueba de inter-devanados capacitiva conexión H3-X3**



**Figura 45. Resultados de la prueba de inter-devanados inductiva conexión H3-X3**



**7.2.1 Análisis de resultados** Como se observa en las figuras 41 a 45 las curvas de la prueba SFRA obtenidas para transformadores genuinos de idéntica fabricación son muy similares. Al calcular el índice de correlación mediante el software del equipo de medición (ver Anexo 10 algoritmos para cálculo de correlación FRAX 101) para cada una de las conexiones de prueba los resultados fueron los mostrados en las tablas 14 a la 18:

**Tabla 14. Correlación prueba de circuito abierto at conexión H3-H2**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	3,38	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	4,94	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	2,97		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal

**Tabla 15. Correlación prueba de circuito abierto BT conexión X3-X0**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	2,80	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	2,49	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	1,49		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de los devanados normal.

**Tabla 16. Correlación prueba de corto circuito conexión H2-H1**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	3,33	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	3,45	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	1,81		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal.

**Tabla 17. Correlación prueba inter-devanados capacitiva conexión H3-X3**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	3,33	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	1,90	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	2,11		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal

**Tabla 18. Correlación prueba inter-devanados inductiva conexión H3-X3**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	3,03	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	1,11	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	0,90		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal

Teniendo en cuenta que los transformadores a los que se les realizó la prueba eran equipos nuevos, que no habían presentado ningún cambio después de salir de fábrica, era de esperarse que las curvas obtenidas fueran coincidentes y se superpusieran bien, indicando el estado de los devanados como normal.

Los resultados obtenidos en las pruebas son aceptables según las normas y estándares IEEE por lo que se considera que los transformadores se pueden energizar.

- No hay indicación de cambios mecánicos ni cambios eléctricos en los transformadores.
- No hay referencia de mediciones de SFRA de fábrica por lo que se hizo la comparación entre transformadores gemelos,
- Estos resultados se pueden tomar como huella dactilar de los transformadores para ensayos de diagnóstico futuros.

### **7.3 COMPARACIÓN ENTRE FASES**

Los modos de falla por comparación de fase entre bobinados adyacentes se utilizan cuando no existe prueba de línea base y no hay unidad genuina hermana disponible para comparar.

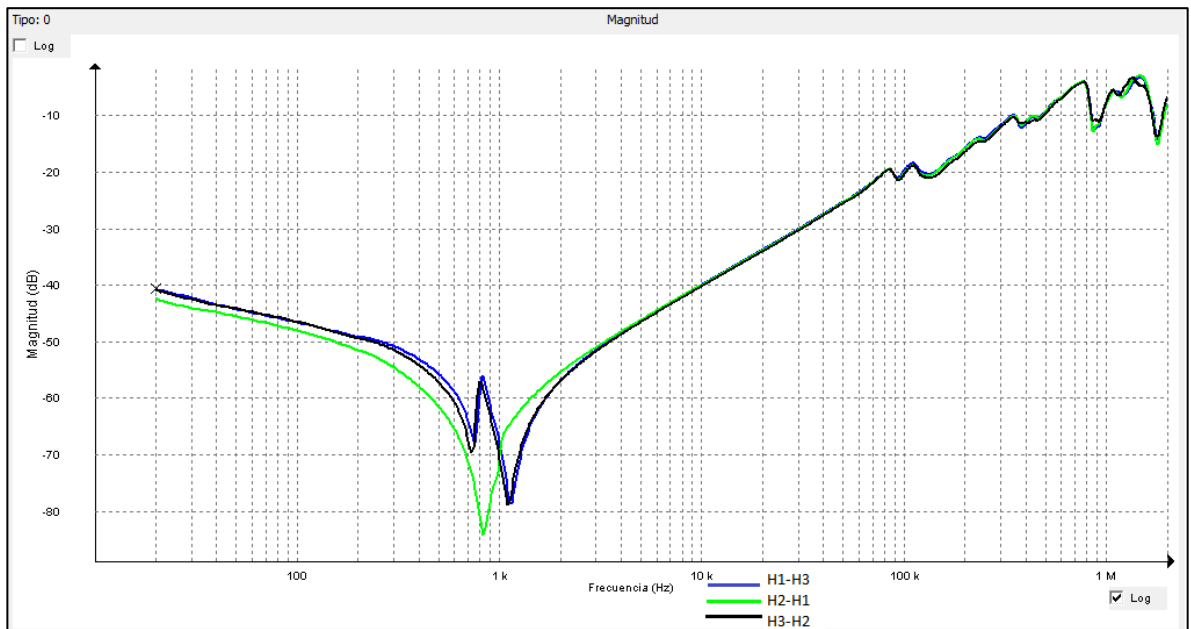
Para realizar la comparación entre fases de la prueba SFRA se tomaron datos en una bodega de Bavaria a un transformador marca ABB, de 1,5 MVA, trifásico, bidevanado, conexión Dyn1 y con tipo de refrigeración ONAN. El número de serie del transformador: 1LCB349743.

Para la toma de datos de esta prueba se tuvieron en cuenta las precauciones mencionadas en capítulos anteriores.

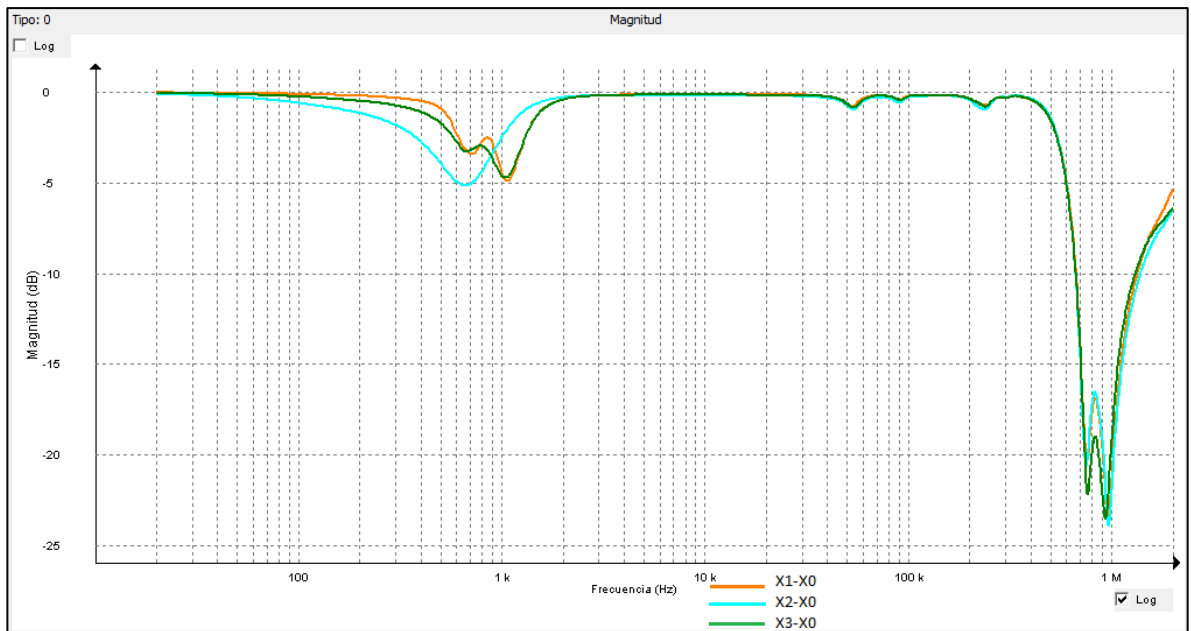
Las conexiones realizadas para la prueba se hicieron igual que para la línea base, siguiendo el procedimiento mencionado en la Tabla 1, con el fin de garantizar la repetibilidad de la prueba.

A continuación en las figuras 46 a 50 se dan a conocer las curvas obtenidas para los diferentes tipos de prueba:

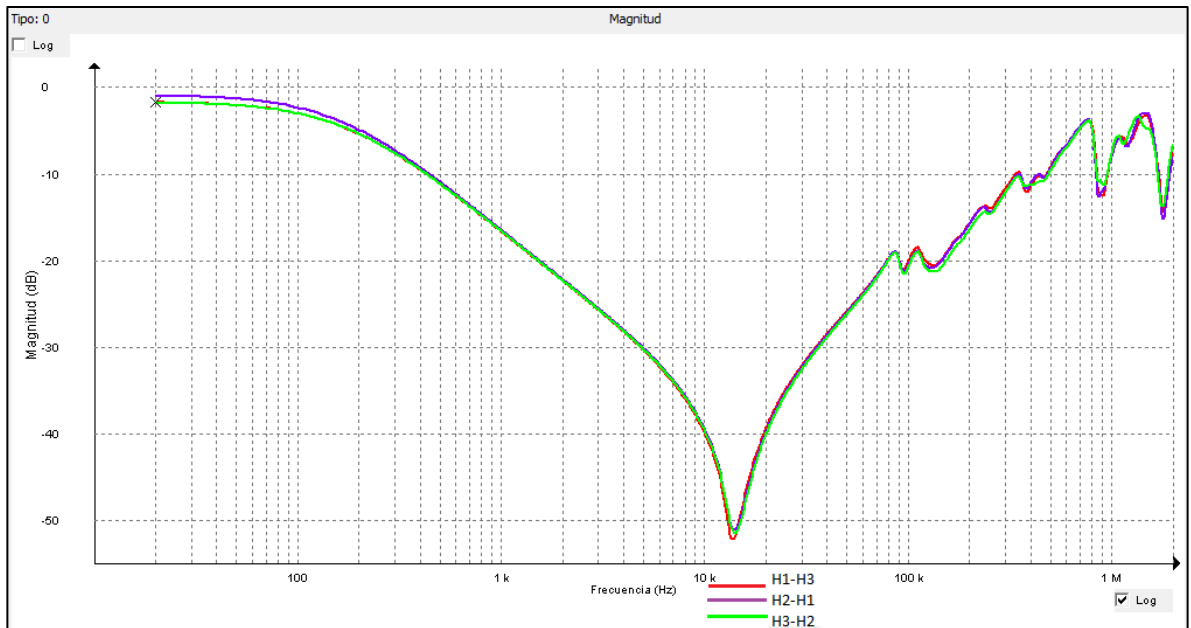
**Figura 46. Resultados de la prueba de circuito abierto, devanado de alta tensión**



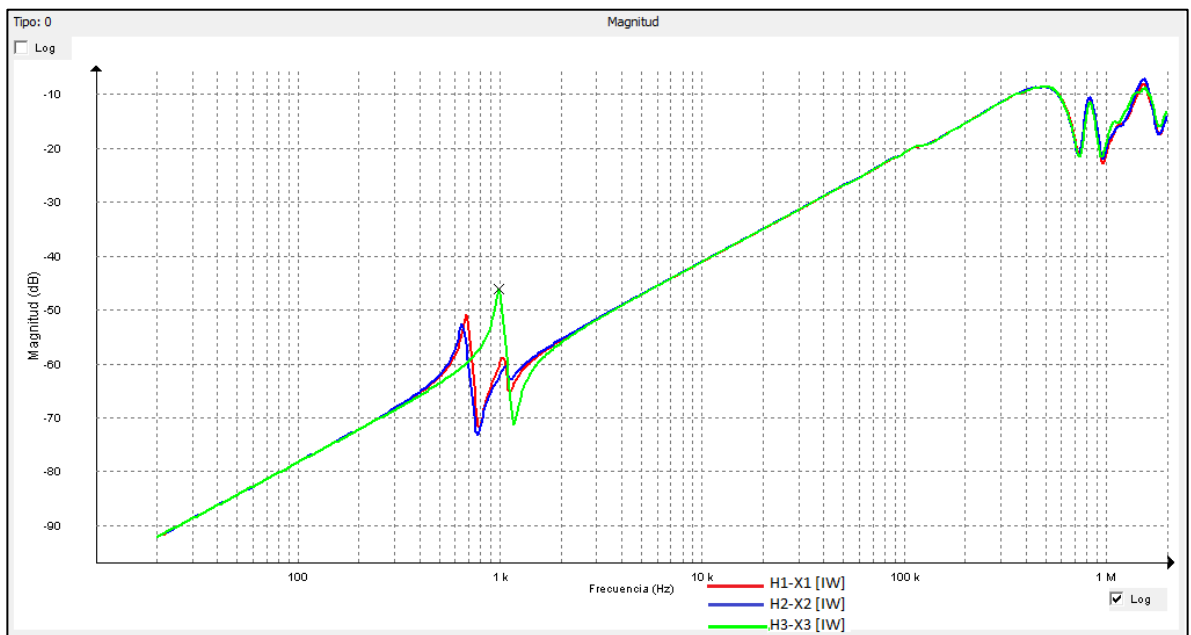
**Figura 47. Resultados de la prueba de circuito abierto, devanado de baja tensión**



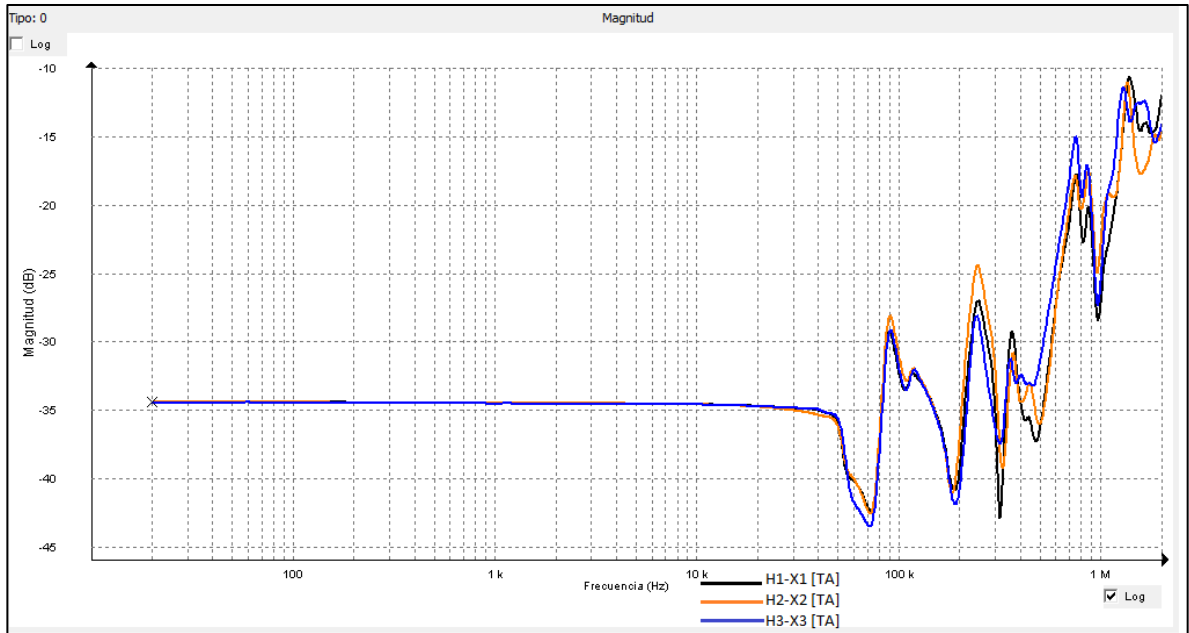
**Figura 48. Resultados de la prueba de corto circuito**



**Figura 49. Resultados de la prueba de capacitancia inter-devanados**



**Figura 50. Resultados de la prueba de inductancia inter-devanados**



**7.3.1 Análisis de resultados** Como se observa en las figuras 46 a 50, las curvas obtenidas entre bobinas adyacentes presentan la mayor similitud, por lo que es pertinente analizar la correlación entre ellas. La correlación se calcula mediante el software del equipo de medición (ver Anexo 10, algoritmos para cálculo de correlación FRAX 101) y sus respectivos resultados se consignan en las tablas 19 a la 23.

**Tabla 19. Prueba de circuito abierto at correlación entre conexión H3-H2 y H1-H3:**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	3,27	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	2,72	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	2,09		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal

**Tabla 20. Prueba de circuito abierto bt correlación entre conexión X1-X0 Y X3-X0:**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	2,79	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	3,74	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	1,62		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de los devanados normal.

**Tabla 21. Prueba de corto circuito correlación entre conexión H1-H3 Y H3-H2:**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	2,91	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	2,72	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	2,02		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal.

**Tabla 22. Prueba inter-devanados capacitiva correlación entre conexión H1-X1 Y H2-X2:**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	3,51	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	3,60	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	1,62		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal

**Tabla 23. Prueba inter-devanados inductiva correlación entre conexión H1-X1 Y H2-X2:**

RANGO DE FRECUENCIAS	VALOR	DISTORSIÓN OBVIA	SOSPECHA DE DISTORSIÓN	NORMAL
1 kHz – 100 kHz	2,19	1	$1 \leq \text{VALOR} < 2$	$2 \leq \text{VALOR}$
100 kHz – 600 kHz	1,02	0,6	$0,6 \leq \text{VALOR} < 1$	$1 \leq \text{VALOR}$
600 kHz – 1MHz	1,00		$0 \leq \text{VALOR}$	$0,6 \leq \text{VALOR}$

**Conclusión:** Estado de devanados normal

Se observa en los resultados obtenidos de la comparación entre fases para la prueba SFRA que en cada tipo de conexión de las pruebas de circuito abierto, corto circuito, capacitancia inter-devanados e inductancia capacitiva, el valor de la correlación se encuentra en los rangos permitidos, lo que indica condiciones normales de los devanados del transformador.

Los resultados obtenidos en las pruebas son aceptables según las normas y estándares IEEE por lo que se considera que el transformador se puede energizar.

- No hay indicación de cambios mecánicos ni cambios eléctricos en el transformador
- No hay referencia de mediciones de SFRA por lo que estos resultados se pueden tomar como huella o línea base del transformador para ensayos de diagnóstico futuros.

## 8. OBSERVACIONES

- El análisis de las pruebas en este proyecto de grado se limitó a transformadores de potencia bidevanados con grupo de conexión Dy1, por lo que queda abierta la opción de ampliar el estudio para los otros grupos de conexión.
- Es muy importante que al realizar pruebas SFRA cualquier parámetro que pueda afectar los resultados de la prueba se registre de manera clara, concisa, en los formatos, de tal manera que las mediciones SFRA puedan ser reconstruidas y permitan comparaciones con futuras mediciones.
- Para realizar una prueba con buenos resultados, es importante que las mediciones se realicen siguiendo la metodología, en forma organizada y consistente.
- Para la comparación entre gráficas se pueden tomar puntos de referencia, se pueden comparar los resultados con una unidad hermana o entre fases.
- Cuando se vaya a hacer comparaciones entre unidades gemelas se debe tener en cuenta el tipo de fabricante, año de fabricación y lote, porque aún cuando un transformador parezca idéntico a otro en todos los aspectos, es posible que las dos unidades se hayan construido con algunas diferencias.
- Entre más unidades hermanas sean comparadas, se puede determinar una huella que sea estable y acertada.

- Para la comparación entre fases se debe tener en cuenta que algunos diseños de transformadores no son completamente simétricos. Debido a esto, es fundamental que los datos de referencia sean obtenidos tan temprano en la vida de un transformador como sea posible.

## 9. CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados de cuarenta pruebas SFRA realizadas<sup>10</sup> a distintos transformadores de potencia se puede concluir que al clasificar los resultados de la prueba SFRA por tipo de prueba, se observa que las curvas siguen una tendencia, tienen la misma forma pero hay un desplazamiento con respecto al eje x o y, o sea se aumenta o disminuye en magnitud o en frecuencia. Esta tendencia está ligada a la forma interna del transformador, es decir, cómo se realizó la fabricación del mismo: material, aislamiento, forma de bobinado, entre otras. Se analizaron transformadores de la misma potencia y diferente tensión, o transformadores que tuvieran la misma tensión y diferente potencia para cada tipo de prueba. Algunas conclusiones con relación al tipo de pruebas realizadas son:

- En la prueba de circuito abierto, se muestra el valor de la admitancia de circuito abierto del transformador, ya sea del lado de alta o baja tensión. Si un transformador tiene mayor admitancia que otro, se observa que la curva tiene mayor magnitud en la región cercana a la frecuencia fundamental 60 Hz y está desplazada hacia la derecha en el dominio de la frecuencia.
- En la prueba de corto circuito, alrededor de la frecuencia fundamental se puede observar el valor de la admitancia de corto circuito; analizando las curvas obtenidas, se observa que para las tres fases de un mismo transformador las gráficas son casi idénticas debido a la simetría del transformador. Al comparar con otros transformadores, el transformador con mayor admitancia de corto circuito evidencia mayor magnitud alrededor de los 60 Hz y la curva estará

---

<sup>10</sup> Algunas realizadas por los autores y otras suministradas por la empresa Copower Ltda, dueña del equipo de medición FRAX 101.

desplazada a la derecha con respecto a otro transformador con menor admitancia de corto circuito.

- En la prueba de inductancia inter-devanados o de tensión de transferencia, alrededor de la frecuencia fundamental (60 Hz) se observa un valor aproximado de la relación de transformación. Al comparar los resultados obtenidos para pruebas hechas a diferentes transformadores se observa que entre mayor sea el valor de relación de transformación la curva se desplaza hacia abajo, es decir, disminuye su valor en magnitud obedeciendo a la ecuación (7) de este documento.
- Los resultados de la prueba de capacitancia inter-devanados tienen la misma tendencia, son la mayor parte de la curva linealmente creciente, con unos picos de resonancia que se desplazan hacia la derecha o izquierda según las características del transformador.

Al clasificar los resultados de la prueba SFRA por tipo de fabricante, se observa que las curvas siguen la tendencia para cada tipo de conexión, pero con algunas pequeñas variaciones que se relacionan con los parámetros propios de construcción y diseño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Lech, W.; Tyminski, L.; "Detecting Transformer Winding Damage by the Low Impulse Method". *Electrical Review, No. 21, Vol 179, November 1966* .

[2]. Rogers, E.J.; Humbard, L.E.; Gilies, D.A. "Instrumentation Techniques for Low Voltage Impulse Testing of Power Transformers". *IEEE Transactions on Power Apparatus and System. Jan-Jun 1972* .

[3]. Dick, E.P.; Erven, C.C.;" Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol Pas-97 No 6 Nov/Dec 1978, pp 2144-2153* .

[4]. Malewski, R.; Poulin, B.; "Impulse Testing of Power Transformers Using the Transfer Function Method". *IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 3 No. 2 April 1988. Pp 476-489* .

[5]. Malewski, R.; Douville, J.; Lavallée, L.;" Measurement of Switching Transients in 735 kV Substations and Assessment of their Severity for Transformer Insulation". *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3 No. 4, October 1988, pp 138-1390* .

[6]. Vaessen, P.T.; Hanique, E.; "A New Frequency Response Analysis Method for Power Transformer". *IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 7 No. 1, January 1992. pp 384-391* .

[7]. Laporth, Jhon.; Noonan, Timothy J. "Mechanical Condition Assessment of Power Transformers Using Frequency Response Analysis".

- [8]. Wang, M.; Vandermaar, A.; Sribastava KD. " Condition Monitorin of Transformers in Service by the Low Voltage Impulse Test Method" . *High Voltage Engienering Symposium 22-27 August 1999, Paper No 467. IEEE 1999.*
- [9]. Vandermaar, A.; Wang, M.; Stefansky, C.; Ward, B."Frecuency Response Analysis Using the Impulse Test Method as a Transformer Diagnostic Technique". *1999 Doble conference.*
- [10]. Wang, M.; Vandermaar, A.; Srivastava, KD. "Condition Monitoring by the Low Voltage Impulse Test Method". *CIGRE 3<sup>a</sup> Southern Africa Regional Conference Session 1, May 20-21, 1998, Johannesburg.*
- [11]. Freser, T.; Leibfried, K. " Monitoring Power Transformers Using Transfer Function Method". *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14 No. 4, October 1999. pp 1333-1341 .*
- [12]. Zhijian, Jin; Jingtao, Li;Zishu, Zhu; " Diangnosis of Transfer Winding Deformation on Basis of Artificial Neural Network". *Proceeding of the 6<sup>a</sup> International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, June 21-26 2000, pp 173-176 Vol. 1.*
- [13]. Doble Enineering, "Sweep Frecuency Response Analyzer model M5100", 2001, Watertown. MA.
- [14]. B&C Company, "Frecuency Response Analyzer", model Traftek, 2002, Budapest, Hungary.
- [15]. CIGRE Working Group 12.19. " The short Circuit Performance of Power Transformers", Brochure CIGRE WG 12.19. August 2002.

## BIBLIOGRAFÍA

A. Kraetge<sup>1</sup>, M. Krüger<sup>1</sup>, P. Fong. Frequency Response Analysis – Status of the worldwide standardization activities, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.

Amit Kumar, Mehta R.N.Sharma, Sushil Chauhan, S.D.Agnihotri. Study and Diagnosis the Failure of Power Transformers by Sweep Frequency Response Analysis. 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC).

Aponte G., Bedoya O., Cerón A., Gallego J. Desarrollo De Una Herramienta Computacional Para El Análisis Cuantitativo De Las Variaciones De Las Ondas Obtenidas En La Prueba De Respuesta En Frecuencia. Congreso Altae 2011.

Aponte G., Herrera W., Cadavid. H., Burgos J. C., Garcia A. External Factors that Can Affect the Transformer Sweep Frequency Response. 3-6 October 2010. Santiago de Compostela – Spain.

Frequency Response Analysis (SFRA) for Power Transformer Diagnosis

IEEE Std C57.149™-2012. IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.

Ing. Sergio Alejandro Chedid, Artec Ingeniería Mercosur. Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia. 5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay

J. Secue, E. Mombello, *Senior Member, IEEE* y C. V. Cardoso. Revisión del Análisis de Respuesta en Frecuencia (SFRA) para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia.

J. Secue, *Student member, IEEE*, E. Mombello, *Senior Member, IEEE*, E. Muela. Approach for Determining a Reliable set of Spot Frequencies to be used during a Sweep

Msc. Rodrigo Ocón, I. Á. Desarrollo histórico y estado del arte del análisis de respuesta en frecuencia en transformadores de potencia.

Néstor Maya Izurieta, Xavier; Vásquez Restrepo, Luis Alberto. 2011. "Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por barrido de frecuencia". Ingenius No. 5. Enero/Junio. Pp. 55-62.

S. Ab Ghani, *Member, IEEE*, Y.H. Md Thayoob, *Member, IEEE*, Y.Z. Yang Ghazali, *TNB Distribution*, M.S. Ahmad Khair, *Member, IEEE* and I. Sutan Chairul, *Member, IEEE*. Evaluation of Transformer Core and Winding Conditions from SFRA Measurement Results using Statistical Techniques for Distribution Transformers. IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012), Melaka, Malaysia: 6-7 June 2012.

# **ANEXOS**

**ANEXO A. FORMATO PARA DILIGENCIAR LOS DATOS DEL TRANSFORMADOR**

<b>REGISTRO DE PRUEBAS SFRA A TRANSFORMADORES DE POTENCIA</b>			
CIUDAD:	<input type="text"/>	REALIZADO POR:	<input type="text"/>
FECHA :	<input type="text"/>	EMPRESA QUE REALIZA LA PRUEBA:	<input type="text"/>
HORA:	<input type="text"/>		
UBICACIÓN:	<input type="text"/>	REALIZADO A:	<input type="text"/>
<b>DATOS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA:</b>			
FABRICANTE:	<input type="text"/>	AÑO:	<input type="text"/>
NUMERO DE SERIE:	<input type="text"/>	IDENTIFICACIÓN:	<input type="text"/>
POTENCIA MVA	<input type="text"/>	TIPO REFRIGERACIÓN:	DE <input type="text"/>
POTENCIA ASOCIADA A TIPO DE REFRIGERACIÓN:	<input type="text"/>	TIPO TRANSFORMADOR:	DE <input type="text"/>
NUMERO DE FASES:	<input type="text"/>	TIPO DE CONEXIÓN:	<input type="text"/>
VOLTAJE NOMINAL AT, [V]	<input type="text"/>	VOLTAJE NOMINAL BT, [V]	<input type="text"/>
CORRIENTE NOMINAL AT, [A]	<input type="text"/>	CORRIENTE NOMINAL BT, [A]	<input type="text"/>

IMPEDANCIA CC, % KVA  CORRIENTE DE CC, [A]

TIPO DE DEVANADO:  MATERIAL DE   
DEVANADO:

NUMERO DE  NÚMERO POSICIONES   
POSICIONES LTC:  DETC:

POSICIÓN LTC ACTUAL:  POSICIÓN ACTUAL:   
DETC

TENSIÓN ASOCIADA A  
POSICION ACTUAL:

OBSERVACIONES:

**ANEXO B. FORMATO PARA DILIGENCIAR DATOS DEL EQUIPO DE  
MEDICIÓN**

<b>DATOS DEL EQUIPO DE PRUEBA</b>	
<b>NOMBRE</b>	
<b>MODELO</b>	
<b>FABRICANTE</b>	
<b>SERIAL</b>	
<b>IMPEDANCIA</b>	
NOTA:	

**ANEXO C. FORMATO PARA DILIGENCIAR DATOS DE LA COMPAÑÍA**

<b>DATOS DE LA COMPAÑÍA QUE EJECUTA LA PRUEBA</b>	
<b>NOMBRE</b>	
<b>UBICACIÓN</b>	
<b>OPERADOR</b>	
NOTA:	

**ANEXO D. FORMATO PARA DILIGENCIAR CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA**

<b>CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA</b>	
<b>INMERSO EN ACEITE O SECO</b>	
<b>T° DEL ACEITE (°C)</b>	
<b>NIVEL DEL ACEITE</b>	
<b>T° AMBIENTE (°C)</b>	
<b>HUMEDAD RELATIVA (%)</b>	
NOTA:	

## ANEXO E. FORMATO PARA DILIGENCIAR CATEGORIA DE LA PRUEBA

CATEGORIAS PARA LA APLICACIÓN DE LA PRUEBA	
1. MEDICIÓN DE LA LÍNEA DE BASE:	<input type="checkbox"/>
Para proporcionar un estándar de comparación para futuras mediciones de diagnostico.	<input type="checkbox"/>
Para diagnósticos después de transporte se realiza antes de reubicación y puesta en marcha.	<input type="checkbox"/>
Cuando es requerido por especificación del cliente.	<input type="checkbox"/>
Antes de la prueba de cortocircuito.	<input type="checkbox"/>
Como garantía de calidad.	<input type="checkbox"/>
2 COMO PRUEBA DE DIAGNOSTICO:	<input type="checkbox"/>
Verificación de que no se causaron daños durante una prueba de corto circuito.	<input type="checkbox"/>
Reubicación y puesta en marcha.	<input type="checkbox"/>
Verificación después de falla: relámpago, falla externa, corto circuito interno, evento sísmico.	<input type="checkbox"/>
Diagnóstico de rutina.	<input type="checkbox"/>
Evaluación de la condición de transformadores antiguos.	<input type="checkbox"/>
Evaluación de los transformadores usados o de respaldo.	<input type="checkbox"/>
Envío y recepción.	<input type="checkbox"/>

**ANEXO F. FORMATO PARA DILIGENCIAR EL TIPO DE MÉTODO A UTILIZAR**

MÉTODO A UTILIZAR

1 BASADO EN EL TIEMPO

2 BASADO EN EL TIPO

3 POR COMPARACIÓN ENTRE FASES

## ANEXO G. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

<b>Especificaciones del equipo de prueba FRAX 101 de Megger</b>	
<b>General</b>	
Método FRA:	Frecuencia de barrido (SFRA)
Rango de frecuencia:	0.1 Hz - 25 MHz, seleccionable por el usuario
Número de puntos:	Por defecto 1046, seleccionable por el usuario hasta 32.000
Tiempo de medición:	Por defecto 64 s, ajuste rápido, 37 s (20 Hz - 2 MHz)
Espaciamiento de puntos:	Log., lineal o ambos
Rango dinámico Rango/Piso de ruido:	> 130dB
Precisión:	±0.3 dB hacia abajo -105 db (10 Hz - 10 MHz)
Ancho banda IF/Tiempo Integración:	Seleccionable por el usuario (10% por defecto)
Software:	FRAX para Windows 2000/XP/Vista
Comunicaciones a PC:	Bluetooth y USB (aislada galvánicamente)
Intervalo de calibración:	Máximo 3 años
Normas /Guías:	Cumple con los requerimientos en Cigré Brochure 342, 2008 Evaluación de condición mecánica de arrollamientos de transformador usando FRA y norma China DL/T 911-2004, FRA sobre deformación de arrollamiento de transformador de Potencia, así como otras normas y recomendaciones internacionales.
<b>Salida analógica</b>	
Canales:	1
Tensión de salida:	0.2 - 20 V pico-a-pico
Medición de tensión a 50 Ω:	0.1 - 10 V pico-a-pico
Impedancia de salida:	50 Ω
Protección:	Protegido contra cortocircuito
<b>Entrada analógica</b>	
Canales:	2
Muestreo:	Simultáneamente
Impedancia de entrada:	50 Ω
Tasa de muestreo:	100 MS/s

Fuente: Frax User`s Manual

**ANEXO H. CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN EQUIPO DE MEDICIÓN**



KEMA CERT NR. 110006.01



**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

**CERTIFICATE #  
70799**

Date: 17-Jun-14	Date Commissioned: _____
Order # 195213	Calibrated By: Saga Itole
Catalog # AC-19091-US	Instrument: FRAX 101
Serial # 1100501	Customer: COPOWER
Test spec.:	Division:
Cust PO: C-191/12	Customer Address:

We hereby certify that all the materials, equipment, and supplies covered by the above order number(s) have been calibrated, inspected and found to be within tolerances as to workmanship and published specifications.

Tests were performed with standards that have been certified by, or are directly traceable to, the National Institute of Standards and Technology.

One or more of the below listed NIST Test Report Nos. apply to standards used for calibration.

REPORT #	CAL - DUE	PARAMETER
287551-02	Request	LVDC
EPM-2010-0004-01	15-Oct-14	C&DF HVAC
EPM-2010-0004-04	17-Oct-14	C&DF
EPM-2010-0004-03	29-Jul-14	C&DF
817279397-10	5-Jun-15	HVDC
697279397-10	14-May-15	0.1Mohm/1Mohm
697279397-10	16-May-15	10Tohm
811/253062-94	16-Sep-19	10 TTR
817274748-07	2-Apr-15	30 TTR
811/255290-95	Request	AC to 5000 A

Quality Manual: QAM rev16 2010

Calibration System: Megger QAP-3 ISO-17025  
ANSI / NCSL Z540-1-1994

Test Conditions:  
Temp. 23 deg C  
R.H. 34 %

Standards used:  
EMM Agilent 34401A ID 005  
CAP-300, CAPACITOR BOX ID 823  
RES-101, RESISTANCE BOX ID 028

**Quality Assurance**

Megger Valley Forge Corporate Center  
2621 Van Buren Avenue Norristown PA 19403-2329 USA

T 1-888-256-0962

F 610-676-8625

www.megger.com

Registered to ISO 9001:2008 Register no. 18806.01

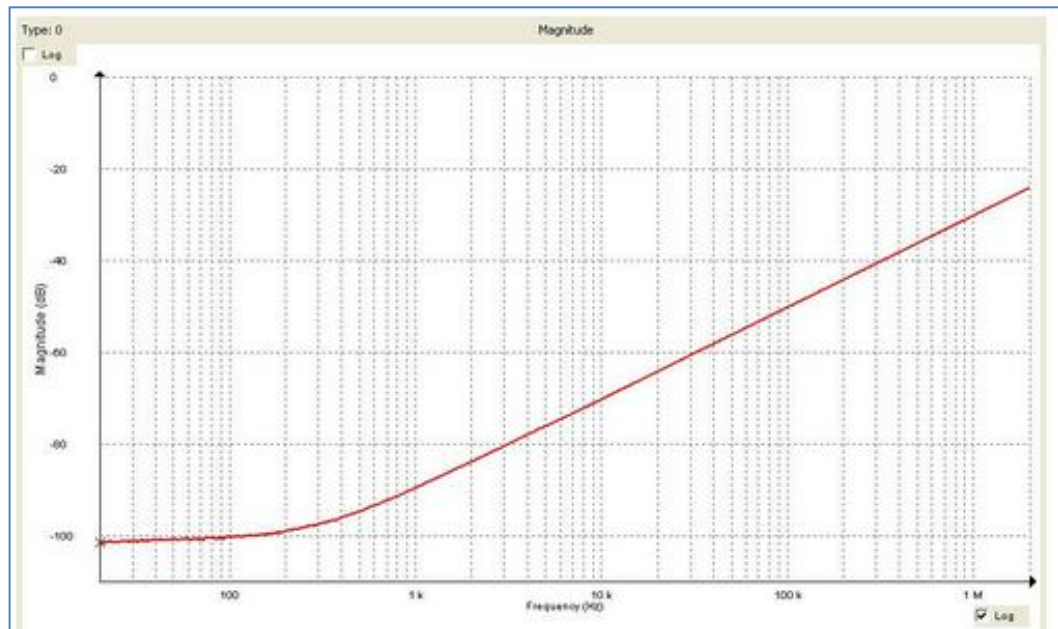
This Certificate cannot be reproduced without written consent.  
The Measure of Excellence in Electrical Testing...

Customer Service: Phone: (610) 676-8500

Fax: (610) 676-8582

See Page 2 of 'x' for data

## ANEXO I. GRAFICA DE AUTO-EVALUACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN SUMINISTRADA POR EL FABRICANTE



Fuente: Frax User's Manual

## ANEXO J. CÁLCULO DE CORRELACIÓN DEL SOFTWARE DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

The DL/T 911-2004 Analyzer computes the relative factor Rxy function for the three different frequency ranges (1kHz-100kHz, 100kHz-600kHz and 600kHz-1MHz) according to equations in A1, A2, A3 and A4. The value for each frequency range is assigned a "Winding Deformation degree" and finally the Conclusion is set as the worst "Winding Deformation degree". Note that RHF<0.6 is not assigned to any "Winding deformation degree".

**A.1 Calculate the standard variance of these two sequences**

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} \left[ X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} X(k) \right]^2 \quad D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} \left[ Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} Y(k) \right]^2$$

**A.2 Calculate the covariance of these two sequences**

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} \left[ X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} X(k) \right] \times \left[ Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} Y(k) \right]$$

**A.3 Calculate the normalization covariance factor of these two sequences**

$$LR_{xy} = C_{xy} / \sqrt{D_x D_y}$$

**A.4 Calculate the relative factor Rxy meeting the project requirements as per the following formula:**

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 & 1 - LR_{xy} < 10^{-10} \\ -1g(1 - LR_{xy}) & \text{others} \end{cases}$$

**A.5 Judge the degree of deformation of transformer winding as per Table A.1**

**Table A.1 Relation between relative factors and degree of transformer winding deformation (only for reference)**

Winding Deformation degree	Relative Factors R
Severe Deformation	$R_{LF} < 0.6$
Obvious Deformation	$1.0 > R_{LF} \geq 0.6$ or $R_{MF} < 0.6$
Slight Deformation	$2.0 > R_{LF} \geq 1.0$ or $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
Normal Winding	$R_{LF} \geq 2.0$ , $R_{MF} \geq 1.0$ and $R_{HF} \geq 0.6$

$R_{LF}$  represents the relative factor when the curve is in low frequency band (1kHz-100kHz);  
 $R_{MF}$  represents the relative factor when the curve is in medium frequency band (100kHz-600kHz);  
 $R_{HF}$  represents the relative factor when the curve is in high frequency band (600kHz-1000kHz).

Fuente: Frax User`s Manual