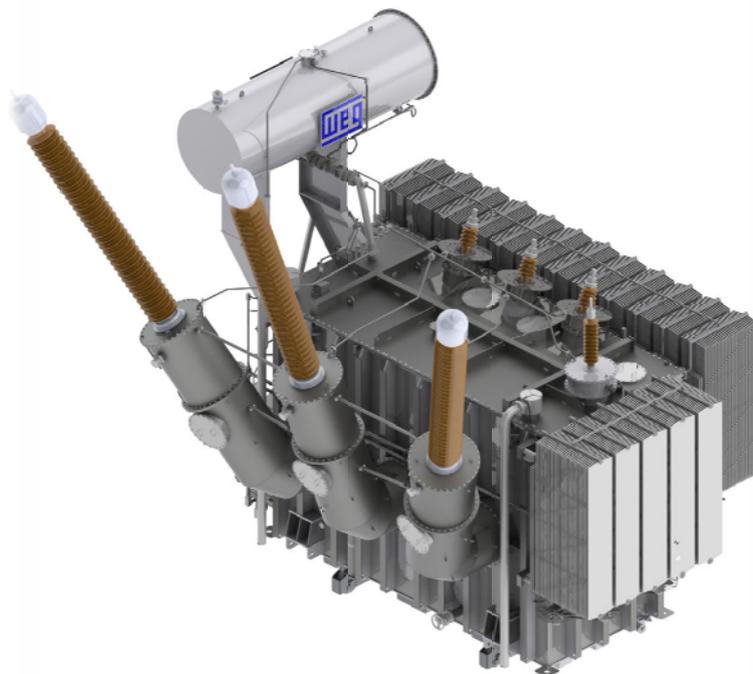


Trabajo Final de Carrera

Simulación de Fallas Mecánicas y Análisis de Respuesta en Frecuencia sobre Modelo Físico de Transformador



Autor:

Hernán Mayora

Director:

Mg. Ing. Raúl Emilio Álvarez

Codirector:

Ing. Emilio Calo



FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

AÑO 2017

Agradecimientos

En esta sección, que considero la más importante del trabajo, quisiera agradecer a todas esas personas que hicieron su aporte para que llegar a esta instancia sea posible.

En primer lugar a mis padres, Juan y Grisel, y mi hermano Santiago, por su apoyo incondicional y sus enseñanzas a lo largo de todo este camino, sin ellos nada hubiera sido posible.

A mis amigos, por acompañarme siempre y vivir momentos inolvidables durante las horas de cursada y momentos de esparcimiento.

A Micaela por apoyarme día a día y bancarme en los momentos más complicados de la carrera.

A todo el personal que trabaja en el IITREE-LAT, que compartieron conmigo y me brindaron herramientas para desarrollarme durante mi estadía como pasante, especialmente a Pablo Morcelle, Leonardo Catalano y Emilio Calo.

A todo el plantel docente de Medidas Eléctricas con quienes me desempeñe como ayudante y tuve la suerte de experimentar la satisfacción de transmitir mis conocimientos.

A Ruben Massi, y toda la gente de ARTRANS que se encargaron de diseñar y construir el transformador que permitió desarrollar este trabajo.

Finalmente, a Raúl Álvarez, quien impulsó este trabajo y confió en mis capacidades desde el principio. Su motivación y amplia experiencia en el tema fueron un aporte fundamental para alcanzar este objetivo.

A todos ellos, les dedico este trabajo y les doy mis más sinceros agradecimientos.

Acrónimos

FRA	-	Frequency Response Analysis (Análisis de Respuesta en Frecuencia).
IFRA	-	Impulse Frequency Response Analysis.
SFRA	-	Sweep Frequency Response Analysis.
FRSL	-	Frequency Response of Stray Losses.
LVI	-	Low Voltage Impulse Testing.
YCA	-	Admitancia de circuito abierto.
YCC	-	Admitancia de cortocircuito.
IC	-	Interdevanado capacitivo.
II	-	Interdevanado inductivo.
CIGRÉ	-	Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.
IEEE	-	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IEC	-	International Electrotechnical Commission.
IRAM	-	Instituto Argentino de normalización y certificación.
AT	-	Alta Tensión.
BT	-	Baja Tensión.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	6
1.1 Resumen.....	8
1.2 Motivación.....	9
1.3 Objetivos y alcance.....	9
1.4 Contenido del trabajo	9
Capítulo 2: Fundamentos del FRA.....	12
2.1 Introducción	14
2.1.1 Breve reseña histórica	15
2.1.2 Características generales	16
2.1.3 Modelo RLC de altas frecuencias del transformador	16
2.1.4 Ámbito de la medida.....	19
2.2 Comparación de metodologías	22
2.2.1 IFRA	22
2.2.2 SFRA	23
2.2.3 Comparación entre ambas alternativas.....	24
2.3 Características del SFRA	24
2.3.1 Preparación del ensayo.....	24
2.3.2 Instrumento	25
2.3.3 Conexiones.....	26
2.3.4 Parámetros a especificar junto con el ensayo	27
2.4 Configuraciones.....	28
2.4.1 Admitancia de circuito abierto (YCA).....	28
2.4.2 Admitancia de cortocircuito (YCC).....	29
2.4.3 Interdevanado capacitivo (IC).....	32
2.4.4 Interdevanado inductivo (II)	33
Capítulo 3: Relación del SFRA con otros ensayos	36
3.1 Comparación entre el SFRA y ensayos básicos	38
3.1.1 Admitancia de circuito abierto – Corriente de excitación.....	39
3.1.2 Admitancia de cortocircuito – Reactancia de dispersión	40
3.1.3 Interdevanado capacitivo – Capacidad y tangente de delta	42

3.1.4	Interdevanado inductivo – Relación de transformación	45
3.2	Prueba de FRSL a partir de las respuestas de SFRA	47
Capítulo 4:	Normalización de la prueba de SFRA	50
4.1	Normalización	52
4.2	IEC 60076-18-2012: Power Transformers - Measurement of Frequency Response.	53
4.3	IEEE C57.149-2012: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.....	53
4.4	DL/T 911-2004: Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers.....	54
4.5	Technical Brochure Nº 342: Mechanical-Condition Assessment of Transformer windings using frequency response analysis (FRA).....	56
Capítulo 5:	Modos de Falla	58
5.1	Modos de falla.....	60
5.1.1	Deformación radial de bobinados	61
5.1.2	Elongación axial de bobinados (“Telescoping”).....	62
5.1.3	Desplazamiento del bobinado sin deformación	63
5.1.4	Defectos en el núcleo.....	64
5.1.5	Resistencia de contactos.....	65
5.1.6	Cortocircuitos entre espiras.....	66
5.1.7	Devanados a circuito abierto	67
5.1.8	Devanados flojos a causa del transporte.....	67
5.1.9	Magnetización residual.....	68
5.1.10	Blindajes flotantes	68
Capítulo 6:	Ensayo del transformador modelo y análisis de resultados	70
6.1	Transformador modelo	72
6.2	Cortocircuito entre espiras.....	75
6.2.1	Simulación.....	75
6.2.2	Respuestas	76
6.2.3	Análisis según IEEE C57.149.....	82
6.3	Devanado abierto.....	83
6.3.1	Simulación.....	83
6.3.2	Respuestas	84

6.3.3	Análisis según IEEE C57.149.....	89
6.4	Cambio de la reluctancia del núcleo	90
6.4.1	Simulación.....	90
6.4.2	Respuestas	91
6.4.3	Análisis según IEEE C57.149.....	96
6.5	Múltiple puesta a tierra del núcleo.....	97
6.5.1	Simulación.....	97
6.5.2	Respuestas	98
6.5.3	Análisis según IEEE C57.149.....	103
6.6	Núcleo levantado de tierra.....	104
6.6.1	Simulación.....	104
6.6.2	Respuestas	105
6.6.3	Análisis según IEEE C57.149.....	111
6.7	Magnetización remanente	111
6.7.1	Simulación.....	111
6.7.2	Respuestas	113
6.7.3	Análisis según IEEE C57.149.....	118
6.8	Desplazamiento axial del bobinado	119
6.8.1	Simulación.....	119
6.8.2	Respuestas	120
6.8.3	Análisis según IEEE C57.149.....	126
6.9	Dificultades encontradas a la hora de realizar los ensayos	127
6.9.1	Magnetización residual a causa del instrumento de ensayo.....	127
6.9.2	Efecto de las condiciones ambientales en los aislamientos interdevanado	127
Capítulo 7: Conclusiones.....		130
7.1	Conclusiones generales.....	132
7.2	Conclusiones personales	133
7.3	Futuras líneas de trabajo.....	134
Referencias.....		136

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo se presenta la problemática y la motivación del trabajo. Posteriormente se precisan los objetivos planteados y el alcance, y finalmente se indica el contenido del trabajo realizando una breve reseña de cada sección.

1.1 Resumen

Los sistemas eléctricos actuales se basan en sistemas de generación centralizados, esto significa que la electricidad se genera en grandes centrales eléctricas, usualmente alejadas de los centros de consumo y es trasladada a las cargas a través de las redes de transmisión. Para que la transmisión de la electricidad sea eficiente, es necesario que las corrientes que circulan en las líneas sean lo más pequeñas posible. Esto se logra elevando la tensión por medio de transformadores de potencia. Desde la generación hasta la carga a abastecer, se pueden encontrar un promedio de 4 transformadores, dependiendo de cada red en particular.

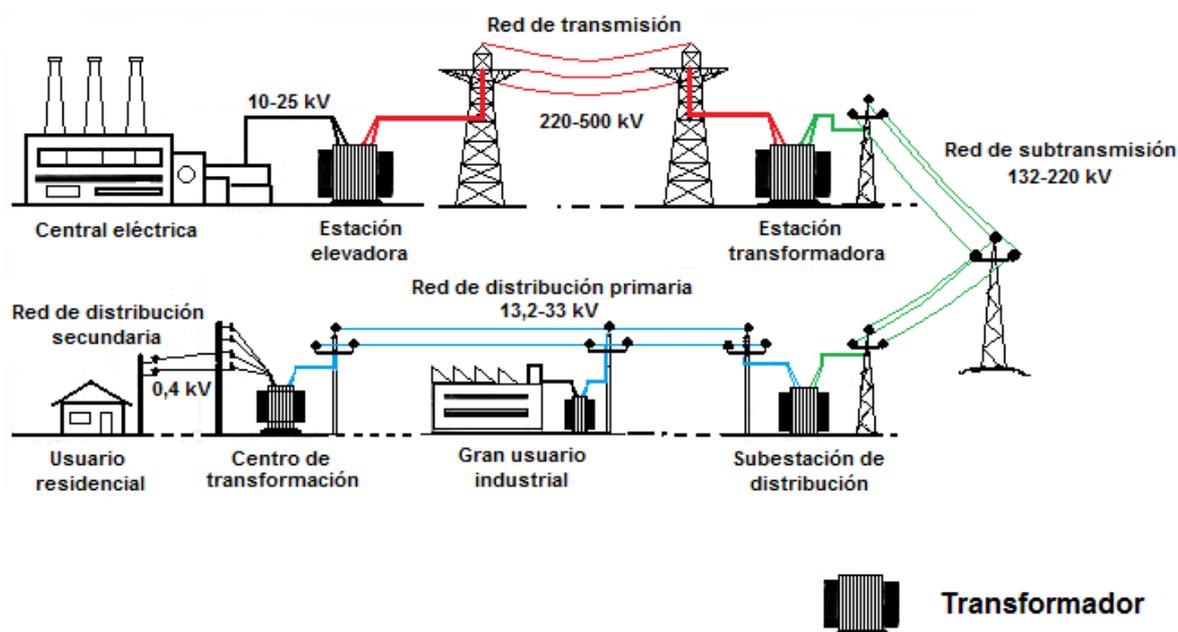


Figura 1: "Esquema de un sistema eléctrico".

En la Figura 1 se ve claramente la importancia que tiene el transformador en el sistema. Las salidas de servicio o fallas intempestivas del mismo implican asumir elevados costos asociados a la indisponibilidad, sanciones y costos de reparación y reposición. Las diversas técnicas de mantenimiento, seguimiento y diagnóstico son fundamentales para prevenir fallos, y de esta manera prolongar la vida útil de la máquina. En tal sentido IEEE ha desarrollado y publicado normativas específicas orientadas a la ejecución e interpretación de ensayos en campo. Adicionalmente, CIGRE ha materializado diversos informes técnicos referidos a la gestión de vida y mantenimiento de transformadores.

El Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) es un ensayo offline que permite detectar una gran cantidad de defectos mecánicos analizando variaciones en los parámetros eléctricos RLC (resistencia, inductancia y capacidad) del transformador. A través de este ensayo se obtiene abundante información respecto al estado de la máquina, pero en la actualidad no existe un criterio de interpretación preciso que sea universalmente aceptado.

En el presente trabajo se utilizó un modelo físico de transformador trifásico del tipo distribución, diseñado especialmente a los efectos de poder modificar sus condiciones mecánicas y simular las fallas más comunes que se presentan en máquinas reales. Se tomó una condición como el estado sano del transformador y se le realizó el ensayo de FRA para disponer de una referencia. Posteriormente, se comparó esta referencia con los distintos defectos mecánicos reproducidos y se obtuvieron parámetros de interpretación.

1.2 Motivación

La principal motivación del trabajo es aportar, desde un enfoque experimental, criterios de interpretación de resultados de la prueba de FRA.

En la actualidad hay un grupo de trabajo de CIGRÉ (“WG A2.53: Objective interpretation methodology for the mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis”) investigando y reuniendo información con el propósito de obtener criterios de interpretación objetivos y no meramente basados en la experiencia del ejecutor del ensayo.

1.3 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este estudio es obtener criterios de interpretación que sean de utilidad a la hora de analizar las respuestas obtenidas de un ensayo de FRA en campo.

El alcance del trabajo está enmarcado en los criterios de interpretación que pueden aplicarse al ensayo de FRA, realizado en transformadores de características similares al modelo estudiado, es decir, unidades trifásicas de mediano porte (distribución), de dos arrollamientos, y de aislamiento de origen celulósico, sin aceite ni cuba.

1.4 Contenido del trabajo

Capítulo 2: Fundamentos del FRA

Se realiza una introducción a la prueba de FRA como método para analizar la condición mecánica del transformador, se comparan dos variantes de ensayo existentes (SFRA e IFRA) y se presentan las características principales del SFRA en particular. Finalmente se abordan las cuatro configuraciones utilizadas en la prueba.

Capítulo 3: Relación del SFRA con otros ensayos

Se realiza una comparación entre las distintas configuraciones de la prueba de SFRA y otros ensayos ampliamente empleados en el mantenimiento de transformadores. Se analizan las equivalencias teóricas y circuitales de ambas alternativas.

Capítulo 4: Normalización de la prueba de SFRA

Se presentan las principales normas y documentos técnicos relacionados con el ensayo. Se comentan los aportes más significativos de cada uno.

Capítulo 5: Modos de falla

En este capítulo se introducen los principales modos de falla que afectan a los transformadores según la guía de interpretación de IEEE C57.149. (1) Se presentan en forma tabulada las pautas de interpretación para cada intervalo de frecuencias.

Capítulo 6: Ensayo del transformador modelo y análisis de resultados

Se presenta el transformador utilizado para reproducir los distintos modos de falla y se analizan las respuestas en frecuencia que presenta cada uno. Se realiza una comparación de las respuestas obtenidas con los criterios de interpretación de la norma IEEE C57.149 (1) detallados en el capítulo anterior.

Capítulo 7: Conclusiones

Se presentan las conclusiones generales del trabajo realizado y se comentan las conclusiones personales. Finalmente se exponen las futuras áreas de trabajo que pueden abordarse sobre la temática del FRA.

Capítulo 2

Fundamentos del FRA

Se realiza una introducción a la prueba de FRA como método para analizar la condición mecánica del transformador, se comparan las dos variantes de ensayo existentes (SFRA e IFRA) y se presentan las características principales del SFRA en particular. Finalmente se abordan las cuatro configuraciones utilizadas en la prueba.

2.1 Introducción

El FRA es un ensayo de mantenimiento que sirve para diagnosticar la condición mecánica de transformadores de potencia. El registro de estas condiciones es de vital importancia, puesto que las fallas eléctricas, provienen en muchos casos de defectos mecánicos. En la Figura 2 y la Figura 3 se presenta una estadística extraída del TB N° 642 de CIGRÉ. (2) Puede observarse que una gran proporción de fallas tiene origen mecánico. Incluso otras fuentes de falla, tales como las dieléctricas, también pueden ser ocasionadas por defectos mecánicos.

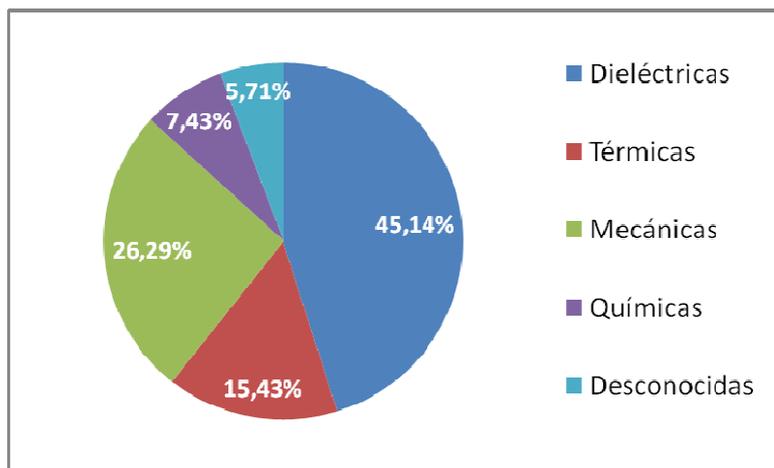


Figura 2: "Fallas en transformadores clasificadas de acuerdo a su origen".

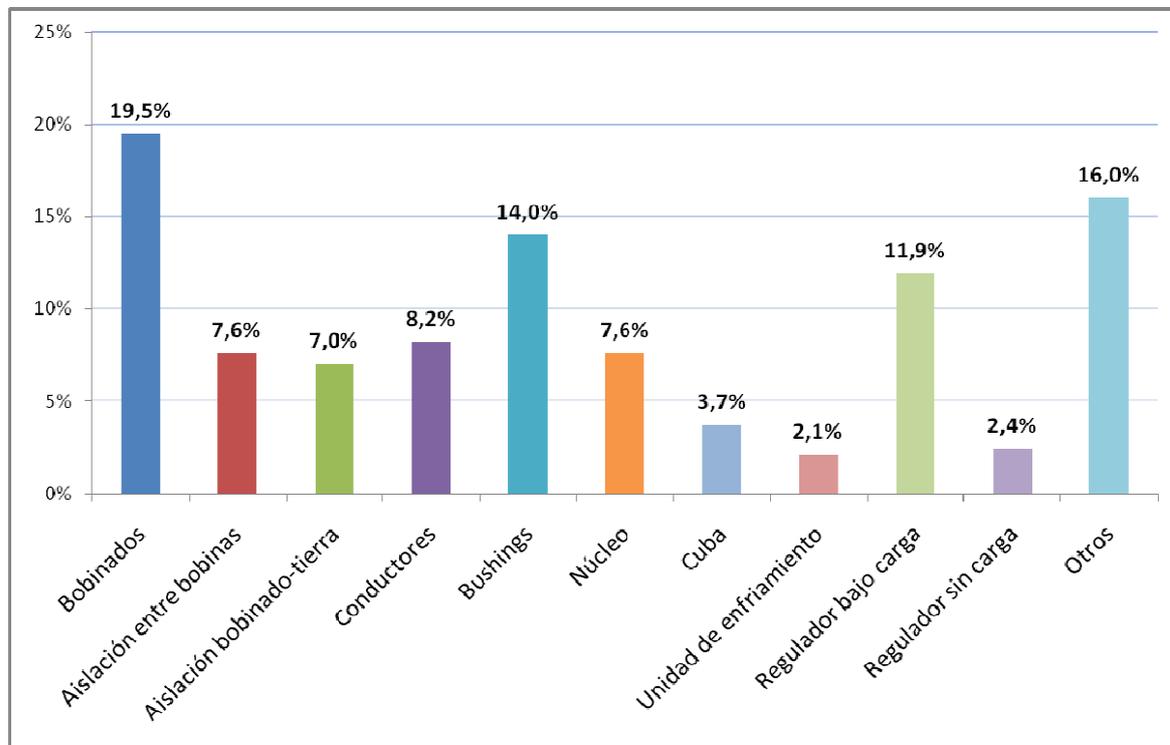


Figura 3: "Fallas en transformadores clasificadas de acuerdo al componente afectado".

La prueba de FRA consiste en medir la respuesta en frecuencia de los bobinados ante señales aplicadas. Conociendo las señales de excitación y registrando las respuestas, puede realizarse una gráfica de Bode para un amplio intervalo de frecuencias. Estas curvas luego deben ser contrastadas con curvas representativas del estado sano del transformador (obtenidas en análisis previos), con curvas obtenidas de distintas fases del mismo transformador o bien con curvas obtenidas de un transformador hermano (idéntico constructivamente). Cualquier diferencia entre las curvas comparadas representa una alteración en la máquina, producto de modificaciones mecánicas (bobinados), dieléctricas (aislamientos) o magnéticas (núcleo).

2.1.1 Breve reseña histórica

El primer uso de la técnica se dio en 1966, por parte de Lech y Tyminski en Polonia. Ellos propusieron el método de impulso de bajo voltaje (LVI) para detectar deformaciones en devanados de transformadores, y lo utilizaron durante pruebas de cortocircuito. Este puede considerarse el nacimiento de la prueba de FRA, con características similares a la variante conocida como IFRA (Impulse Frequency Response Analysis).

El siguiente avance importante ocurrió en 1972, donde Rogers, Humbard y Gilies describieron la instrumentación y técnicas de medición recomendadas para la aplicación de la técnica de impulso de bajo voltaje, incrementando de esta forma la repetitividad de las pruebas.

En 1978, Dick y Erven, propusieron el método de respuesta en frecuencia como una técnica de diagnóstico para transformadores. Todos los avances hasta dicha fecha se orientaban en la técnica de IFRA. (3)

Entre 1988 y 2004 se comienza a desarrollar la técnica de SFRA. Se realizaron pruebas en diferentes compañías europeas y la tecnología se dispersó a nivel mundial a través de CIGRÉ y muchos otros congresos y reuniones técnicas.

En 2004 se publicó el primer estándar de SFRA “Frequency Response Analysis on winding Deformation of Power Transformers”, DL/T 911-2004, The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China. (4)

Finalmente en 2008 se publica el Technical Brochure Nº 342 de CIGRÉ, “Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)”. (5) Este es hasta la actualidad el documento técnico más importante en lo que refiere a las técnicas de ensayo y ha servido como guía para normas posteriores tales como la IEC 60076-18, que da pautas sobre la correcta ejecución y documentación del ensayo. (6)

En los años más recientes, la tecnología del FRA ha ido ganando terreno dentro del ámbito de las empresas eléctricas y compañías de servicio, y se consolidó como un ensayo de rutina solicitado frecuentemente en las especificaciones técnicas para la compra de transformadores. (7)

2.1.2 Características generales

La técnica tiene su fundamento físico en considerar al transformador en su modelo de cuadripolo, es decir, viéndolo como una “caja negra” que posee dos terminales de entrada y dos de salida. Aplicando una excitación perfectamente conocida en la entrada y midiendo la respuesta que presenta la salida, pueden realizarse consideraciones acerca de la distribución de capacitancias, resistencias e inductancias en la máquina.

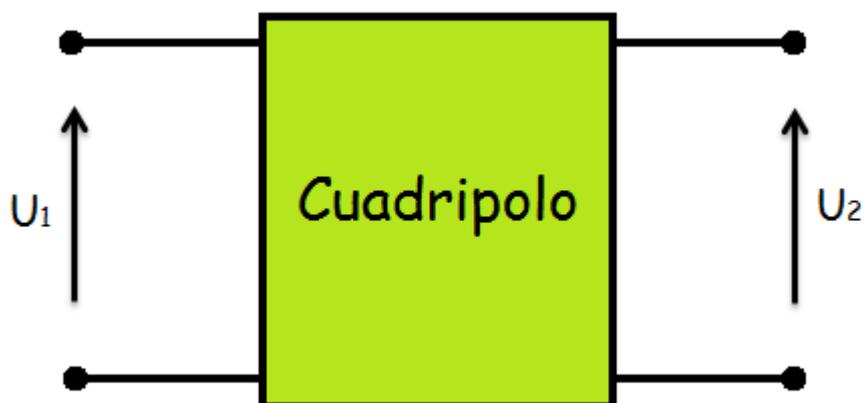


Figura 4: "Cuadripolo equivalente del transformador. U1: excitación, U2: señal respuesta".

La relación entre las tensiones de interés se plantea como la siguiente función de transferencia:

$$T(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} \quad \text{Ecuación 1}$$

El modo usual de presentar esta información es por medio de curvas de módulo en función de la frecuencia, complementadas con fase vs. frecuencia. De esta manera, a medida que se realiza el ensayo pueden visualizarse las irregularidades (en caso de que existan), de manera gráfica.

Con el objetivo de apreciar con más detalle el comportamiento de las curvas para valores bajos de la función de transferencia, es una práctica usual presentar los datos en decibeles [dB]. Además, como la gama de frecuencias es muy amplia, se acostumbra utilizar escala logarítmica en el eje de abscisas. (5)

2.1.3 Modelo RLC de altas frecuencias del transformador

El circuito equivalente de un transformador, utilizado para frecuencias industriales de 50 o 60 Hz, contempla factores tales como el flujo magnetizante, las pérdidas en el núcleo magnético, las reactancias de dispersión y las resistencias de los arrollamientos. Este modelo, presentado en la Figura 5 es suficiente a la hora de realizar estudios sobre el funcionamiento en régimen permanente del equipo en la red. (8)

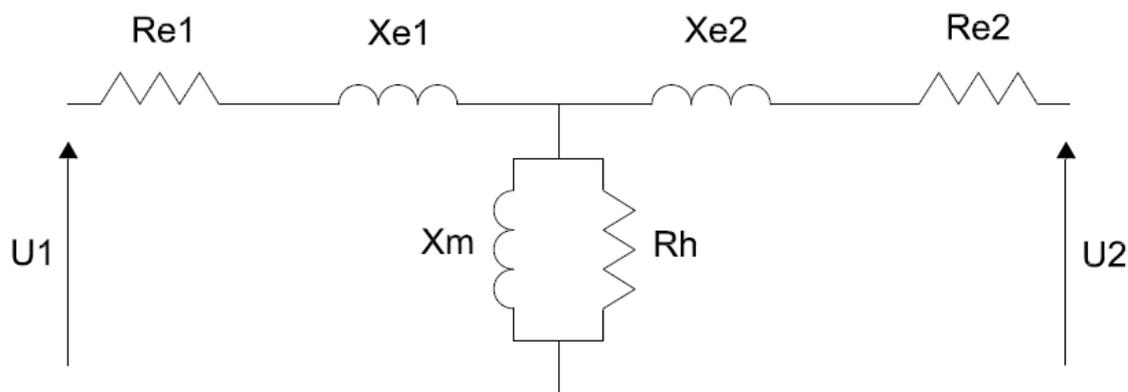


Figura 5: "Circuito equivalente monofásico del transformador en régimen permanente".

Sin embargo, en el diagnóstico mediante el FRA, intervienen frecuencias que varían entre unos pocos Hz hasta las decenas de MHz, dependiendo del instrumento utilizado. ¿Esto qué significa? Que el modelo anterior pierde validez por superarse el rango al cual está acotado. Es necesario entonces recurrir a modelos más detallados que consideran los parámetros distribuidos de la unidad. Estos modelos son frecuentemente utilizados en casos donde intervienen fenómenos de frecuencias superiores, tales como transitorios asociados a maniobras, descargas atmosféricas, etc.

El circuito presentado en la Figura 6 muestra los elementos que intervienen en el modelado de una fase genérica de un transformador trifásico. (9) Consta de dos devanados, el de alta tensión y el de baja tensión, divididos en varias secciones con sus correspondientes parámetros.

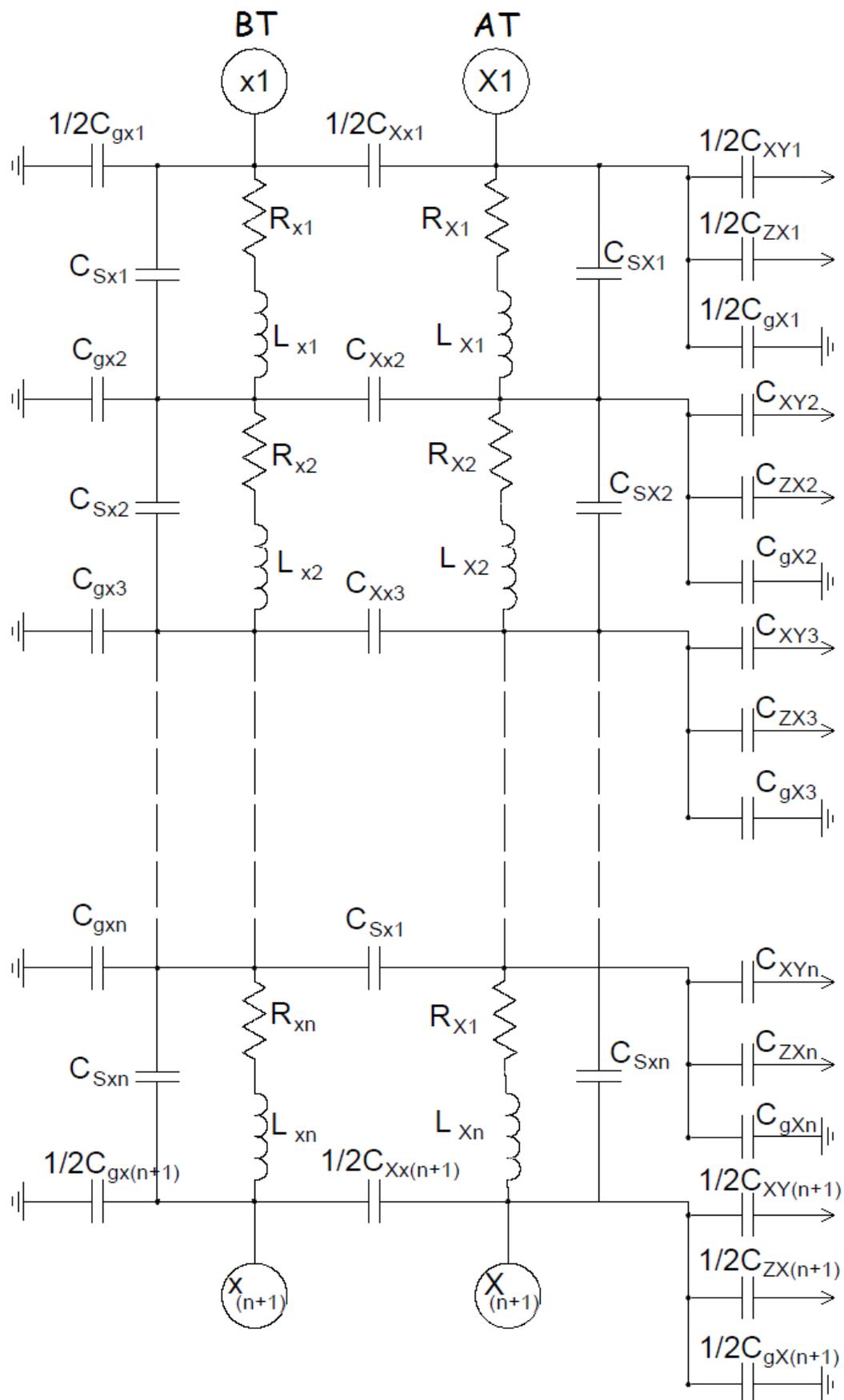


Figura 6: "Modelo RLC equivalente por fase del transformador".

Los significados de los parámetros son:

C_{gxi} : Capacidad entre el devanado de baja tensión y tierra.

C_{Sxi} : Capacidad entre las espiras del devanado de baja tensión.

R_{xi} : Resistencia de la sección del devanado de baja tensión.

L_{xi} : Inductancia de la sección del devanado de baja tensión.

C_{XXi} : Capacidad entre devanado de baja tensión y alta tensión.

C_{SXi} : Capacidad entre las espiras del devanado de alta tensión.

R_{Xi} : Resistencia de la sección del devanado de alta tensión.

L_{Xi} : Inductancia de la sección del devanado de alta tensión.

C_{XYi} : Capacidad entre devanados de alta tensión de la fase X y fase Y.

C_{ZXi} : Capacidad entre devanados de alta tensión de la fase X y fase Z.

C_{gXi} : Capacidad entre el devanado de alta tensión y tierra.

i : Cada una de las secciones utilizadas para realizar el modelo.

La topología obedece al formato constructivo habitual que corresponde al devanado de alta tensión montado concéntricamente sobre el de baja tensión.

Cada uno de estos elementos pasivos que representan al transformador pueden verse modificados por distintas razones. Las capacitancias son afectadas por las distancias entre conductores y por el estado del material dieléctrico. Las inductancias, por su parte, varían frente a cambios en la geometría de los devanados o por defectos del núcleo. Y las resistencias, que son los elementos más estables, pueden modificarse en casos extremos tales como cortocircuitos entre espiras, circuitos abiertos en los devanados o defectos en las conexiones (10).

2.1.4 Ámbito de la medida

El FRA es considerado como un ensayo eléctrico avanzado y de acuerdo al Technical Brochure Nº 445 de CIGRÉ (11), permite detectar una amplia gama de fallas, más que la mayoría de los ensayos eléctricos. En la Figura 7 se presenta una comparación de distintas pruebas, comunes en lo que se refiere a transformadores, y los defectos que cada una permite detectar.

		Tipo de Problema					
		Integridad del circuito magnético	Aislación del circuito magnético	Geometría de devanados	Continuidad de devanados/Bushings/OLTC	Aislación de devanados/Bushings	Aislación entre espiras
		Técnica de diagnóstico					
Eléctricos básicos	Relación de transformación	■					
	Resistencia de bobinados			■			
	Corriente de magnetización	■					■
	Capacidad y tangente de Delta		■		■	■	■
	Reactancia de dispersión				■		
	Resistencia de aislación		■			■	
	Ensayo de puesta a tierra del núcleo					■	
Eléctricos avanzados	FRSL			■	■		
	Análisis de Respuesta en frecuencia (FRA)	■			■	■	■
	Polarización/Despolarización		■				
	Espectroscopia en el dominio de la frecuencia		■				
	Ensayo de tensión de recuperación		■				
	Detección eléctrica de descargas parciales	■	■				
	Detección acústica de descargas parciales	■	■				
	Detección de descargas parciales	■	■				
Análisis de gases disueltos (DGA)	■	■	■		■	■	

Figura 7: "Problemas típicos detectables con ensayos eléctricos y DGA".

La gran variedad de fallas que permite detectar la técnica de FRA hace que sea empleada durante muchas de las etapas del ciclo de vida del transformador. En la Figura 8 se presentan en verde, las etapas donde se utiliza la prueba y a continuación se describe brevemente cada una. (12)

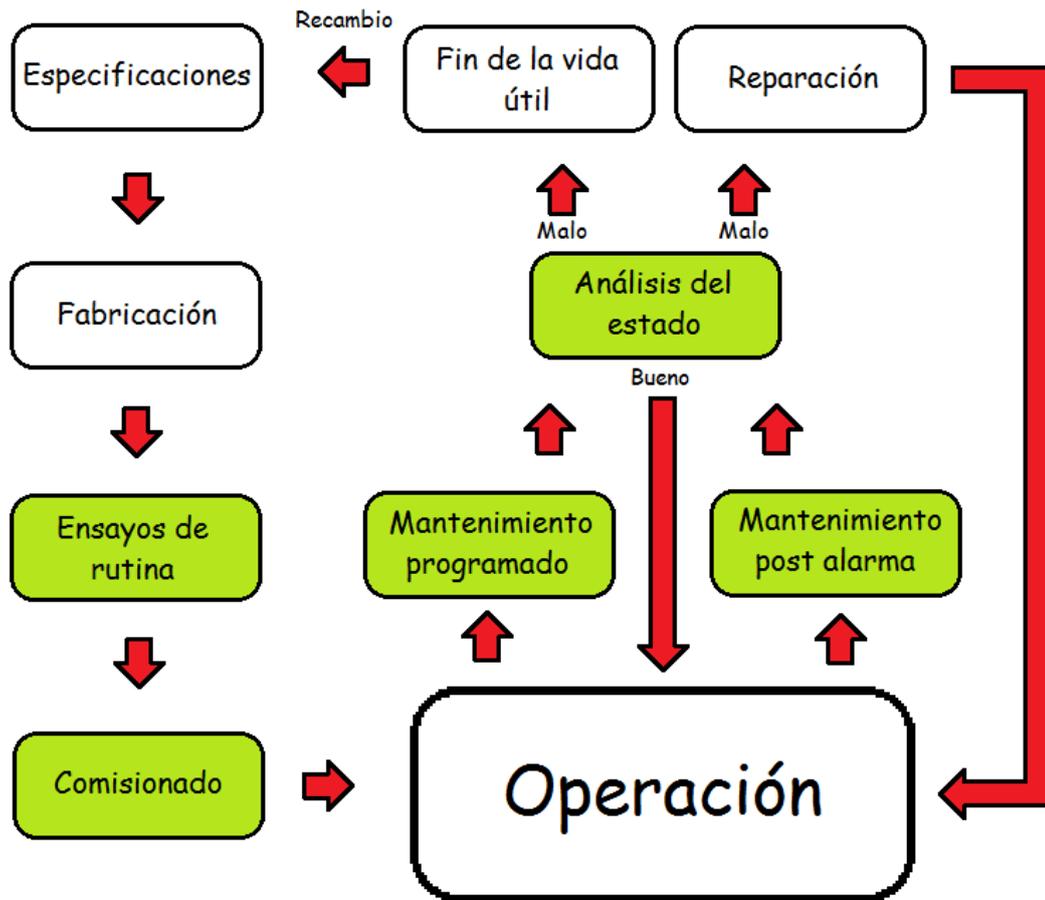


Figura 8: "Influencia de la prueba de FRA en el ciclo de vida del transformador".

- Ensayos de rutina: Los realiza el fabricante a cada una de las unidades producidas para verificar su estado antes de entregárselo al cliente. En estos casos el FRA puede realizarse mediante la comparación de las respuestas con transformadores hermanos o simplemente observando que las curvas presenten las respuestas típicas.
- Comisionado: En esta etapa el comprador realiza ensayos en el equipo para asegurarse que el mismo está en buen estado. Es importante realizar la prueba de FRA antes y después del transporte y emplazamiento del transformador, ya que es una de las tareas más críticas que pueden dañar su condición interna.
- Mantenimiento programado: Es aquel que se realiza cada cierto período de operación para verificar el estado de envejecimiento de la máquina. Se realiza la comparación mediante curvas de referencia de mantenimientos anteriores.
- Mantenimiento post alarma: Se realizan ensayos luego de que se dispare una alarma del transformador (relé diferencial, Bucholz, etc.) para descubrir el motivo y localizar la falla.
- Análisis del estado: Luego de fallas severas o cuando se ha llegado al tiempo de vida útil esperada del transformador se realizan ensayos y análisis técnico-económicos con el fin de determinar si la unidad puede volver a entrar en servicio, si necesita reparaciones o si debe reemplazarse por otra unidad más nueva.

2.2 Comparación de metodologías

Dado que la respuesta en frecuencia del transformador es independiente de la forma de la señal de entrada, el análisis de FRA puede ser llevado adelante mediante dos métodos diferentes. Estos son el IFRA (Impulse Frequency Response Analysis) y el SFRA (Sweep Frequency Response Analysis). (5) (13)

2.2.1 IFRA

El método IFRA se realiza aplicando una tensión impulsiva en un terminal del transformador y registrando la tensión resultante en otro. Esta forma de onda de tensión de excitación está compuesta por un amplio espectro de frecuencias. (14)

La fuente de tensión es un generador de impulsos de tipo doble exponencial que suministra una tensión reducida, del orden de los 10V.

Las señales medidas son filtradas y almacenadas en función del tiempo. Se transfieren luego al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier y, finalmente, se calcula la relación de amplitudes de las señales para cada una de las frecuencias y se obtiene la curva de FRA. (15)

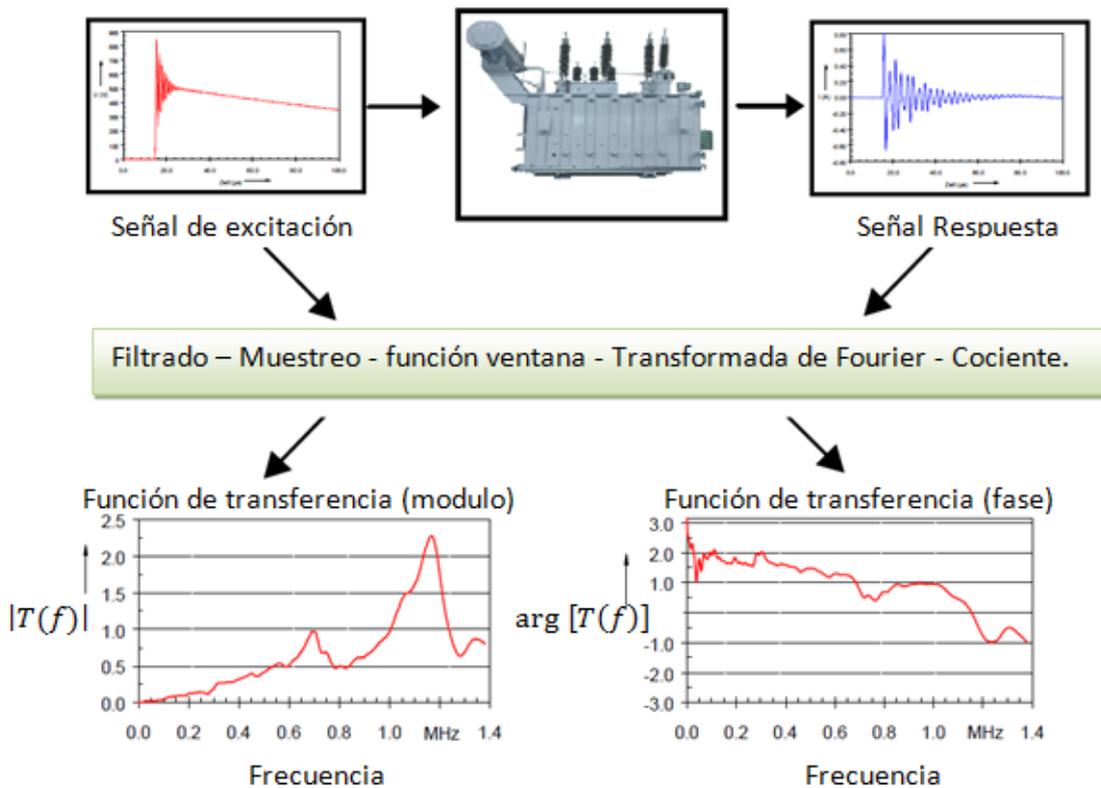


Figura 9: "Obtención de la función de transferencia por el método IFRA".

2.2.2 SFRA

Esta variante del FRA implica obtener la función de transferencia (Ecuación 1) realizando directamente un barrido en frecuencia con una señal sinusoidal de aproximadamente 10 Vpp. El intervalo de frecuencias adoptado depende de la referencia y del instrumento que se utilice, siendo el más usual de 20 Hz a 2 MHz.

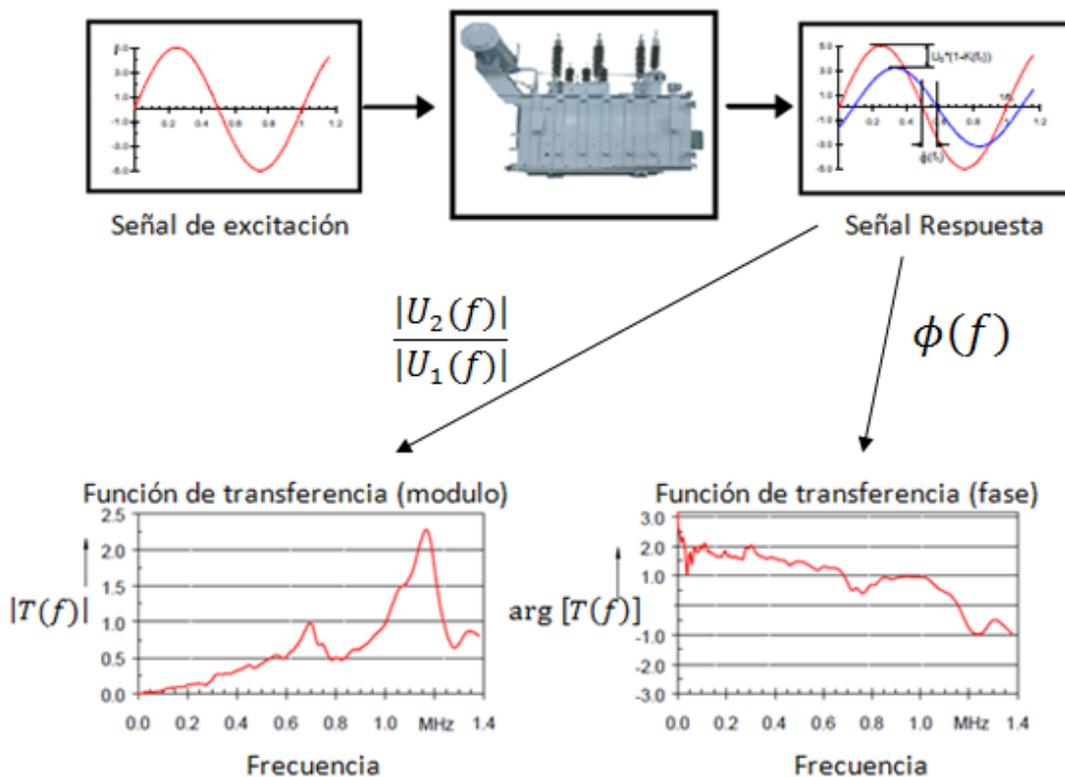


Figura 10: "Obtención de la función de transferencia por el método SFRA".

2.2.3 Comparación entre ambas alternativas



Figura 11: "Comparación entre método de IFRA y SFRA".

2.3 Características del SFRA

Entre ambas variantes, la que se ha considerado en el presente trabajo, es la de SFRA offline, ya que es la que presenta mayores ventajas y actualmente es la más difundida a nivel mundial en el ambiente electrotécnico.

2.3.1 Preparación del ensayo

El transformador a ensayar debe ser desconectado de la red de alimentación, y la cuba del mismo debe vincularse al potencial de tierra (así lo está en operación normal). (1) Si el transformador no se desenergiza disminuyendo la tensión progresivamente, presentará magnetización residual. Es importante desmagnetizar el transformador antes de proceder con la prueba, ya que las respuestas a frecuencias bajas (<5 kHz) pueden verse afectadas.

Si el transformador posee devanados con regulación, es recomendable realizar los ensayos en cada una de las posiciones del TAP. En caso de no disponer de suficiente tiempo para esto, es conveniente ajustarlo en su posición máxima para que el barrido en frecuencia se realice sobre todas las espiras.

2.3.2 Instrumento

Se trata básicamente de una fuente de frecuencia variable, junto con dos canales de medición de tensión. Durante el ensayo la fuente aplica una tensión sinusoidal de frecuencia variable, utilizada como referencia; el primer canal mide esta referencia en el punto donde se aplica al transformador y el segundo mide las tensiones resultantes en otro punto del transformador (dependiendo de la configuración utilizada). Todas las mediciones se realizan con referencia a tierra.

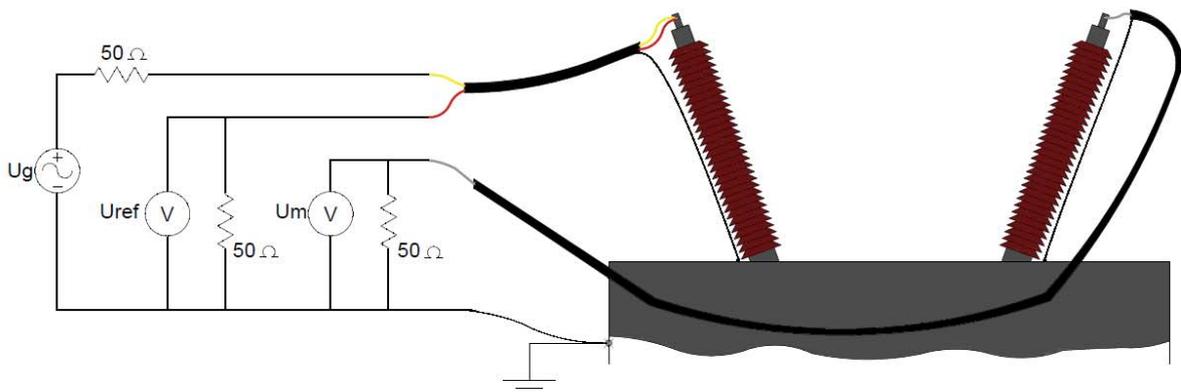


Figura 12: "Esquema básico de conexión del instrumento".

En la Figura 12, la tensión U_g es aquella que se aplica en el terminal del transformador, U_{ref} es aquella que se mide en el mismo (referencia) y U_m es la tensión medida en otro terminal de acuerdo a la configuración que se utilice (véase 2.4 Configuraciones). Las impedancias del instrumento y los cables usualmente son de 50Ω y se ubican como muestra la figura.

Por medio de un software que provee el fabricante del instrumento y un ordenador, el instrumento realiza automáticamente el barrido en frecuencia y con las dos señales registradas realiza las curvas de transferencia del FRA. Generalmente junto con el instrumento de medición se proporciona un elemento de referencia, cuya respuesta en frecuencia es conocida, y sirve para verificar el correcto funcionamiento del equipo, cables de conexión, etc. En la Figura 13 se presenta el instrumento utilizado en el trabajo y su cuadripolo de referencia.



Figura 13: "Instrumento analizador de SFRA y su cuadripolo de referencia".

Resultados obtenidos al realizar el ensayo

Módulo: Se calcula para cada valor de frecuencia, tomando el módulo de la señal sinusoidal de salida y dividiéndola por la referencia.

$$|T(s)| = \frac{|U_m(s)|}{|U_{ref}(s)|} \tag{Ecuación 2}$$

Como se mencionó anteriormente, la curva de módulo se presenta en dB:

$$Mod = 20 \log \frac{|U_m(s)|}{|U_{ref}(s)|} \tag{Ecuación 3}$$

Fase: Al igual que para el módulo se utiliza la función de transferencia de la Ecuación 1. Se grafica el desfase de la señal de salida respecto a la de referencia.

$$\angle\phi = Arg\left(\frac{U_m(s)}{U_{ref}(s)}\right) \tag{Ecuación 4}$$

La fase se representa en grados y varía de acuerdo a las características de la red RLC bajo ensayo.

2.3.3 Conexiones

Para la prueba se utilizan tres cables blindados de alta frecuencia, con impedancias características conocidas y constantes. La longitud de los cables debe ser suficiente para llegar a los terminales a través de la longitud de los bushings. (5)

Las características de los conductores utilizados para conectar la pantalla de los cables de alta frecuencia al potencial de tierra son los parámetros clave que limitan la repetitividad del FRA. Para reducir su inductancia, es recomendable mantener los cables de alargue lo más cortos posible (sin enrollarlos) y usar conductores trenzados planos (20 mm de ancho mínimo). Los alargues deben pasar ajustadamente a través del cuerpo del bushing. (1) (6)

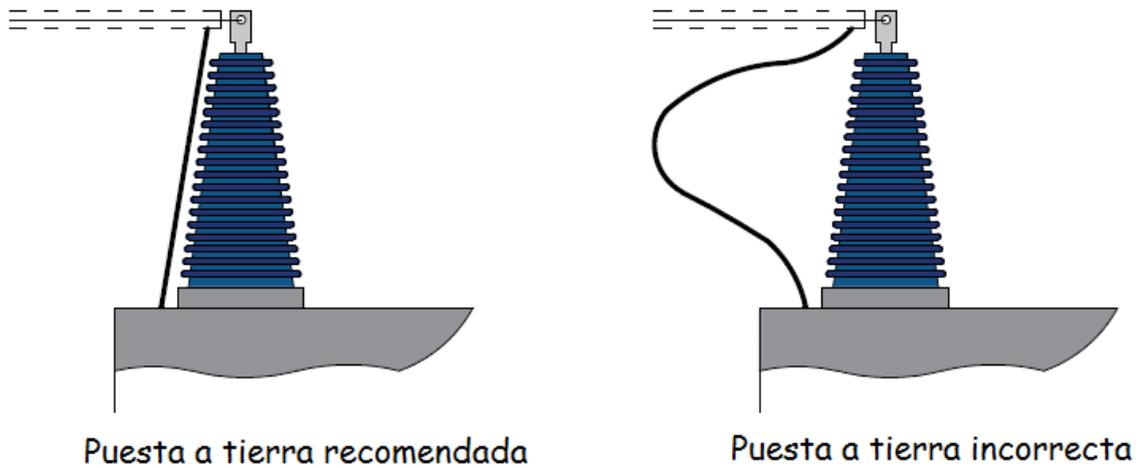


Figura 14: "Puesta a tierra del blindaje de los cables".

La mayoría de los fabricantes de instrumentos de FRA utilizan $50\ \Omega$ como impedancia característica de los cables, aunque no haya evidencia técnica de que un valor sea ventajoso frente a otro para detectar fallas. Para mayor coherencia entre dos resultados, es recomendable el mismo valor de impedancia de medición. (5)

2.3.4 Parámetros a especificar junto con el ensayo

La forma en que se realiza el procedimiento de ensayo tiene una gran influencia en la respuesta en frecuencia. Los devanados que no están siendo utilizados deben dejarse abiertos o conectados de alguna forma determinada según la configuración que se esté ensayando, y toda esta información, que debe quedar asentada, es tan importante como la prueba en sí misma debido a que le otorga validez. (5) (1)

La información mínima requerida es:

- Terminal donde están conectados los cables de alimentación y de referencia.
- Terminal donde se mide la respuesta.
- Configuración de todos los terminales no utilizados (flotantes, en cortocircuito, a tierra).
- Impedancia de medición.
- Tensión de ensayo aplicada y rango de frecuencias.
- Posición de conmutadores (DETC, OLTC).
- Fabricante y número de serie.

Cuando la configuración ensayada requiera cortocircuitar terminales, los cables utilizados deben ser lo más cortos posibles, ya que su impedancia puede afectar a la medición.

Es una buena práctica adjuntar fotografías de todas las conexiones realizadas y de la placa de características de la unidad junto con el ensayo.

2.4 Configuraciones

La elección de la configuración a realizar debe ser ajustada de acuerdo al objetivo del ensayo. Si se desea obtener las curvas de FRA como referencia para futuras comparaciones o para una evaluación general de la condición mecánica, deben realizarse las cuatro variantes que se presentarán en esta sección. En caso de que existan limitaciones en el tiempo disponible para realizar la prueba, es recomendable proceder únicamente con la prueba de admitancia de circuito abierto en todos los devanados. (5) (1)

2.4.1 Admitancia de circuito abierto (YCA)

Se inyecta y se mide la señal de entrada en un devanado y se registra la señal transmitida al final del mismo, con el resto de los devanados a circuito abierto. Así se procede con cada uno de los devanados. En la Figura 15 se presentan las conexiones para realizar esta configuración.

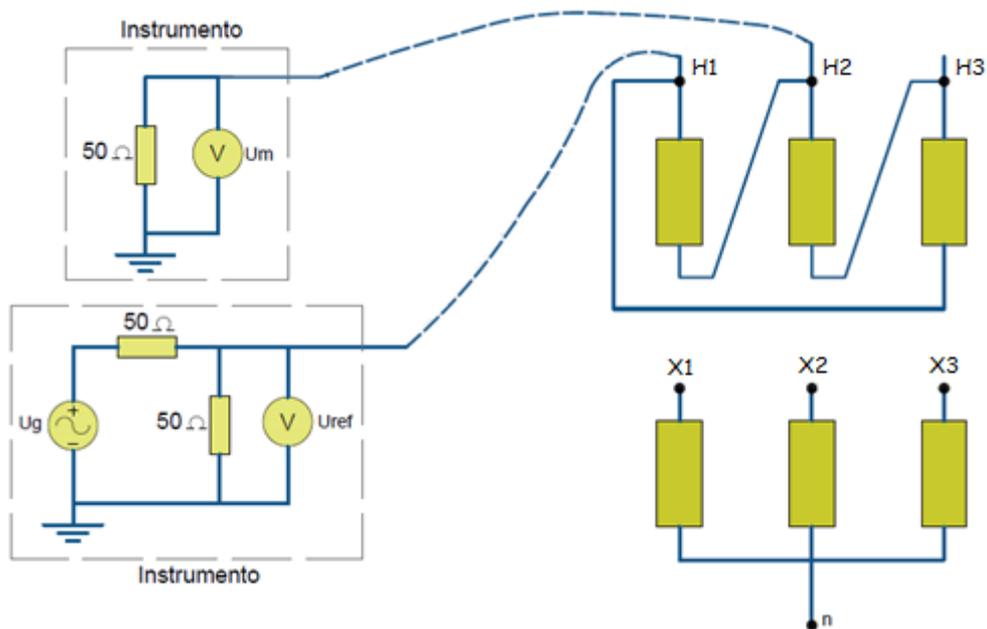


Figura 15: "Perfil de conexión de admitancia de circuito abierto".

La respuesta obtenida en esta configuración es influenciada, fundamentalmente en bajas y medias frecuencias, por los efectos del núcleo y los devanados principales, respectivamente. El parámetro que caracteriza la respuesta a bajas frecuencias (antes de la primera resonancia) es la impedancia de magnetización del transformador.

Dependiendo del grupo de conexión de los devanados, y del tipo constructivo del núcleo (tres columnas, cinco columnas, acorazado, etc.) la respuesta característica presentará distintos comportamientos.

La respuesta de la admitancia de circuito abierto se puede dividir en tres regiones (1):

- En bajas frecuencias (<5kHz) predominan los efectos relacionados al núcleo y se presentan frecuencias de resonancia significativas (una o dos según el grupo de conexión y el devanado testeado).
- En frecuencias medias (típicamente hasta 500kHz) pueden existir o no resonancias, la curva en general toma un camino ascendente, hacia valores de magnitud cercanos a 0dB. La respuesta está relacionada con los devanados principales.
- En frecuencias mayores a 500kHz, la respuesta se ve influenciada por los devanados de regulación, conductores del TAP, espiras desplazadas, conexiones, etc. Presenta comportamientos irregulares y algunas resonancias en la curva de módulo.

Este ensayo es el más utilizado debido a su simplicidad y la posibilidad que ofrece de examinar los devanados por separado. Es importante tener en cuenta que en caso de conexión triángulo se analiza un devanado en paralelo con los otros dos, por lo que un desperfecto en cualquiera de los arrollamientos se reflejará en las tres curvas. Esto no ocurre en grupos de conexión estrella puesto que se realiza el ensayo entre fase y neutro (si el mismo está accesible) examinando sólo un devanado. (1) (10)

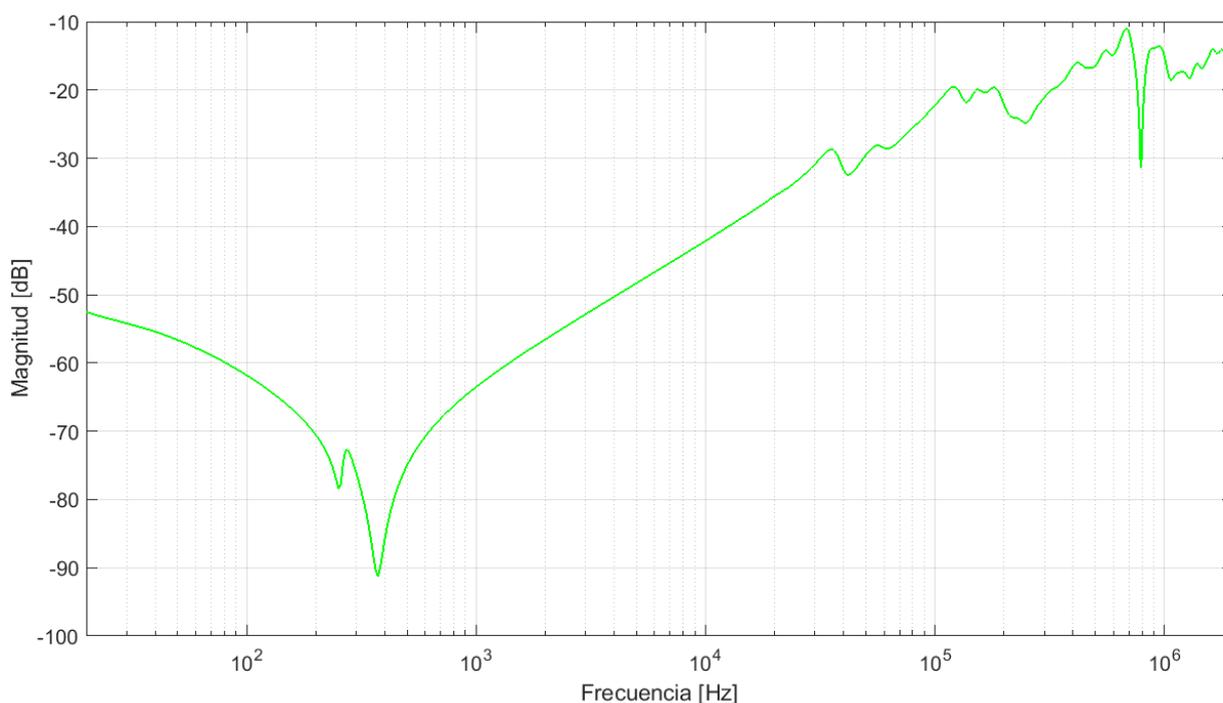


Figura 16: "Respuesta típica de admitancia de circuito abierto en un transformador trifásico, 630 kVA, Dyn5".

2.4.2 Admitancia de cortocircuito (YCC)

Se realiza de manera análoga al ensayo anterior pero cortocircuitando los devanados del lado de BT si el ensayo se hace del lado de AT, o los de AT si el ensayo se realiza desde el lado de BT. Los neutros que estén disponibles NO deben ser incluidos en el cortocircuito. (1) Es importante que la impedancia de los cables utilizados para cortocircuitar los terminales sea

despreciable frente a la impedancia que presenta el transformador para que no tenga influencia en los resultados. En la Figura 17 se presentan las conexiones para realizar esta configuración.

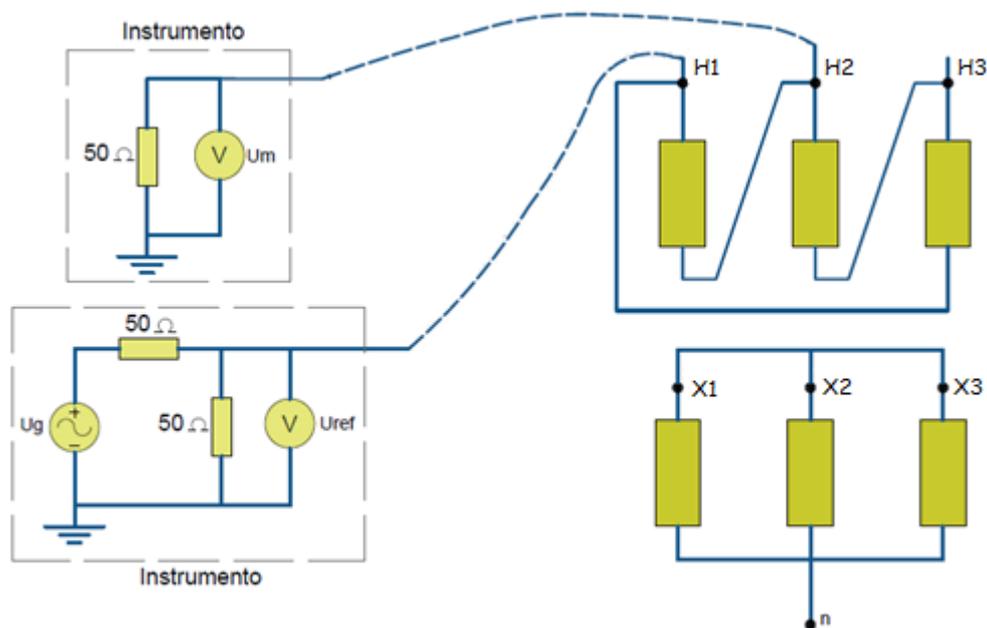


Figura 17: "Perfil de conexión de admitancia de cortocircuito".

El proceso de realizar el cortocircuito permite remover la influencia del núcleo por debajo de los 10 a 20 kHz. Ahora, la respuesta a bajas frecuencias, está caracterizada por la impedancia de dispersión en vez de la inductancia de magnetización. Una respuesta característica se presenta en la Figura 18. En altas frecuencias las curvas de admitancia de cortocircuito y circuito abierto son similares. Esto se puede apreciar en la Figura 19.

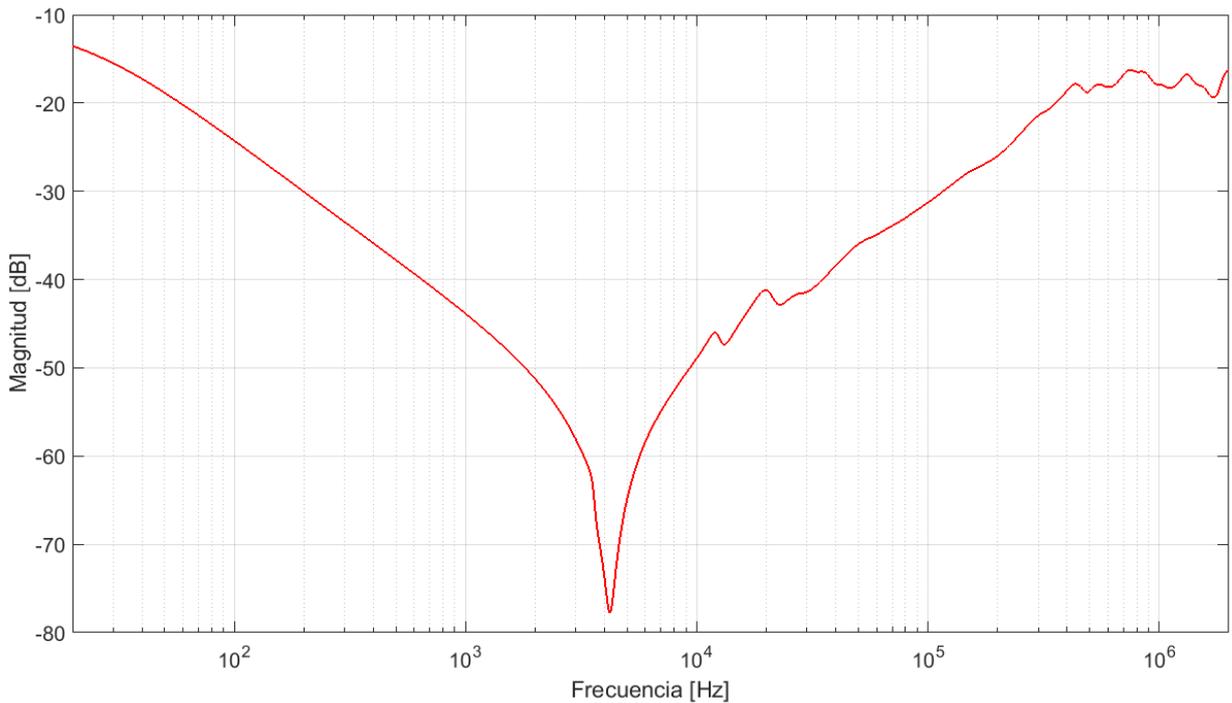


Figura 18: "Respuesta típica de admitancia de cortocircuito en un transformador trifásico, 100 kVA, Dyn5".

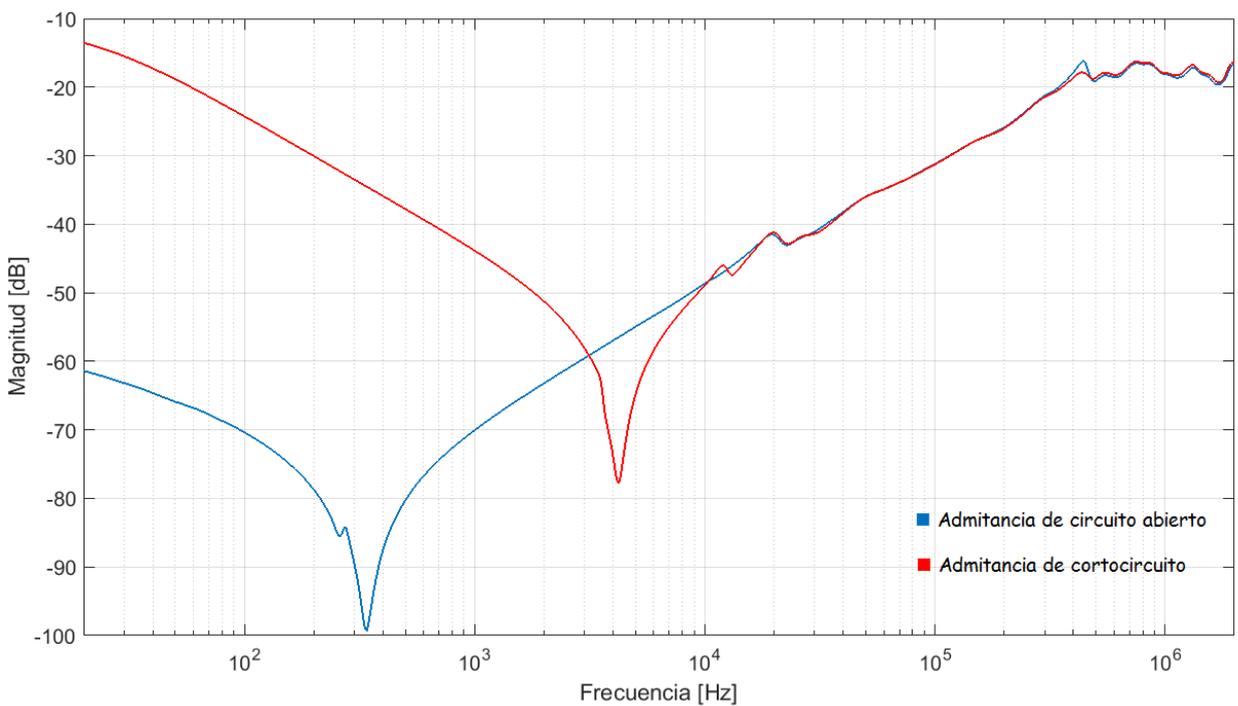


Figura 19: "Comparación entre las dos configuraciones en transformador trifásico, 100 kVA, Dyn5".

Los devanados en cortocircuito pueden estar abiertos o conectados a tierra. Para los transformadores trifásicos, hay dos variantes, ya sea cortocircuitando fase por fase a tierra, o mediante un cortocircuito trifásico. Esta prueba es útil para obtener información relacionada con la impedancia de dispersión a bajas frecuencias (incluida la frecuencia de operación), o para eliminar la incertidumbre relacionada con la influencia del núcleo cuando este posee magnetismo residual.

2.4.3 Interdevanado capacitivo (IC)

Se realiza entre dos devanados que están aislados eléctricamente. Se aplica la señal a la entrada de un bobinado y se registra la respuesta en el otro bobinado de la misma fase, dejando el resto de los terminales abiertos. La respuesta, como es de esperar, estará gobernada por la capacitancia existente entre ambos arrollamientos. En la Figura 20 se presentan las conexiones para realizar esta configuración.

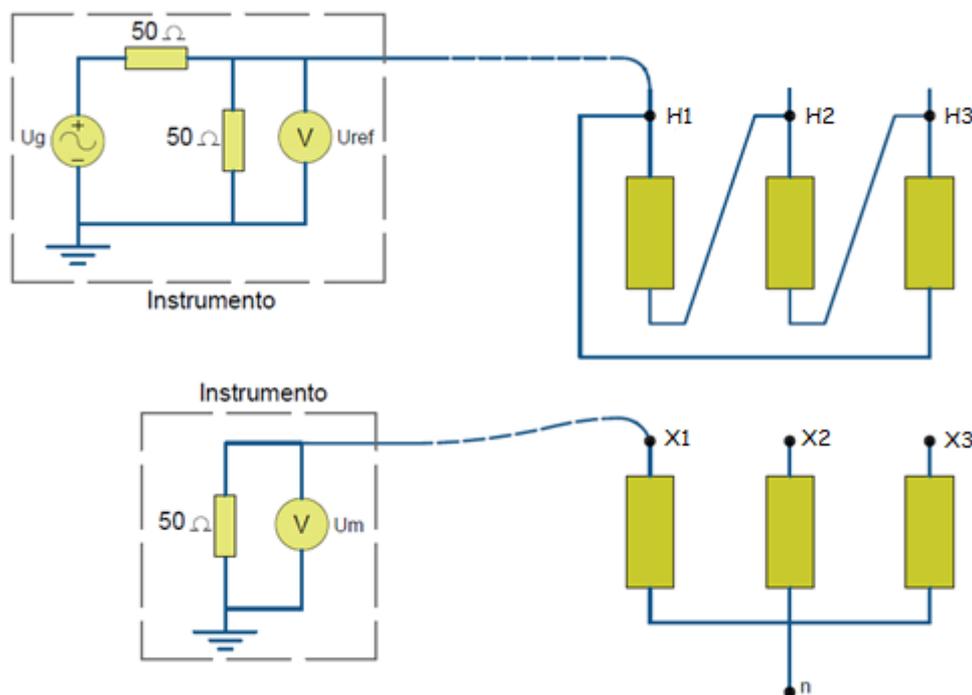


Figura 20: "Perfil de conexión del interdevanado capacitivo"

Por definición, este tipo de ensayo no puede ser realizado en autotransformadores ya que los devanados común y serie se encuentran conectados galvánicamente entre sí. Hacer esta misma conexión en un autotransformador significaría un ensayo de admitancia de circuito abierto.

Este ensayo revela impedancias altas (capacitivas) a bajas frecuencias (<100Hz), que van decreciendo a medida que la frecuencia aumenta. En la Figura 21 puede observarse este comportamiento.

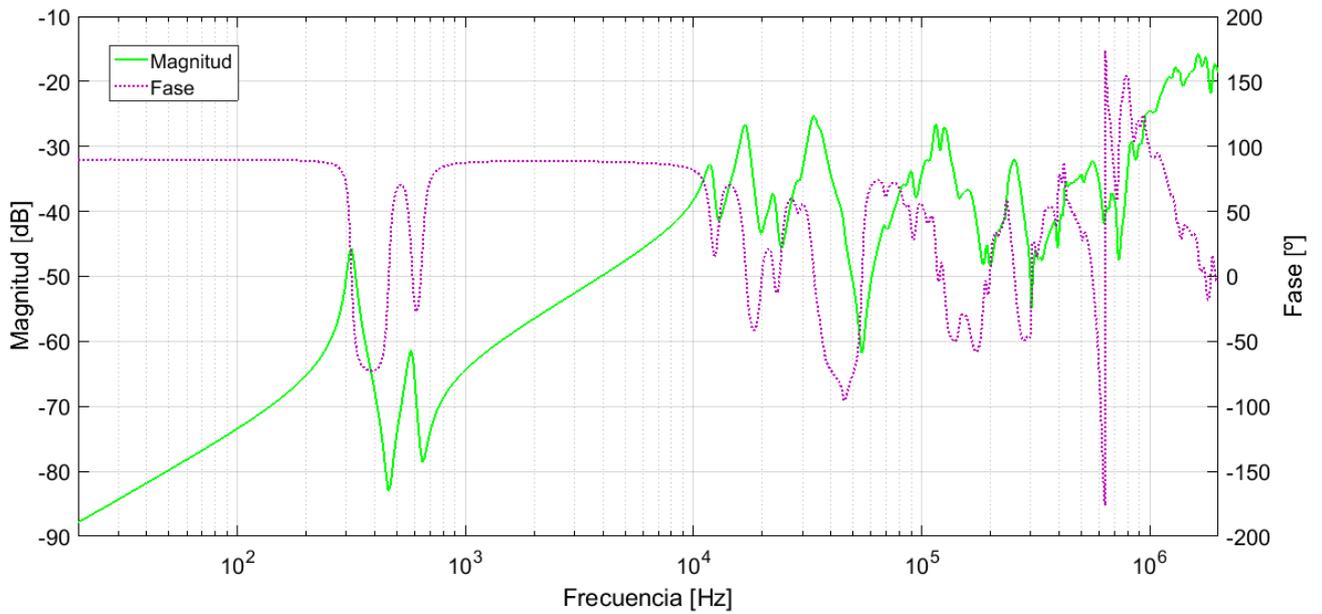


Figura 21: "Respuesta típica del interdevanado capacitivo en transformador trifásico, 30 MVA, YNynd11".

2.4.4 Interdevanado inductivo (II)

Se realiza aplicando la señal en un devanado y midiendo la respuesta en el otro devanado de la misma fase, mientras los otros extremos de ambos devanados se encuentran conectados a tierra. Todos los terminales que no están bajo ensayo se dejan abiertos. En la Figura 22 se presentan las conexiones para realizar esta configuración.

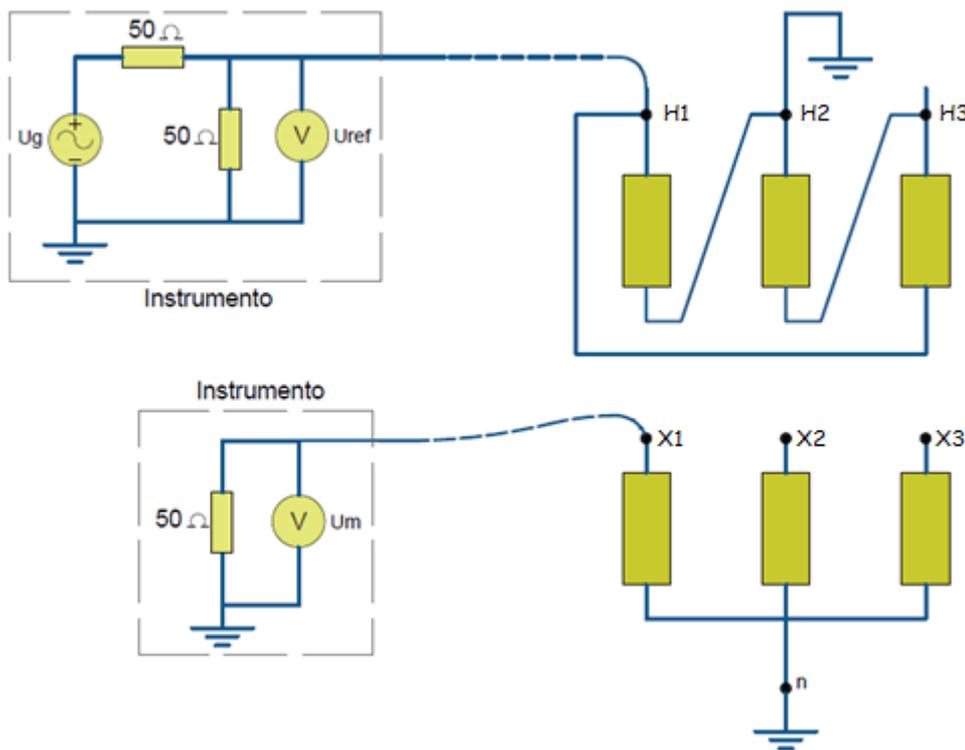


Figura 22: "Perfil de conexión del interdevanado inductivo".

En bajas frecuencias, la respuesta estará dominada por la relación de transformación entre ambos bobinados, observable en la curva como una recta de valor constante. La fase, en bajas frecuencias puede tener un valor de 0° o 180° dependiendo de los puntos homólogos de ambas bobinas (sentido de los arrollamientos). En frecuencias medias y altas se presentan una serie de resonancias que por lo general no son tenidas en cuenta a la hora de analizar las curvas, debido a que el objetivo principal de esta configuración es verificar la relación de transformación. (1)(5)

Es importante aclarar que la respuesta obtenida no es la relación de transformación de la máquina en vacío, sino que presenta una carga de 50 Ω asociada al instrumento de ensayo. En la medida en que la rama longitudinal del circuito equivalente del transformador tenga valores de impedancia despreciables frente a estos 50 Ω, sí puede afirmarse que se obtiene una medida de la relación de transformación.

Una respuesta típica de esta configuración se presenta en la Figura 23.

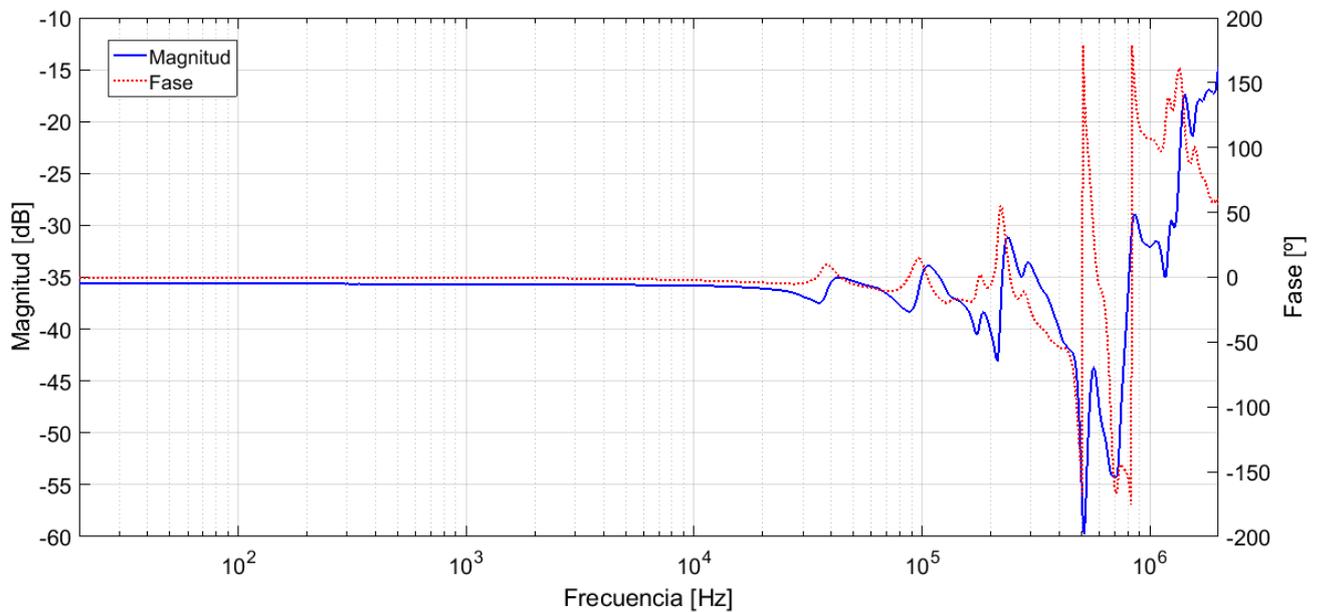


Figura 23: "Respuesta típica de interdevanado inductivo en transformador de 500kVA, Dyn11, 13,2/0,4kV".

Capítulo 3

Relación del SFRA con otros ensayos

Se realiza una comparación entre las distintas configuraciones de la prueba de SFRA y otros ensayos ampliamente empleados en el mantenimiento de transformadores. Se analizan las equivalencias teóricas y circuitales de ambas alternativas.

3.1 Comparación entre el SFRA y ensayos básicos

Los ensayos típicos realizados en el mantenimiento de transformadores son muchos, y cada uno de ellos permite relevar el estado de una parte de la máquina. Debido a las necesidades de operación, los transformadores pueden estar fuera de servicio un tiempo muy limitado y para caracterizarlos íntegramente es crítico realizar la mayor cantidad de ensayos posible. Algunas de las configuraciones de la prueba de SFRA, por su forma de conexión, pueden relacionarse directamente con ensayos básicos en el campo del mantenimiento de transformadores. De esta manera, puede realizarse como primer ensayo (posterior a desmagnetizar el núcleo), una prueba completa de SFRA, y si se presenta una anomalía en alguna configuración, proceder a realizar el ensayo relacionado con dicha configuración. Este procedimiento permite ganar en tiempo y recursos a la hora de realizar el mantenimiento. (1) (16)

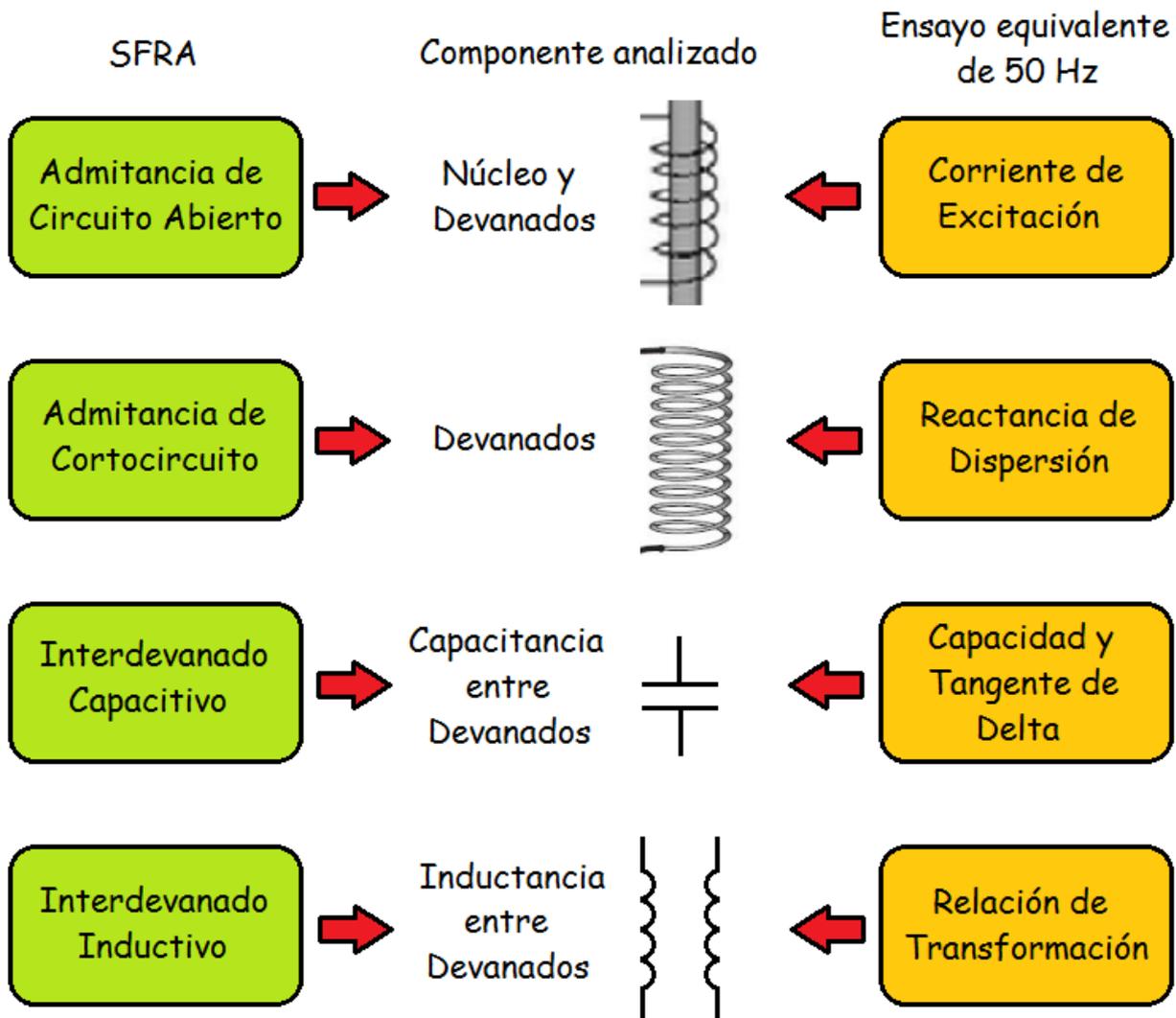


Figura 24: "Relación de SFRA con otros ensayos".

3.1.1 Admitancia de circuito abierto – Corriente de excitación

La configuración de admitancia de circuito abierto, tal como se indicó en 2.4.1, consiste en aplicar tensión a un extremo de un devanado y medir la respuesta en el otro extremo. Este tipo de conexión presenta ciertas similitudes con el ensayo conocido como “corriente de excitación”.

La prueba de corriente de excitación consiste básicamente en la medición de la corriente en una de las bobinas del transformador, usualmente del lado de alta tensión, con el lado de baja tensión a potencial flotante (a excepción de los neutros que se conectan a tierra). Los transformadores trifásicos se ensayan aplicando una tensión monofásica de a un devanado por vez. La tensión de ensayo es la mayor aplicable, sin exceder la sollicitación admisible por el bobinado en cuestión. (11) (17)

Para realizar la interpretación, se registra el valor de corriente, y se contrasta con resultados de pruebas anteriores. Las diferencias que se manifiesten indican un cambio en la reluctancia efectiva del circuito magnético, y sirven para determinar la existencia de espiras en cortocircuito, deformaciones en bobinados y daños o movimientos del núcleo. (17)

En la Figura 25 se hace la representación circuital y las conexiones para realizar esta prueba.

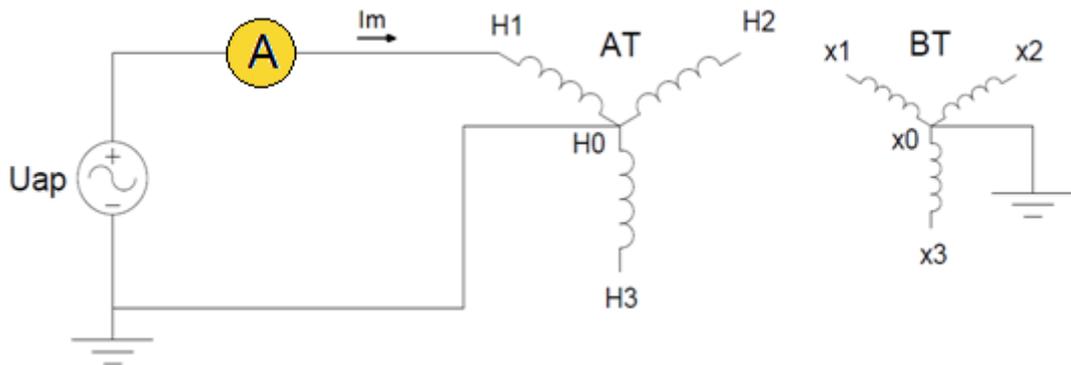


Figura 25: "Conexiones de ensayo de corriente de excitación".

De más está aclarar que existen equipos específicamente diseñados para realizar estas mediciones de forma automática.

Similitudes

- Ambos ensayos sirven para analizar de a una fase por vez.
- Permiten detectar fallas en el núcleo y deformaciones en devanados.
- Se ven muy afectados por el magnetismo remanente que pueda presentar el núcleo.
- Necesitan datos de referencia de la unidad, de un transformador hermano o entre fases del mismo.

Diferencias

- En la prueba de corriente de excitación se aplica una tensión cercana a la máxima que soporte el bobinado, mientras que en el SFRA se aplican unos pocos volt.
- El SFRA realiza la medición de la tensión aplicada y la respuesta, mientras que el ensayo de "corriente de excitación" mide la corriente de vacío.
- La corriente de excitación se mide a frecuencia nominal mientras que la admitancia de circuito abierto hace un barrido en frecuencia.

Figura 26: "Comparación: Admitancia circuito abierto - Corriente de excitación".

Como comentario final, es importante tener en consideración el hecho de que los materiales magnéticos que componen el núcleo hacen que la respuesta a distintas tensiones no sea lineal, por lo que no es recomendable realizar comparaciones entre los resultados de una prueba y la otra.

3.1.2 Admitancia de cortocircuito – Reactancia de dispersión

La configuración de admitancia de cortocircuito, presentada en 2.4.2, consiste en aplicar tensión a un extremo de un devanado y medir la respuesta en el otro extremo, con las bobinas del lado opuesto en cortocircuito. Este tipo de conexión presenta ciertas similitudes con el ensayo de "reactancia de dispersión".

Es importante aclarar que esta comparación se hace con el ensayo de "reactancia de dispersión" abocado a mantenimiento de transformadores (normalizado en (17)), que presenta algunas diferencias con aquel que está abocado a pruebas de tipo y rutina (normalizado en (18)).

La medición de la reactancia de dispersión puede realizarse en cualquier transformador trifásico, sea cual sea su grupo de conexión. Los terminales neutros que puedan existir no se utilizan. El ensayo se realiza cortocircuitando los tres terminales del lado de baja tensión y aplicando una tensión monofásica de 50 Hz a dos terminales del lado de alta tensión. Se realizan tres mediciones de a pares de terminales (H1-H2, H2-H3, H3-H1), con la corriente ajustada en un mismo valor en las tres lecturas. Es importante que los conductores que realizan el corto entre fases sean lo más corto posibles y presenten una impedancia baja

(comparada con la que presenta el transformador), ya que la misma incide en la medición. (11)

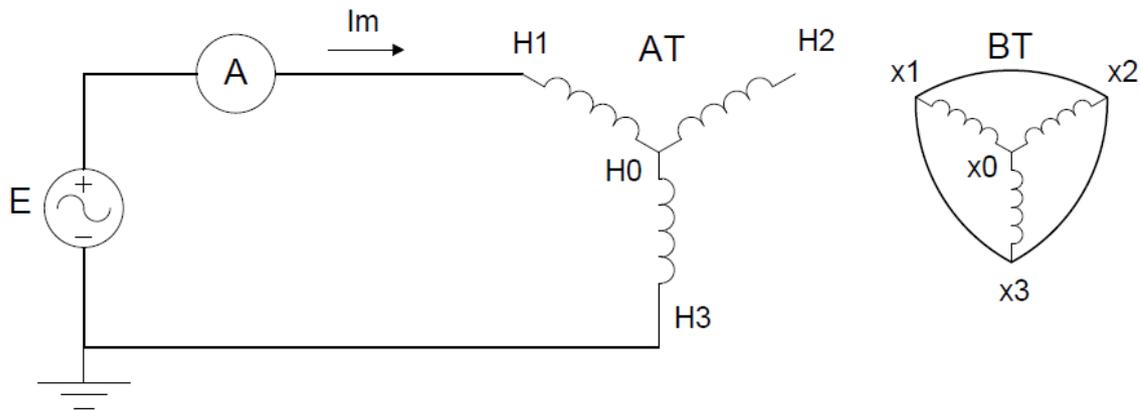


Figura 27: "Conexiones de ensayo de reactancia de dispersión".

El valor de la reactancia para un transformador trifásico se obtiene de acuerdo a la Ecuación 5.

$$Z[\%] = \frac{1}{60} \cdot \frac{E_{12} + E_{23} + E_{31}}{I_m} \cdot \frac{S_n}{(U_L)^2} \tag{Ecuación 5}$$

De manera análoga se procede con las unidades monofásicas, realizando una única medición de corriente. La reactancia se obtiene según la Ecuación 6.

$$Z[\%] = \frac{1}{10} \cdot \frac{E_m}{I_m} \cdot \frac{S_n}{(U_L)^2} \tag{Ecuación 6}$$

U_L : Tensión nominal de línea de los bobinados energizados. [kV]

$E_{12}, E_{23}, E_{31}, E_m$: Tensiones aplicadas. [V]

I_m : Corriente medida. [A]

S_n : Potencia nominal del transformador. [kVA]

El ensayo de reactancia de dispersión habitualmente se realiza en campo y puede ser comparado con valores de placa o de referencia. Es muy utilizado para detectar movimientos en devanados, provocados por cortocircuitos o daños mecánicos de transporte e instalación.

Un cambio en la impedancia de cortocircuito indica un posible movimiento de los devanados dentro del transformador. Cambios mayores a $\pm 3 \%$ son indicativos de alarma. (17) Por ejemplo, pasar de $Z_{cc} = 5.0 \%$ a $Z_{cc} = 5.4 \%$ es indicativo de alerta puesto que se trata de un cambio del 8% .

Similitudes

- En ambos ensayos se analiza de a una fase por vez.
- Se utilizan tensiones inferiores a la nominal del transformador para excitar el bobinado.
- Permiten detectar movimientos y deformaciones del bobinado en cuestión.
- Permiten calcular de manera indirecta la reactancia de dispersión del transformador.
- Se necesitan datos de ensayos anteriores o de referencia.

Diferencias

- La "reactancia de dispersión" se ensaya a corriente constante de valor 0.5 a 1% de la nominal mientras que el SFRA aplica su tensión de 10Vpp, sea cual fuere la corriente.
- La prueba de reactancia de dispersión necesita una fuente más robusta por lo comentado en el punto anterior.
- La "reactancia de dispersión" se mide a frecuencia de operación mientras que la admitancia de cortocircuito hace un barrido en frecuencia.

Figura 28: "Comparación: Admitancia de cortocircuito - Reactancia de dispersión".

3.1.3 Interdevanado capacitivo – Capacidad y tangente de delta

La configuración de interdevanado capacitivo, tal como se analizó en 2.4.3, consiste en aplicar una tensión en un terminal del transformador y medir la respuesta en otro terminal, de diferente nivel de tensión. El resto de los terminales se dejan a circuito abierto. Estas conexiones son similares a las de los ensayos de capacidad y tangente de delta.

Estos ensayos tienen su fundamento en las características capacitivas que presentan los aislamientos interdevanado del transformador. La capacidad está influenciada por el estado del material dieléctrico y la configuración física de los conductores, es por esto, que cualquier cambio o contaminación en los aislamientos o daños físicos de los bobinados, significarán un cambio en la capacitancia medida.

Las pérdidas dieléctricas en los materiales aislantes están presentes incluso en materiales en buen estado y son fácilmente medibles. Normalmente, aumentan de manera proporcional al envejecimiento del material, a la contaminación del mismo y a daños físicos que pueda sufrir.

El factor disipación se puede modelar tal como indica la Figura 29. La corriente total tiene dos componentes, una capacitiva y una resistiva. Sencillamente, el factor de disipación, también conocido como tangente de delta, es el cociente entre ambas.

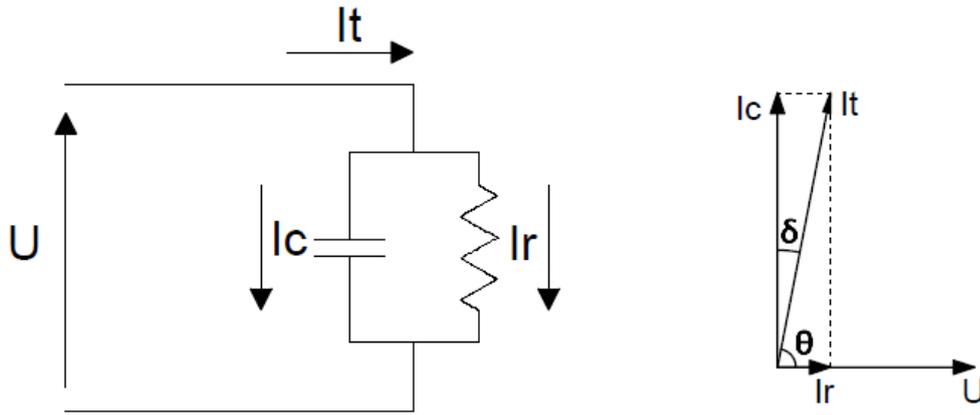


Figura 29: "Diagrama vectorial del factor de disipación".

El conocimiento de la capacidad y las pérdidas dieléctricas provee varios beneficios. Las pruebas realizadas en equipos nuevos determinan la presencia de fallas de fábrica y suministran valores de referencia para comparaciones posteriores. Las pruebas realizadas periódicamente ponen de manifiesto un envejecimiento normal o un deterioro acelerado del aislamiento. Las pruebas realizadas post-falla pueden determinar la localización del daño e incluso el fenómeno que lo originó.

El proceso de medición se realiza habitualmente utilizando puentes de medición, tales como el puente de Schering. Estos instrumentos tienen los medios para determinar el valor de capacitancia y el factor de pérdidas del aislamiento bajo ensayo. Junto con el puente se requiere una fuente de tensión alterna y un capacitor de referencia que generalmente vienen incluidos en la mayoría de los instrumentos de medición ofrecidos en el mercado.

La tensión aplicada puede ser cualquiera siempre que no supere el nivel nominal del objeto bajo ensayo. Valores típicos presentes en instrumentos de campo están entre 100 V y 12 kV.

El circuito de ensayo se presenta en la Figura 30.

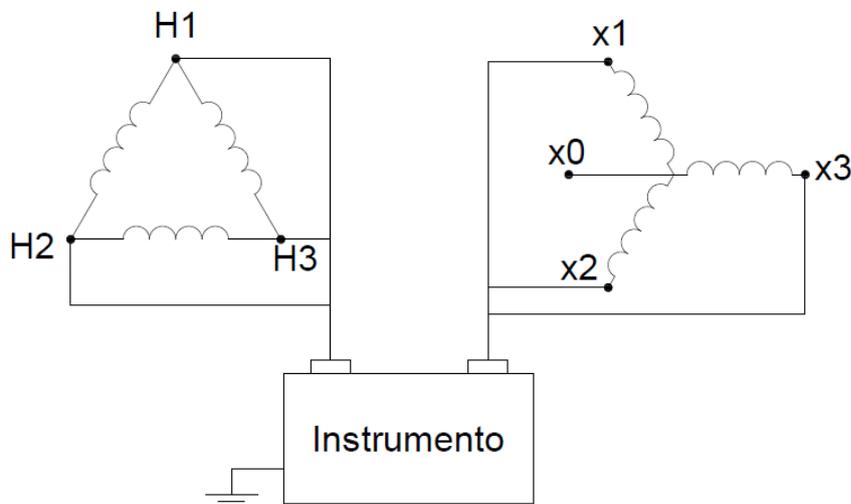


Figura 30: "Conexiones ensayo de Capacidad y tangente de delta".

Similitudes

- Ambos ensayos permiten detectar deformaciones en bobinados, envejecimiento y daños de los aislamientos.
- Son ensayos que se suelen realizar en campo.
- Es necesario contar con datos de ensayos anteriores o de referencia. Sin embargo, existen comportamientos típicos o “esperados” que permiten una primera interpretación.

Diferencias

- El ensayo de "capacidad y tangente de delta" prueba todos los aislamientos en una única medición mientras el SFRA lo hace de a un devanado por vez.
- La tensión de ensayo de la "tangente de delta" suele ser notablemente mayor a la del SFRA.
- En el SFRA se mide tensión aplicada y respuesta, mientras que la capacidad y factor de disipación se miden directamente con puentes de medición.
- La capacidad y tangente de delta se miden a frecuencia de operación, mientras que el interdevanado capacitivo hace un barrido en frecuencia.

Figura 31: "Comparación: Interdevanado capacitivo–Capacidad y tangente de delta".

3.1.4 Interdevanado inductivo – Relación de transformación

El interdevanado inductivo, tal como se detalló en 2.4.4 puede ser utilizado para estudiar las relaciones entre bobinas de una misma fase. Visto de esta manera, es muy intuitivo pensar que puede relacionarse con el ensayo conocido como relación de transformación.

Este ensayo se realiza para conocer la relación de espiras entre primario y secundario del transformador o, lo que es lo mismo, la relación de tensiones en condiciones de vacío. (17)

Los instrumentos disponibles en el mercado utilizan distintos métodos para obtener esta relación, tales como divisores de tensión, transformadores tomados como patrón, puentes, etc. Los valores obtenidos permiten conocer la relación de transformación mediante la Ecuación 7.

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{primario}}{U_{secundario}} \quad \text{Ecuación 7}$$

La interpretación de la prueba se hace verificando que el valor medido se encuentre dentro de $\pm 0.5\%$ de los valores de placa. Esta tolerancia aplica a tensiones fase-neutro.

Según la norma IEEE C57.152 (17), la relación de transformación debe evaluarse con una tolerancia menor al 0.5 %, lo que implica realizar mediciones con una buena exactitud. También hay que tener en cuenta que frecuentemente se deben emplear transformadores de tensión que aportan sus errores. (19)

Similitudes

- Ambos ensayos permiten obtener la relación de transformación en vacío, o lo que es lo mismo, la relación de vueltas entre primario y secundario.
- Son ensayos muy comunes en campo.
- No necesitan datos de referencia más que la información proporcionada por la placa de características.

Diferencias

- La prueba de interdevanado inductivo permite además obtener la polaridad, es decir, conocer los bornes homólogos. Algunos instrumentos disponibles en el mercado para el ensayo de "relación de transformación" también dan esta información, la variante presentada con voltímetros no.
- La tensión de ensayo utilizada en el ensayo ordinario es mucho mayor que la que aplica el instrumento de SFRA.
- La prueba de relación de transformación carga al transformador con una impedancia muy alta, del orden de los MΩ, mientras que el interdevanado inductivo lo carga con 50Ω.
- En el SFRA se realiza la medición para un amplio rango de frecuencias, mientras que el ensayo de "relación de transformación" se hace a frecuencia industrial (50 Hz).

Figura 32: "Comparación: Interdevanado inductivo - Relación de transformación".

Para obtener la relación de transformación por medio de una curva de módulo de SFRA se procede según la Ecuación 8. Donde M es el punto correspondiente a 50 Hz en la curva y está dado en dB.

$$\frac{|U_1|}{|U_2|} = \frac{1}{10^{M/20}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Es importante tener en cuenta que esta relación es entre bobinas, por lo que deberá ser afectada multiplicando por $\sqrt{3}$ en conexiones Yd y dividiendo por $\sqrt{3}$ en conexiones Dy. En grupos de conexión Yy o Dd la relación es directa.

En la Figura 33 se presenta una curva de SFRA obtenida de un transformador de 300 MVA, 500/138/34.5 kV, grupo Ynynd1, ubicado en la estación transformadora Chaco. Se trata del interdevanado inductivo entre secundario y terciario.

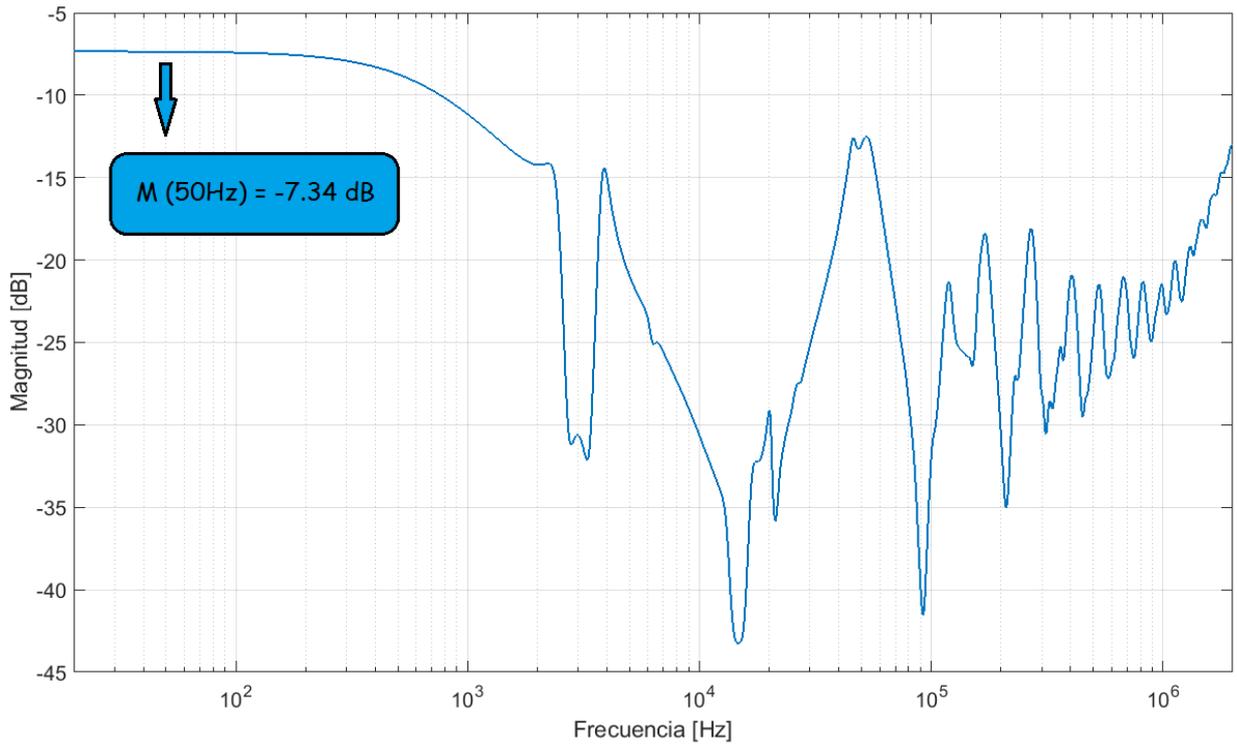


Figura 33: "Interdevanado inductivo en transformador de 500/138/34.5 kV".

Los valores de relación de transformación se presentan en la Tabla 1; el error respecto al valor teórico es de 0.75 %.

Tabla 1: "Relación de transformación obtenida mediante la curva de interdevanado inductivo".

Valor teórico	Valor calculado
$\frac{ U_1 }{ U_2 } = \frac{138 \text{ kV}}{34.5 \text{ kV}} = 4.00$	$\frac{ U_1 }{ U_2 } = \frac{1}{10^{(-7.34)/20}} \cdot \sqrt{3} = 4.03$

Si el lector está interesado puede verificar mediante la misma fórmula la curva presentada en el Capítulo 2, Figura 23.

3.2 Prueba de FRSL a partir de las respuestas de SFRA

La prueba de FRSL, Frequency Response of Stray Losses, es una técnica que actualmente está tomando cada vez más relevancia, por su capacidad de revelar fallas que son indetectables con otros métodos.

Esta prueba, no fue incluida dentro de las comparaciones anteriores ya que no se trata de un ensayo diferente al SFRA, sino que es un estudio distinto que se puede hacer a partir de las curvas obtenidas.

En transformadores que manejan grandes corrientes, el efecto pelicular y el efecto de proximidad en los conductores comienza a ser significativo. Recordemos que estos efectos son

producto de la distribución de los campos magnéticos alrededor del conductor, y que, en presencia de corriente alterna disminuyen la circulación de corriente en el centro del conductor y la aumentan en los extremos.

Visto de otra forma, estos efectos tienden a disminuir la sección efectiva del conductor y por lo tanto, aumentar su resistencia. Una resistencia alta en las bobinas de un transformador implica gran cantidad de pérdidas por efecto Joule y consecuentemente mayores calentamientos.

Para solucionar este problema, cada espira está formada por subconductores, aislados galvánicamente entre sí y conectados en paralelo en ambos extremos del bobinado. Al tener cada subconductor una menor sección, la profundidad de penetración del efecto pelicular comienza a ser comparable con el diámetro del mismo y las pérdidas disminuyen.

El ensayo de FRSL es útil para detectar cortocircuitos entre estos subconductores, que si bien no son cortocircuitos entre espiras, incrementan el diámetro del conductor y las pérdidas por corrientes de Eddy.

El ensayo es similar al de reactancia de dispersión. La diferencia radica en que se presta atención a la parte resistiva de la medición, en vez de a la impedancia completa. Además, el FRSL se realiza a varias frecuencias discretas entre, por ejemplo, 20 Hz y 500 Hz.

La medición de frecuencias mayores a 50 Hz es crítica porque aquí es donde la influencia del efecto pelicular es más pronunciada. Un fallo de cortocircuito entre subconductores, será detectable sólo a estas frecuencias, no a la frecuencia de operación. (20)

El análisis del ensayo de FRSL se lleva a cabo comparando las resistencias medidas con valores de referencia o comparando las mediciones de resistencia de distintas fases. Una diferencia mayor al 2 % es indicativa de cortocircuito entre subconductores. Los instrumentos utilizados para realizar pruebas de SFRA permiten presentar los resultados como impedancias, resistencias e inductancias en función de la frecuencia, por lo que son aptos para este tipo de pruebas.

En la Figura 34 se presenta una respuesta típica de FRSL obtenida a partir de un ensayo de SFRA y en la configuración de admitancia de cortocircuito, graficando resistencia en función de la frecuencia.

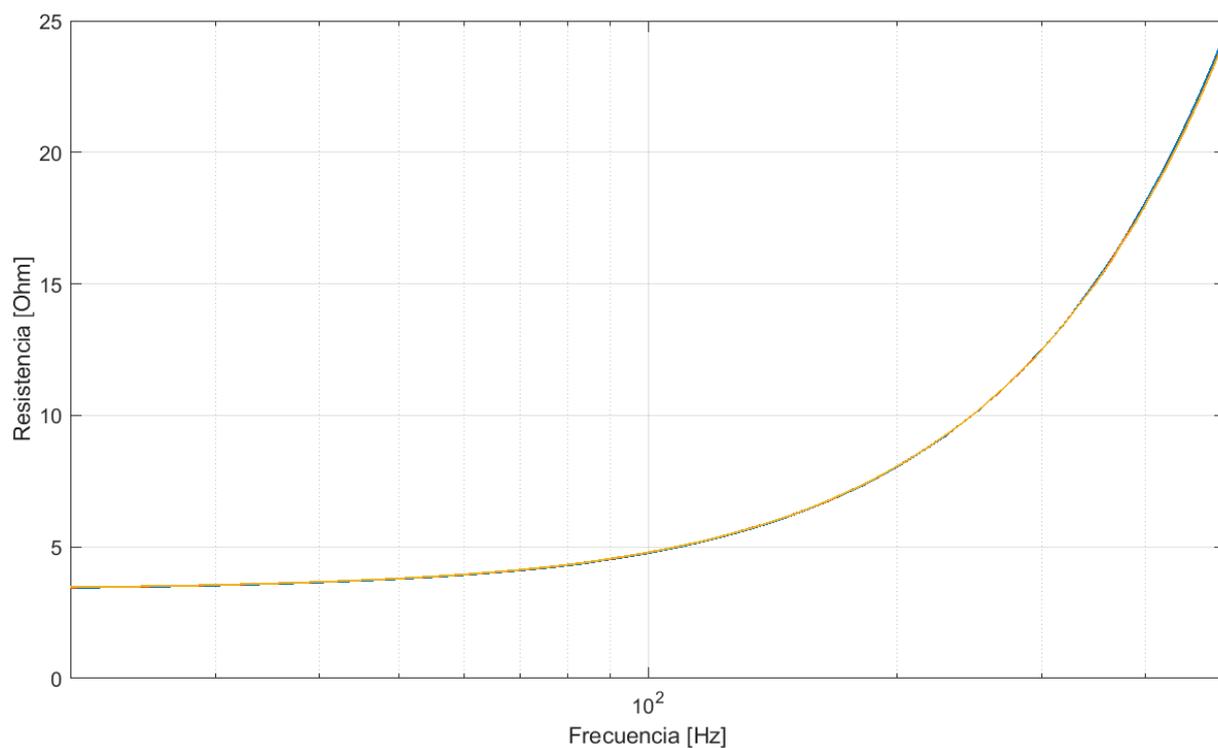


Figura 34: "Respuesta típica de FRSL medida en las tres fases de un transformador de potencia 138/34.5/13.8 kV, 30 MVA".

Capítulo 4

Normalización de la prueba de SFRA

Se presentan las principales normas y documentos técnicos relacionados con el ensayo. Se comentan los aportes más significativos de cada uno.

4.1 Normalización

En la actualidad existen tres normas y un documento técnico referidos a la realización e interpretación del ensayo a nivel internacional. En el presente capítulo se hace una breve descripción de cada una.



Figura 35: "Normas y documento técnico relacionados con la prueba de FRA".

4.2 IEC 60076-18-2012: Power Transformers - Measurement of Frequency Response.

Esta norma, correspondiente a la Comisión Electrotécnica Internacional está abocada principalmente a transformadores de potencia. El gran aporte de este documento es una guía con muchísimo detalle acerca de la ejecución y documentación del ensayo. No indica recomendaciones ni una guía de interpretación de los resultados.

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

Esta norma, publicada por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, dentro de las normas referidas a transformadores de potencia, desarrolla el marco teórico de la prueba, recomendaciones para la ejecución de la misma y la documentación de los ensayos. Su aporte más significativo es una guía para la interpretación de los resultados denominada “modos de fallos”. En la misma se explican las fallas más típicas que se presentan en transformadores, y los rangos de frecuencias donde se generan cambios en la curva de SFRA. De esta forma, la norma se convierte en una herramienta poderosa para determinar el estado de la máquina. Esta guía de interpretación se refiere solo a las configuraciones YCA e YCC.

Las fallas que la norma contempla son:

- Deformación radial en bobinados.
- Elongación axial de bobinados.
- Desplazamiento del bobinado sin deformación.
- Defectos en el núcleo.
- Resistencia de contactos.
- Cortocircuitos entre espiras.
- Devanados a circuito abierto.
- Devanados flojos debido al transporte.
- Magnetización residual.
- Blindajes flotantes.

Además la norma hace otro aporte interesante sobre el tipo de problema que afecta al transformador según la banda de frecuencia donde se encuentran diferencias en las curvas de admitancia de circuito abierto (YCA). Se eligió la configuración de YCA porque es la que mayor información aporta sobre la condición mecánica y es la única que se realiza en las situaciones en que se dispone de la máquina a ensayar por un tiempo limitado.

En la Figura 36 se ilustra este aporte de la norma.

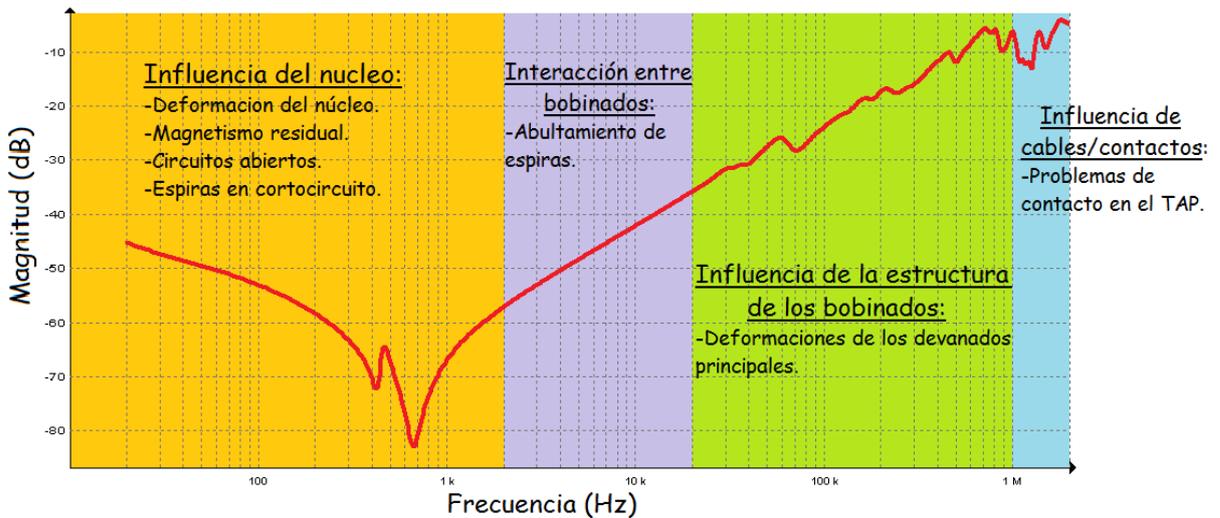


Figura 36: "Tipo de problema de acuerdo a la banda de frecuencia".

4.4 DL/T 911-2004: Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers.

Esta norma, perteneciente a la República Popular China, es la primera que salió a nivel internacional. Establece criterios normalizados, de manera bastante sintética, para la ejecución del ensayo. Su contribución más significativa es el desarrollo de un algoritmo que permite unificar la interpretación de los resultados. El mismo es de gran interés ya que, permite un análisis objetivo e independiente de la persona que ejecuta el ensayo.

Este algoritmo funciona caracterizando la diferencia entre ambas curvas por medio de un parámetro denominado "factor relativo R", que se detalla a continuación.

Asumiendo que tenemos dos funciones de transferencia X e Y definidas por una sucesión de N puntos. $X(k)$, $Y(k)$, $k=0,1,\dots,N-1$ y $X(k)$ e $Y(k)$ son reales, el factor relativo R puede ser calculado con el procedimiento indicado a continuación.

1) Se calcula la varianza estándar de las dos sucesiones:

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad ; \quad D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

2) Se calcula la covarianza:

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right] \cdot \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

3) Se calcula el factor de covarianza normalizado:

$$LR_{xy} = C_{xy} / \sqrt{D_x \cdot D_y} \quad \text{Ecuación 11}$$

4) Se obtiene el factor relativo R con la siguiente función definida a trozos:

$$R = \begin{cases} 10 & \text{si } 1 - LR_{xy} < 10^{-10} \\ -\log_{10} \cdot (1 - LR_{xy}) & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \text{Ecuación 12}$$

Una vez obtenido este valor, se utiliza la Tabla 2 para conocer el estado del transformador.

Tabla 2: "Relación entre factores relativos y el nivel de deformación en devanados".

Nivel de deformación	Factor relativo R
Deformación severa	$R_{LF} < 0.6$
Deformación evidente	$0.6 \leq R_{LF} < 1.0$ o $R_{MF} < 0.6$
Deformación leve	$1.0 \leq R_{LF} < 2.0$ o $0.6 < R_{MF} < 1.0$
Devanado sano	$R_{LF} \geq 2.0, R_{MF} \geq 1.0$ y $R_{HF} \geq 0.6$

Nota: R_{LF} representa el factor R en la banda de bajas frecuencias (1 kHz - 100 kHz).
 R_{MF} representa el factor R en la banda de frecuencias medias (100 kHz - 600 kHz).
 R_{HF} representa el factor R en la banda de altas frecuencias (600 kHz - 1000 kHz).

Los intervalos de frecuencia donde se utiliza este análisis están definidos en (4) y son los que se expusieron en la Tabla 2.

En la Figura 37 se presenta un ejemplo del uso del factor de relación R propuesto por la norma de la República Popular China. La comparación se hace entre dos transformadores hermanos (es decir, iguales constructivamente) donde uno se encuentra en su estado sano y el otro fue dañado por un cortocircuito. Los resultados presentados dieron una pequeña distorsión en la zona de frecuencias entre 1 y 100 kHz. Nótese que el valor de $R_{LF} = 1$, hallándose en el límite de deformación evidente.

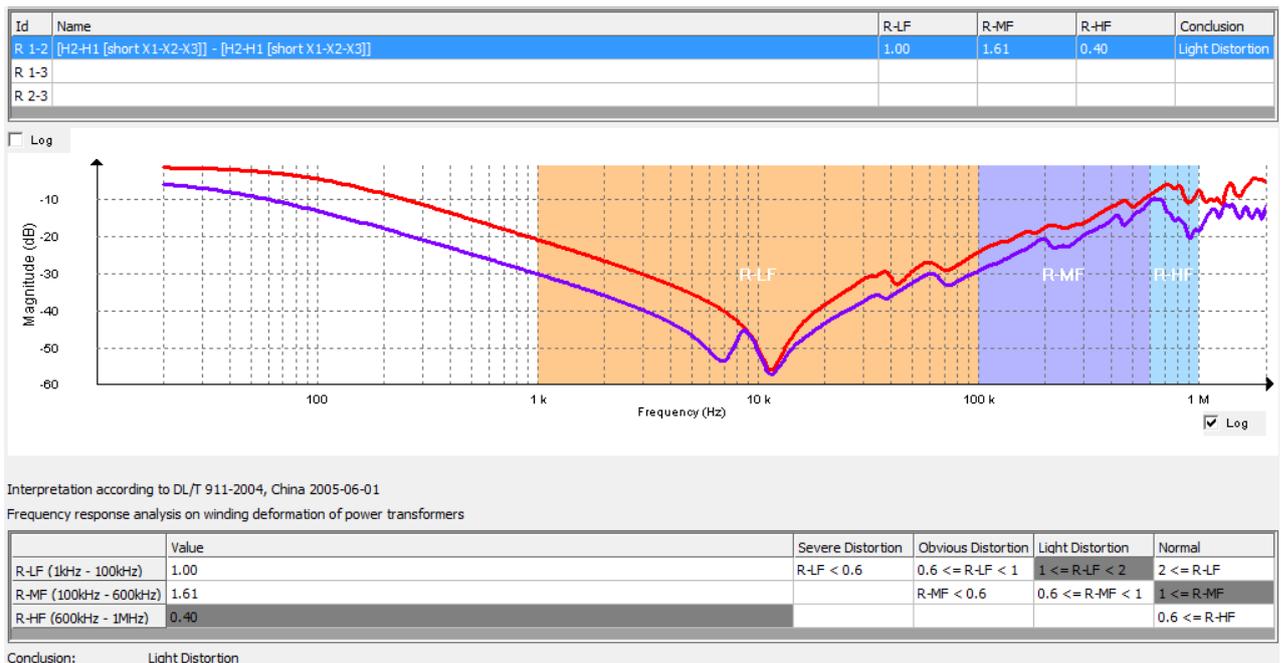


Figura 37: "Ejemplo de análisis de acuerdo al factor relativo R".

4.5 Technical Brochure N° 342: Mechanical-Condition Assessment of Transformer windings using frequency response analysis (FRA).

Este es en la actualidad el documento técnico más importante en lo que respecta a las pruebas de FRA. Es una buena guía de referencia acerca de los fundamentos teóricos, donde se presentan también antecedentes de ensayos y respuestas representativas de las distintas configuraciones de prueba. Si bien este documento no es una norma, ha servido como referencia de la norma IEC presentada en 4.2.

En este informe técnico se hacen recomendaciones acerca de las buenas prácticas de ensayo, tales como los requisitos del equipo de prueba, los cables de conexión, el formato de datos, las frecuencias utilizables, etc.

Si bien se presentan algunos ejemplos de interpretación de las curvas, el documento no propone una metodología sistemática para analizar los resultados. En la actualidad hay un comité de estudio de CIGRÉ (el Working Group A2.53) dedicado a mejorar estas técnicas por medio de algoritmos de interpretación.

Capítulo 5

Modos de falla

En este capítulo se introducen los principales modos de falla que afectan a los transformadores según la guía de interpretación de IEEE C57.149. (1) Se presentan en forma tabulada las pautas de interpretación para cada intervalo de frecuencias.

5.1 Modos de falla

En el punto 4.3 del trabajo se presentaron los modos de falla propuestos por la norma IEEE (1). A continuación se vuelven a mencionar, resaltando aquellos que se han simulado en el modelo.

- Deformación radial de bobinados.
- Elongación axial de bobinados (“Telescoping”).
- **Desplazamiento del bobinado sin deformación.**
- **Defectos en el núcleo.**
- Resistencia de contactos.
- **Cortocircuitos entre espiras.**
- **Devanados a circuito abierto.**
- Devanados flojos a causa del transporte.
- **Magnetización residual.**
- Blindajes flotantes.

La guía de interpretación de los resultados es propuesta sólo para las configuraciones de admitancia de circuito abierto y admitancia de cortocircuito. En la misma se presentan de manera aproximada los cambios que produce cada modo de falla en los distintos intervalos de frecuencia. De manera aproximada porque la influencia de las deformaciones afectará de manera distinta según el tipo y diseño del transformador.

Los rangos de frecuencia para los modos de falla que aparecen en las tablas a continuación son aproximados y pueden existir algunas superposiciones entre los mismos.

5.1.1 Deformación radial de bobinados

Consiste en el cambio de la geometría radial de los devanados a causa de fuerzas de compresión hacia el centro. Estas fuerzas afectan al devanado en toda su longitud y están principalmente concentradas en los bobinados interiores.

La deformación radial de los bobinados afecta a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 3: "Variaciones características de la deformación radial de los bobinados".

Rango de frecuencias	Deformación radial Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 10 kHz	<p>YCA Esta región no se ve afectada ante deformación radial de los bobinados.</p> <p>YCC Resulta en un aumento de la impedancia. La curva de FRA en la fase afectada se atenúa en la región inductiva.</p>
5 kHz – 100 kHz	<p>YCA - YCC Pueden aparecer desplazamientos o producirse nuevas resonancias dependiendo de la gravedad de la deformación. Sin embargo estos cambios son pequeños y difíciles de identificar. Las variaciones serán mayores en el devanado afectado, pero aún es posible que los efectos se transfieran al resto de los devanados.</p>
50 kHz – 1 MHz	<p>YCA - YCC La deformación radial de los devanados es más marcada en este rango. Pueden aparecer desplazamientos o producirse nuevas resonancias, dependiendo de la gravedad de la deformación. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero es posible que los efectos se transfieran al resto de los devanados.</p>
> 1 MHz	<p>YCA - YCC Esta región generalmente no se ve afectada. Sin embargo, deformaciones muy severas pueden extenderse hasta este intervalo.</p>

5.1.2 Elongación axial de bobinados (“Telescoping”)

Involucra dos tipos de cambios geométricos del bobinado. Se produce una elongación en la dirección axial y esta a su vez provoca una disminución del radio que comprime al bobinado. Las variaciones inducidas por este tipo de fallas son complejas y pueden conducir a múltiples resonancias que se desplazan a través de un amplio rango de frecuencias.

La deformación axial de los bobinados afecta a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 4: "Variaciones características de la deformación axial de los bobinados".

Rango de frecuencias	Deformación axial Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 10 kHz	<p>YCA Esta región no se ve afectada ante deformación axial de los bobinados.</p> <p>YCC Resulta en una variación de la impedancia. La curva de FRA en la fase afectada se modifica respecto a las fases sanas o respecto a las curvas de referencia. Esto ocurre en la región inductiva.</p>
5 kHz – 100 kHz	<p>YCA - YCC La deformación axial de los devanados es más marcada en este rango. Pueden aparecer desplazamientos o producirse nuevas resonancias dependiendo de la gravedad de la deformación. Las variaciones serán mayores en el devanado afectado, pero aún es posible que los efectos se transfieran al resto de los devanados.</p>
50 kHz – 1 MHz	<p>YCA - YCC Pueden aparecer desplazamientos o producirse nuevas resonancias, dependiendo de la gravedad de la deformación. Los cambios serán mayores para el devanado afectado, pero es posible que los efectos se transfieran al resto de los devanados.</p>
> 1 MHz	<p>YCA - YCC La respuesta en este intervalo de frecuencias es impredecible.</p>

5.1.3 Desplazamiento del bobinado sin deformación

Consiste en un cambio en la posición del bobinado pero sin que este sufra deformaciones. Las causas pueden ser muy variadas, esfuerzos por cortocircuitos, golpes por maniobras del transporte, actividad sísmica, etc.

El desplazamiento de los bobinados afecta a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 5: "Variaciones características del desplazamiento del bobinado".

Rango de frecuencias	Desplazamiento del bobinado Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz - 10 kHz	YCA Esta región no se ve afectada ante el movimiento de los bobinados. YCC Esta región no se ve afectada ante el movimiento de los bobinados.
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC El desplazamiento de los devanados es más marcado en este rango. El principal indicador es la aparición de nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC En general este intervalo de frecuencias no se ve afectado. Sin embargo, pueden aparecer desviaciones en las frecuencias de resonancia ante cambios en la capacidad entre el devanado de BT y tierra.
> 1 MHz	YCA - YCC Pueden aparecer variaciones ante cambios en la capacidad entre el devanado de BT y tierra.

5.1.4 Defectos en el núcleo

Dentro de esta clasificación se incluye cualquier tipo de falla que produzca un cambio en el circuito magnético del núcleo. Algunas de ellas son: laminaciones del núcleo cortocircuitadas, múltiples puestas a tierra del mismo, pérdida de puesta a tierra, daños mecánicos, etc.

Los defectos en el núcleo afectan a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 6: "Variaciones características de los defectos del núcleo".

Rango de frecuencias	Defectos en el núcleo Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 10 kHz	<p>YCA Pueden presentarse cambios en la primer resonancia característica de esta configuración. Pequeñas variaciones que puedan aparecer en el resto de la curva deben ser tomadas con precaución ya que pueden ser producto de la magnetización residual. Si la YCA parece que tiene carga (es decir, si tiende a parecerse a la YCC), puede ser indicativo de un defecto en el núcleo.</p> <p>YCC Esta región no se ve afectada ante defectos en el núcleo.</p>
5 kHz – 100 kHz	<p>YCA - YCC Pueden presentarse ligeras variaciones o nuevas resonancias.</p>
50 kHz – 1 MHz	<p>YCA - YCC En general este intervalo de frecuencias no se ve afectado. Sin embargo, si la falla corresponde a un problema de puesta a tierra del núcleo, pueden aparecer variaciones en las resonancias en la zona de altas frecuencias.</p>
> 1 MHz	<p>YCA - YCC Si la falla corresponde a un problema de puesta a tierra del núcleo, pueden aparecer variaciones en las resonancias.</p>

5.1.5 Resistencia de contactos

Aunque no se trata de un modo de falla clásico, puede detectarse la alta resistencia de contactos mediante la prueba de FRA. Puede causar cambios tanto en las frecuencias bajas como en las más altas. La mala resistencia de contacto puede ser causada por conexiones flojas, corrosión, quemaduras, etc.

Las modificaciones de resistencias de contacto afectan a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 7: "Variaciones características del cambio en la resistencia de contactos".

Rango de frecuencias	Resistencia de contactos Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 10 kHz	YCA Esta región no se ve afectada ante el aumento de la resistencia de contacto. YCC La fase afectada se verá ligeramente desplazada.
5 kHz – 100 kHz	YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.
50 kHz – 1 MHz	YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.
> 1 MHz	YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.

5.1.6 Cortocircuitos entre espiras

El cortocircuito entre espiras es el modo de falla más fácilmente detectable mediante la prueba de FRA. Los mismos pueden ocurrir entre espiras contiguas o entre el devanado de AT y el de BT.

Los cortocircuitos entre espiras afectan a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 8: "Variaciones características de un cortocircuito entre espiras".

Rango de frecuencias	Cortocircuito entre espiras Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 10 kHz	<p>YCA La falla de cortocircuito remueve el efecto de la reluctancia del núcleo de los resultados del FRA. La curva tiende a parecerse más a la de YCC. El bobinado afectado presentará el cambio más significativo. En las otras fases también aparecerán cambios pero no tan notorios.</p> <p>YCC La fase afectada se verá ligeramente desplazada.</p>
5 kHz – 100 kHz	<p>YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.</p>
50 kHz – 1 MHz	<p>YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.</p>
> 1 MHz	<p>YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.</p>

5.1.7 Devanados a circuito abierto

Un circuito abierto puede ser causado por conexiones sueltas o espiras que se han quemado a causa de una gran falla térmica. Resultan en impedancias altas en el circuito de medición, por lo que es común una gran disminución de la función de transferencia en un amplio espectro de frecuencias. Para circuitos completamente abiertos, los resultados a menudo se pierden en el nivel de ruido de la medición.

Los devanados a circuito abierto afectan a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 9: "Variaciones características de los devanados a circuito abierto".

Rango de frecuencias	Devanado a circuito abierto Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 10 kHz	YCA Se modifica la primera resonancia característica de esta configuración. YCC La fase afectada se verá ligeramente desplazada.
5 kHz – 100 kHz	YCA - YCC Este es el intervalo más afectado por el devanado a circuito abierto. La aparición de nuevas resonancias significativas es un gran indicador de este modo de falla. También pueden presentarse variaciones en las resonancias ya existentes, afectando en mayor medida a la fase dañada.
50 kHz – 1 MHz	YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.
> 1 MHz	YCA - YCC Pueden haber desplazamientos o producirse nuevas resonancias. Los cambios serán más significativos en la fase dañada.

5.1.8 Devanados flojos a causa del transporte

Esta falla puede ser descripta como una separación gradual de las distancias entre espiras de una misma bobina. Puede producirse por pérdidas de los bloques que comprimen las bobinas, haciendo que las mismas se expandan axialmente. Por lo general esta falla se da luego de maniobras de transporte del transformador.

Los devanados flojos afectan a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 10: "Variaciones características de los devanados flojos".

Rango de frecuencias	Devanado flojo a causa de transporte Considerando que no existen otras fallas en el transformador
20 Hz – 500 kHz	YCA Esta región no se ve modificada.
500 kHz – 2 MHz	YCA Este rango puede presentar algunas variaciones, que crecen a medida que aumenta la frecuencia. Las diferencias serán más significativas en los devanados afectados.
1 MHz – 5 MHz	YCA Este rango puede presentar algunas variaciones, que crecen a medida que aumenta la frecuencia. Las diferencias serán más significativas en los devanados afectados.

5.1.9 Magnetización residual

Aunque no se trata de un defecto, la magnetización residual debe ser identificada, para no ser malinterpretada como una falla en las curvas de FRA. La magnetización residual es la densidad de flujo remanente en el núcleo magnético. Los ensayos de resistencia de devanado, las operaciones de maniobra y los fenómenos geomagnéticos son fuentes de magnetismo residual. El mismo puede ser identificado mediante variaciones en la frecuencia de resonancia principal que existe en la configuración YCA. La desmagnetización debe ser realizada antes del FRA si se quiere evaluar la condición del núcleo.

5.1.10 Blindajes flotantes

Consiste en la pérdida de la puesta a tierra de los blindajes, utilizados en los transformadores de potencia para ecualizar el campo eléctrico y disminuir los gradientes de potencial. Esta falla puede producir defectos en los aislamientos del transformador.

Los blindajes flotantes afectan a las curvas de SFRA de la siguiente manera:

Tabla 11: "Variaciones características de los blindajes flotantes".

Rango de frecuencias	Blindajes flotantes Considerando que no existen otras fallas en el transformador
< 100 kHz	YCA Esta región puede presentar ligeras variaciones.
100 kHz – 500 kHz	YCA Esta región puede presentar variaciones mayores incluyendo cambios en las resonancias.
1 MHz – 3 MHz	YCA En este rango se producen los mayores cambios en las frecuencias de resonancia.

Capítulo 6

Ensayo del transformador modelo y análisis de resultados

Se presenta el transformador utilizado para reproducir los distintos modos de falla y se analizan las respuestas en frecuencia que presenta cada uno. Se realiza una comparación de las respuestas obtenidas con los criterios de interpretación de la norma IEEE C57.149 (1) detallados en el capítulo anterior.

6.1 Transformador modelo

Para obtener parámetros de interpretación de la prueba y compararlos con lo que propone la norma IEEE (1), se utilizó un transformador ideado especialmente para estudiar los distintos modos de falla. Se trata de una unidad de dimensiones similares a un transformador típico de distribución, con un diseño especial que permite reproducir distintos defectos mecánicos. Su aislamiento es de origen celulósico (papel, cartón, madera), pero no se encuentra impregnado de aceite y no tiene cuba.

El esquema de conexión se muestra en la Figura 38 y se detalla en la Tabla 12.

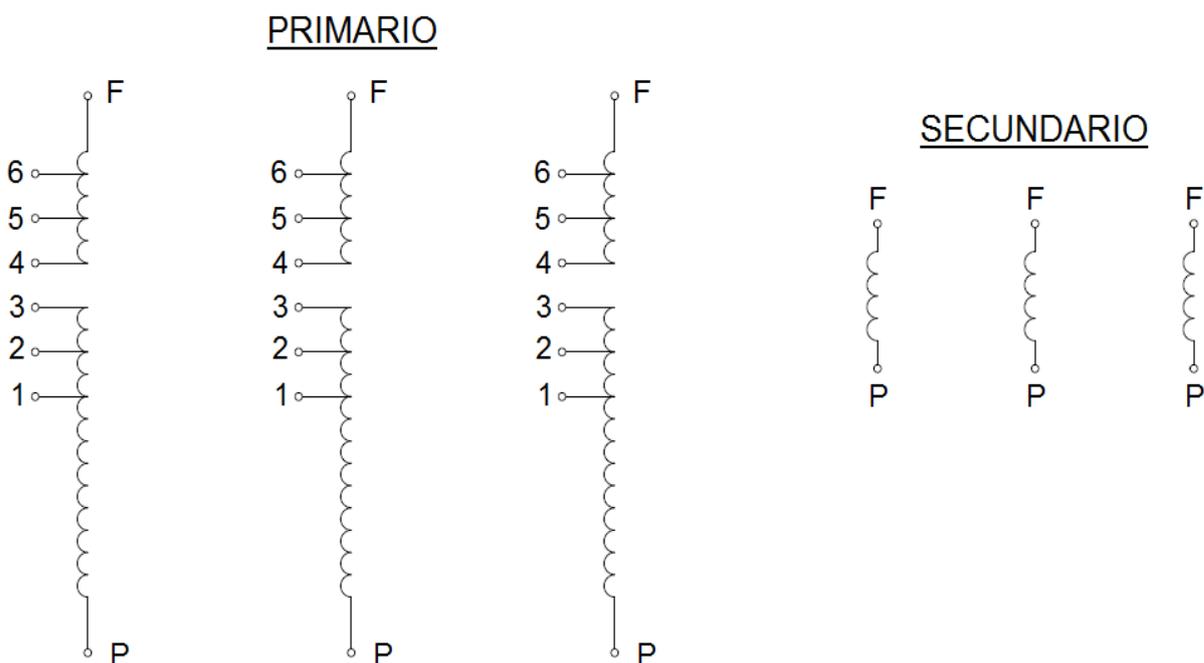


Figura 38: "Esquema de conexión del transformador modelo".

Tabla 12: "Cantidad de espiras y relación de transformación".

Posición conmutador	Unión derivaciones	Espiras primario	Espiras secundario	Relación
5	6 - 1	1576	29	54.34
4	5 - 1	1617	29	55.76
3	2 - 5	1658	29	57.17
2	4 - 2	1699	29	58.59
1	3 - 4	1740	29	60

Derivaciones	Nro. de espiras
F - 6	1
6 - 1	164
1 - P	1575

Se trata de una unidad de 160 kVA, fabricada para ser utilizada con la relación 13.2/0.4 kV. Esta relación no es fija, sino que puede ser modificada cambiando el grupo de conexión del

transformador o utilizando como salida las distintas derivaciones del bobinado (tal como funciona el regulador de tensión).

En la Figura 39 y la Figura 40 se presentan dos imágenes del transformador.



Figura 39: "Vista del lado de AT del transformador".



Figura 40: "Vista del lado de BT del transformador".

Para el desarrollo del trabajo se conectó el transformador en configuración Dyn11 (Figura 41). En la Figura 39 se muestra el lado de AT con el triángulo ya conectado, mientras que el lado de BT se muestra en la Figura 40 aún sin su centro de estrella.

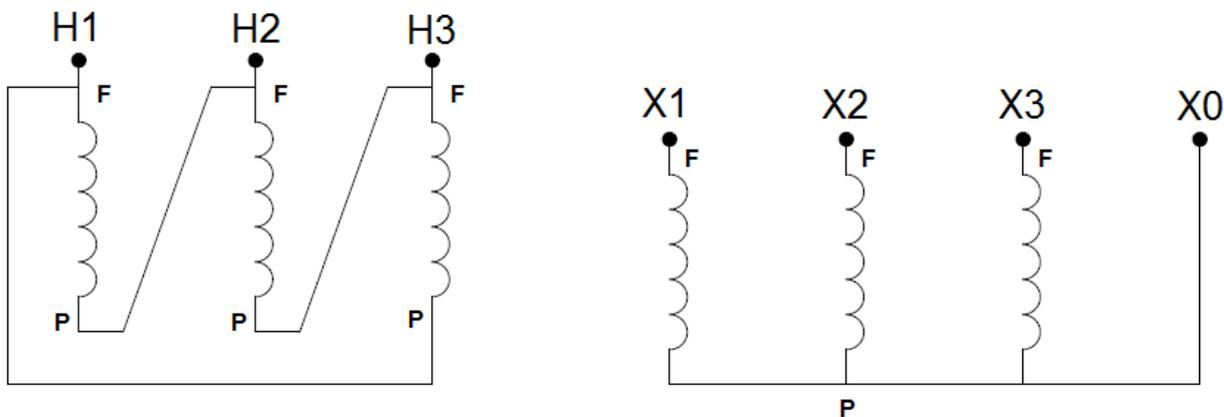


Figura 41: "Grupo de conexión utilizado".

Primero se realizó la prueba de FRA en un estado que se consideró el "estado sano" del transformador, para utilizarlo como referencia. Esta referencia luego fue comparada con las distintas fallas para obtener criterios de interpretación. En el rango de frecuencias medias, se utilizó el análisis de correlación de la norma China como herramienta para la interpretación.

6.2 Cortocircuito entre espiras

6.2.1 Simulación

El cortocircuito entre espiras es fácilmente reproducible en el modelo debido a las derivaciones que posee. En particular, en las curvas relevadas, el cortocircuito se realizó entre el punto F y 6 de la bobina H2-H3. Allí existe una sola espira, tal como se puede ver en la Tabla 12. En la Figura 42 se muestra el cortocircuito de espiras generado a través de un corto externo. La elección de cortocircuitar una única espira no fue arbitraria sino que se realizó en base a una recomendación del fabricante del transformador, ya que se trata de la falla más usual de acuerdo con su experiencia.



Figura 42: "Cortocircuito entre espiras".

6.2.2 Respuestas

6.2.2.1 Admitancia de circuito abierto

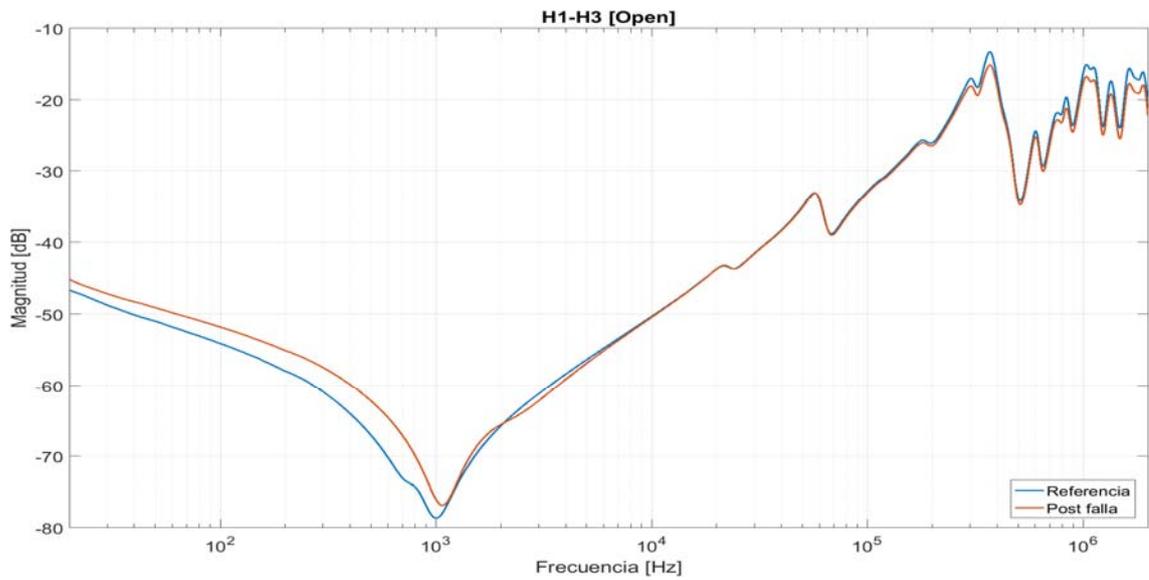


Figura 43: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

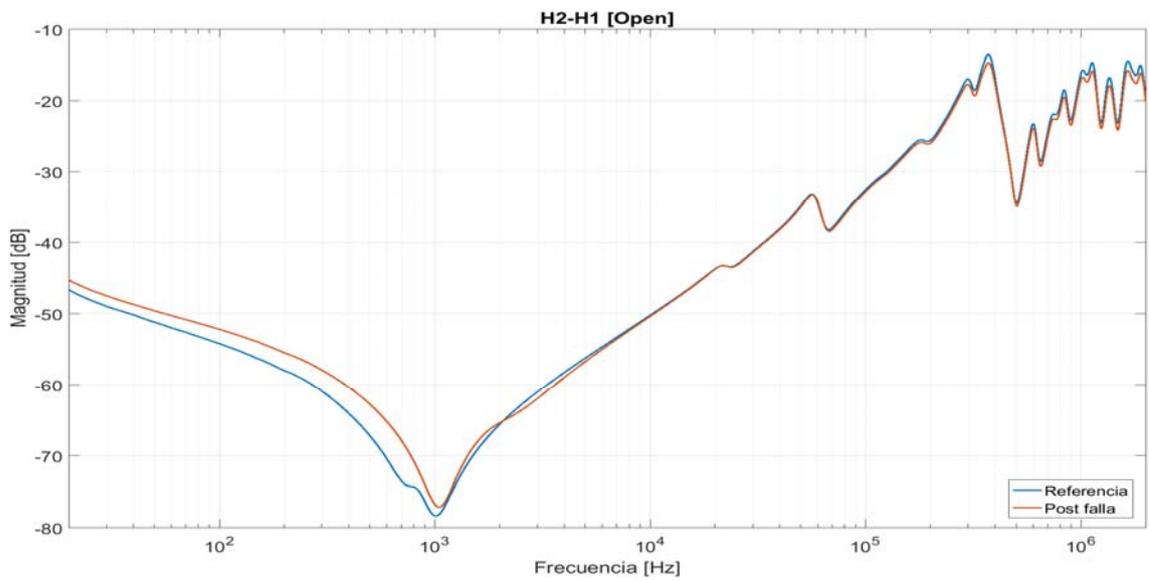


Figura 44: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

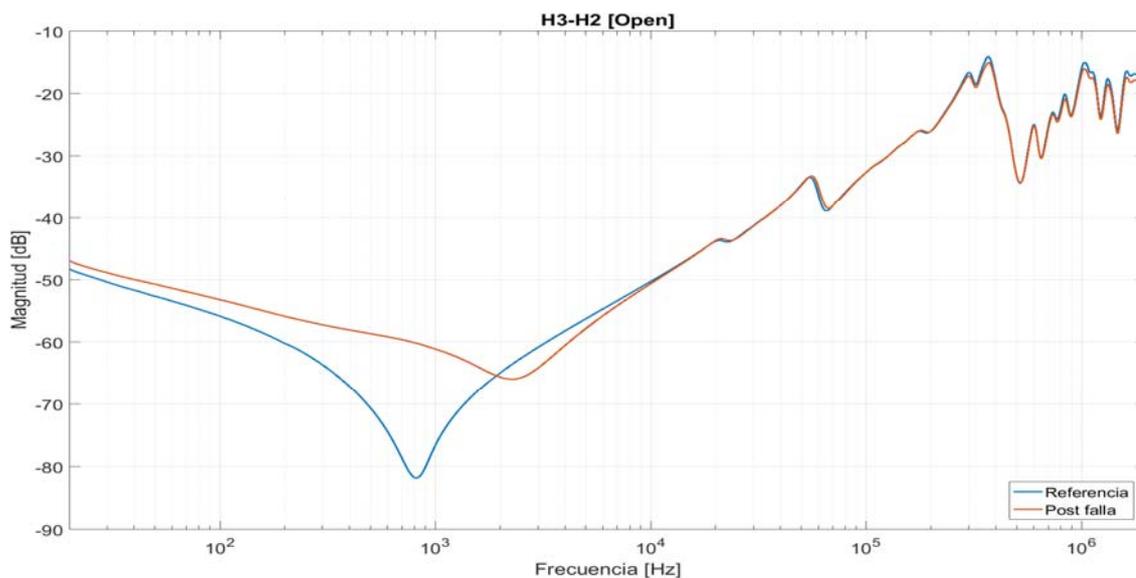


Figura 45: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Se presentaron cambios significativos y desplazamiento de las resonancias en bajas frecuencias, hasta el orden de 10 kHz . Esto es a causa de la modificación de la inductancia de la bobina, provocada por el cortocircuito. Dado que la conexión de AT es triángulo, las variaciones se ven reflejadas en las tres curvas, con una mayor manifestación en la bobina cortocircuitada (Figura 45).

En la zona de frecuencias medias las curvas se mantuvieron prácticamente iguales. Sin embargo, al aplicar el análisis de correlación de la norma DL/T 911 (4) se obtuvo como resultado "distorsión leve" en la bobina que tenía el cortocircuito.

En altas frecuencias, donde las respuestas son dominadas por los efectos de las resistencias de contacto, aparecieron ligeras disminuciones en magnitud. Esto tiene sentido, ya que la espira en cuestión estaba ubicada en un extremo del devanado y el cortocircuito puede considerarse como una variación de la resistencia de contacto.

6.2.2.2 Admitancia de cortocircuito

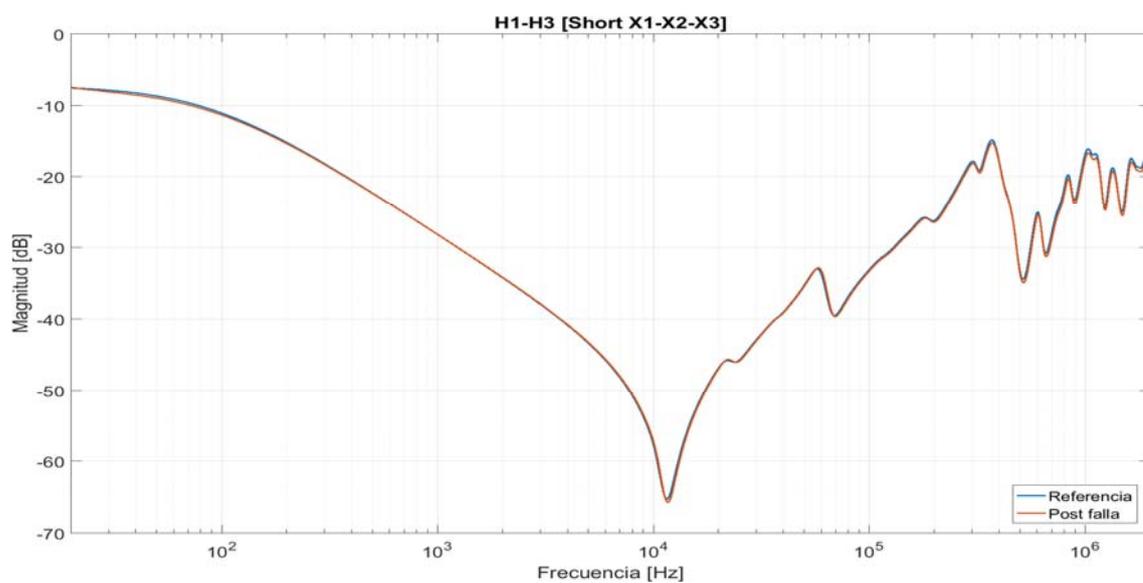


Figura 46: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

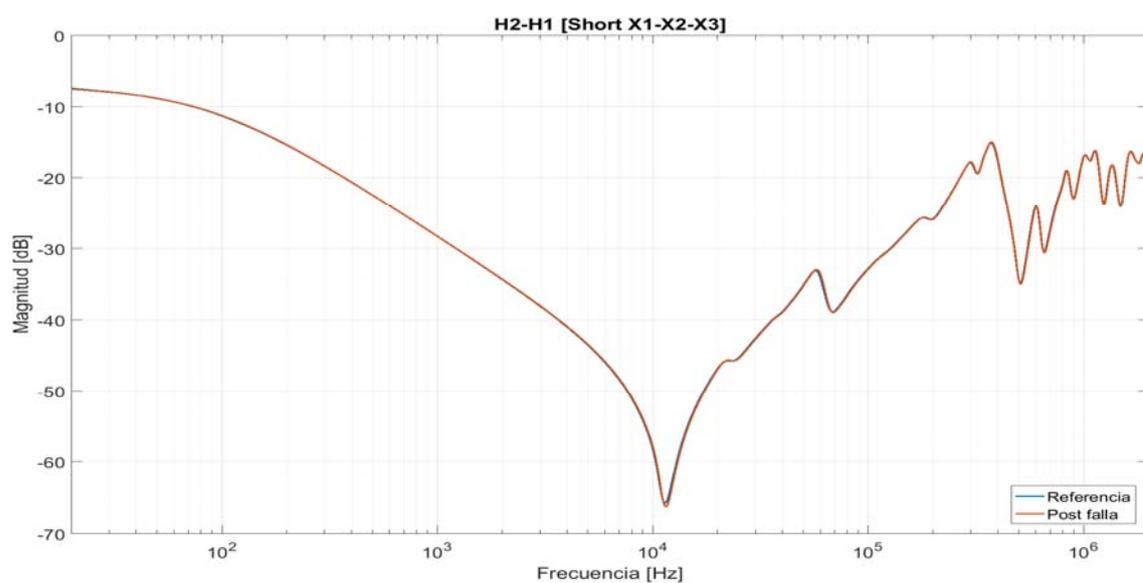


Figura 47: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

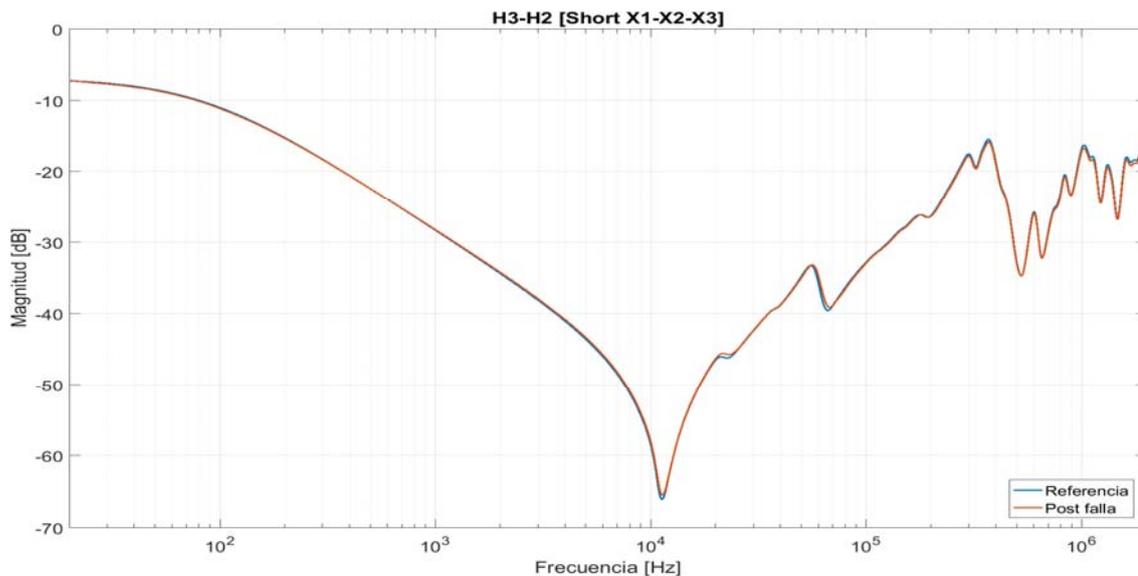


Figura 48: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

En esta configuración no se presentaron cambios significativos. Esto era esperable ya que el cortocircuito en una espira modifica muy poco la reactancia de dispersión y la resistencia del bobinado.

6.2.2.3 Interdevanado capacitivo

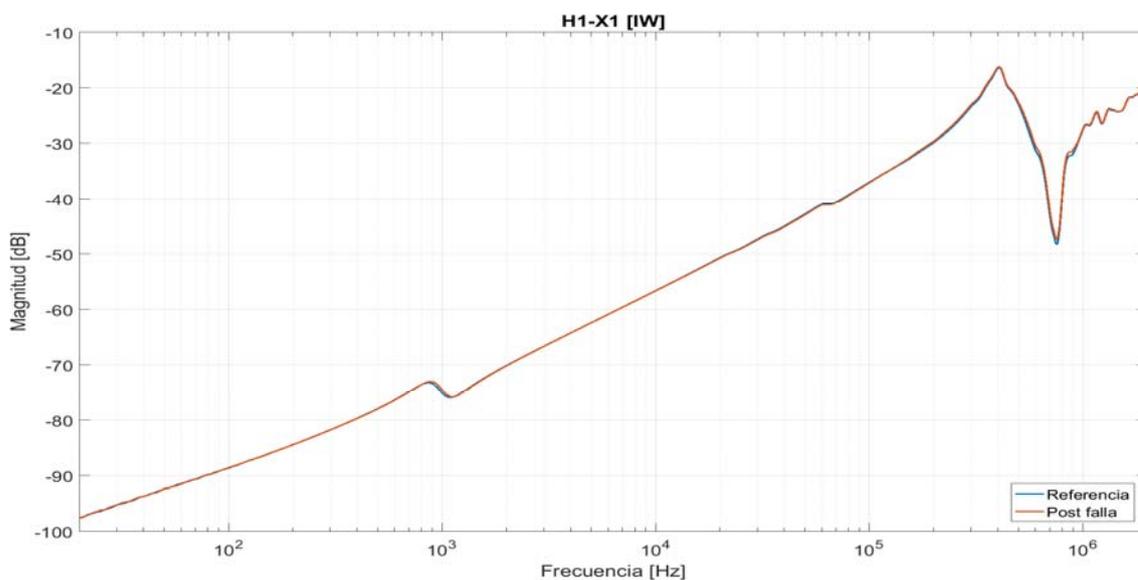


Figura 49: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

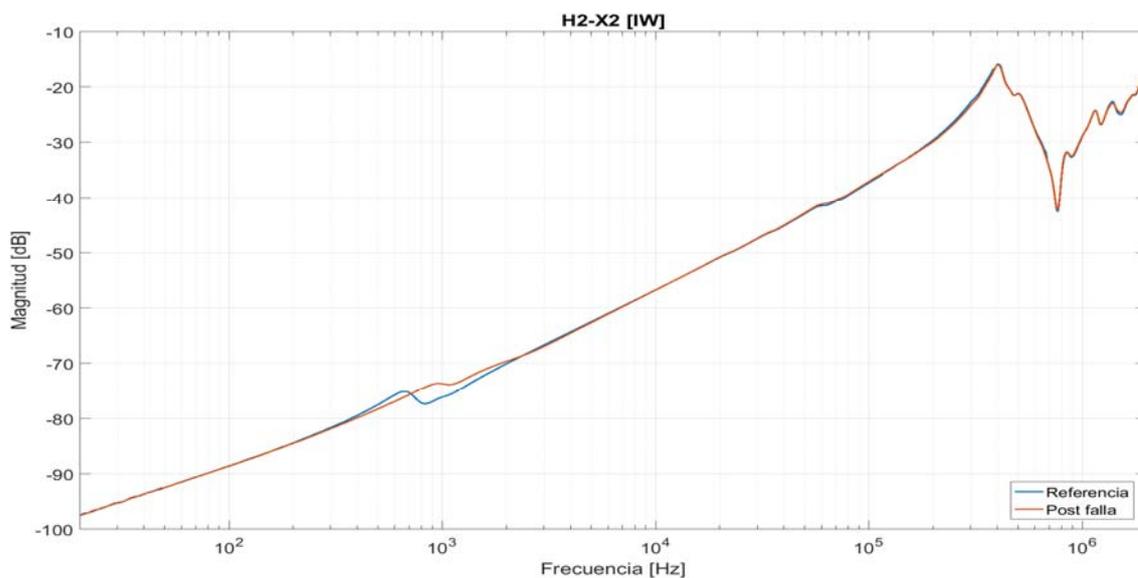


Figura 50: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

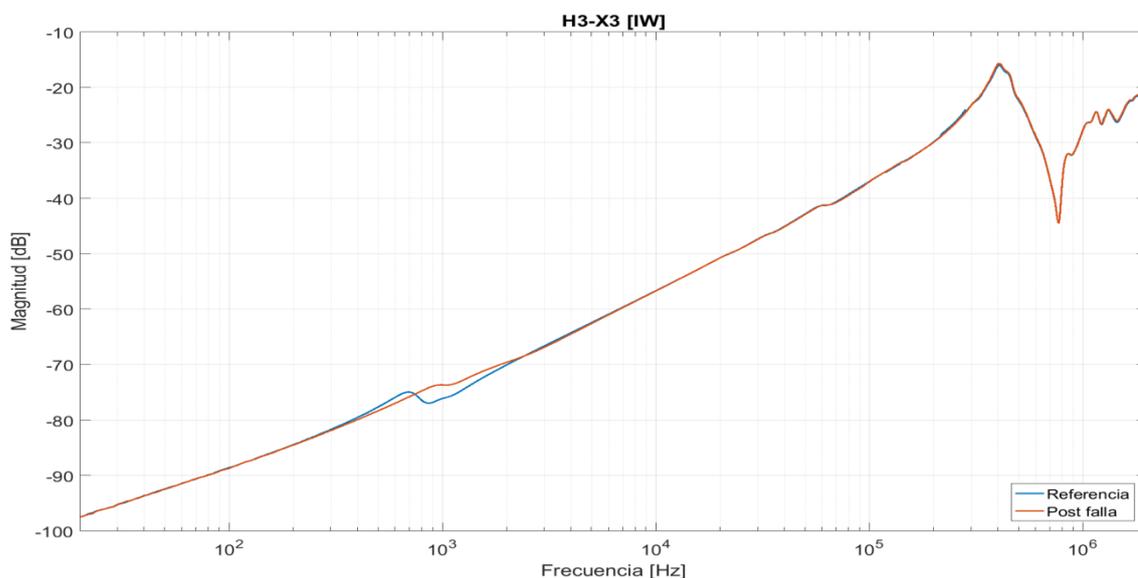


Figura 51: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

En esta configuración el único cambio significativo se manifestó en la resonancia característica del interdevanado capacitivo. Esta modificación probablemente se corresponda con el cambio de la inductancia de la bobina mientras que la capacidad interdevanado mantiene su valor prácticamente constante. Este comportamiento era de esperarse solo en la fase H2-X2 donde se hizo el cortocircuito, sin embargo, también se vio reflejado en la fase H3-X3.

6.2.2.4 Interdevanado inductivo

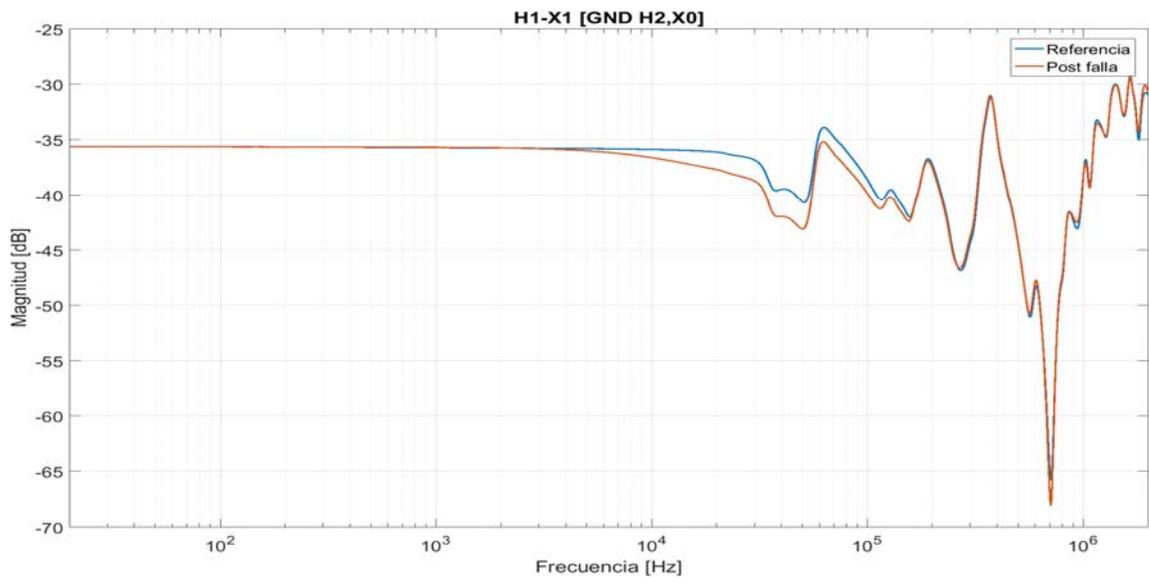


Figura 52: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

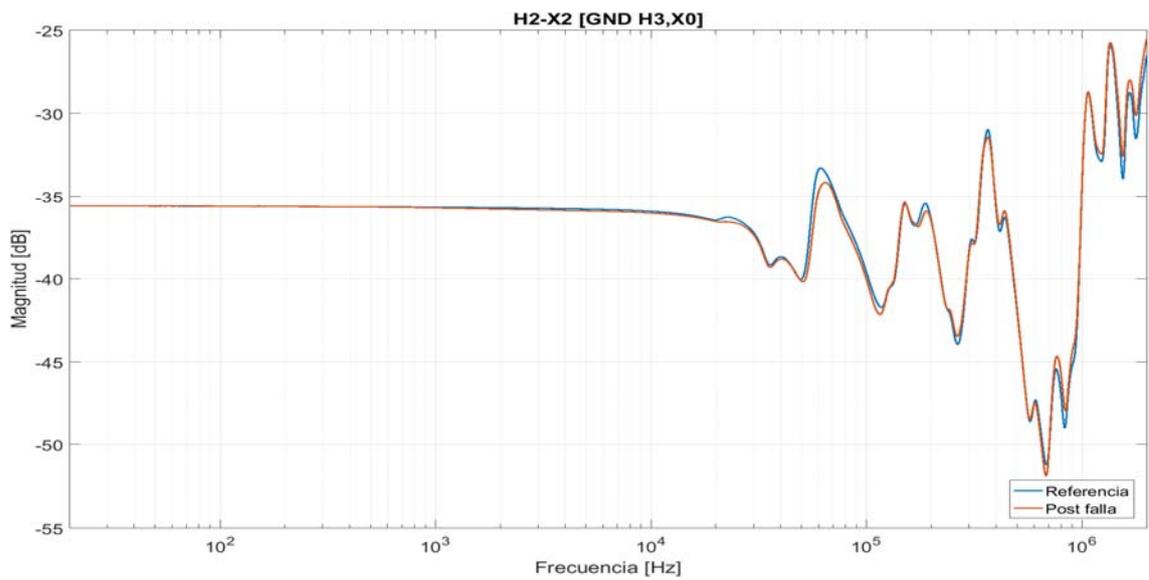


Figura 53: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

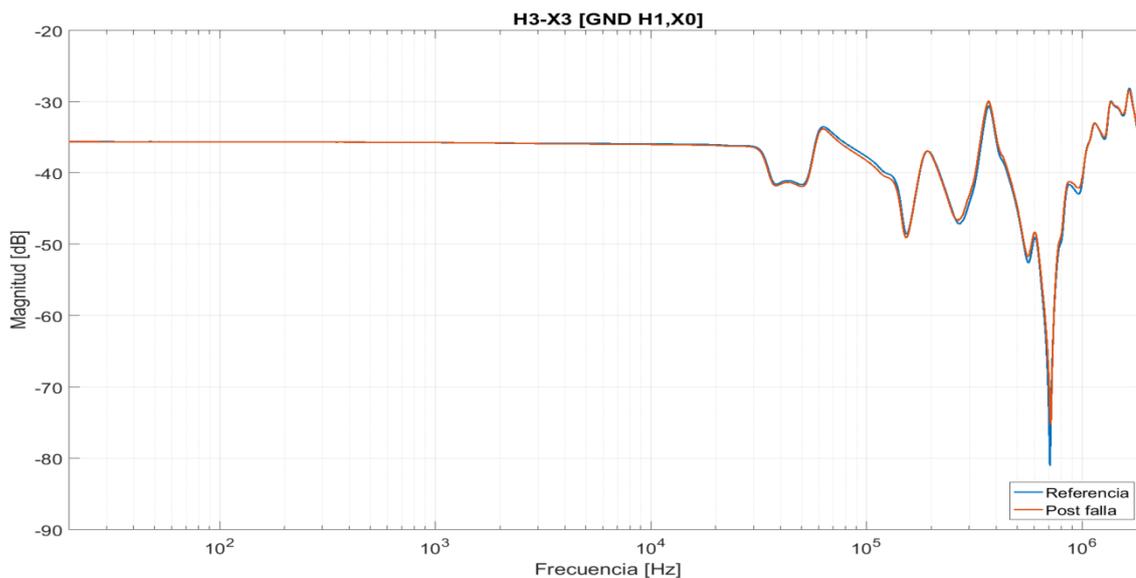


Figura 54: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

En bajas frecuencias, donde la respuesta está dominada por la relación de transformación, no se advirtieron cambios significativos, incluso en la fase donde se cortocircuitó una espira, su efecto fue despreciable. En la región de frecuencias medias y altas, las resonancias de esta configuración no son analizadas ya que el objetivo principal de la prueba es verificar la relación de transformación (IEEE (1)).

6.2.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Cortocircuitos entre espiras". Fue analizada con detalle en la Tabla 8, y en la Tabla 13 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 13: "Comparación del cortocircuito entre espiras".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
20 Hz - 10 kHz	YCA	SI
	YCC	NO
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC	SI
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC	SI
> 1 MHz	YCA - YCC	SI

6.3 Devanado abierto

6.3.1 Simulación

El circuito abierto en un devanado es reproducible en el prototipo abriendo las derivaciones 3 y 4 tal como se muestra en el esquema de la Figura 38. En las curvas relevadas, la apertura del bobinado se realizó entre el punto 3 y 4 de la bobina H2-H3. En la Figura 55 se ven las derivaciones abiertas.



Figura 55: "Devanado abierto".

6.3.2 Respuestas

6.3.2.1 Admitancia de circuito abierto

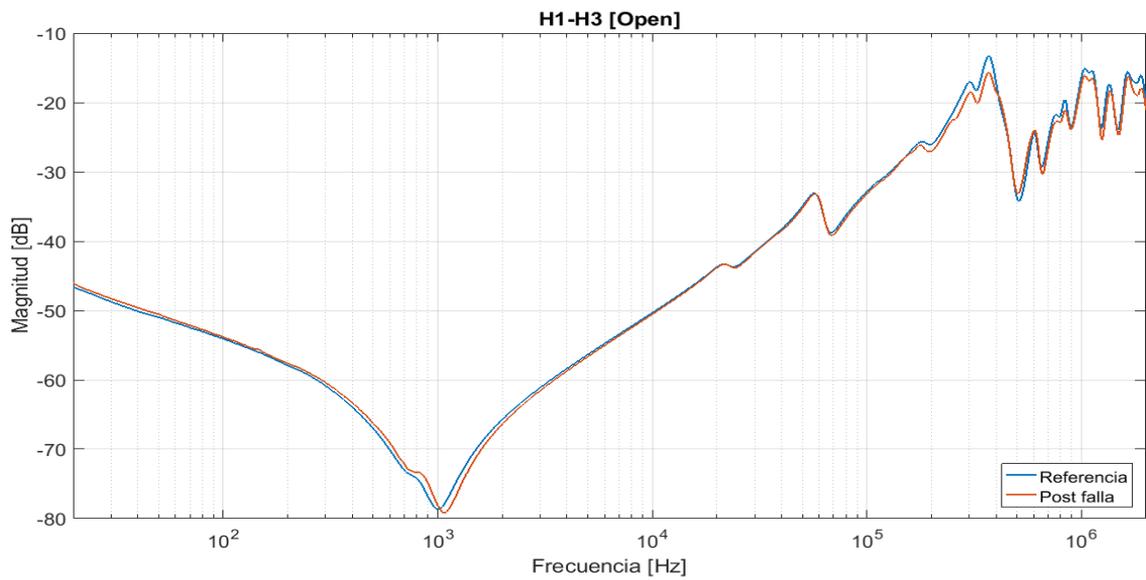


Figura 56: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

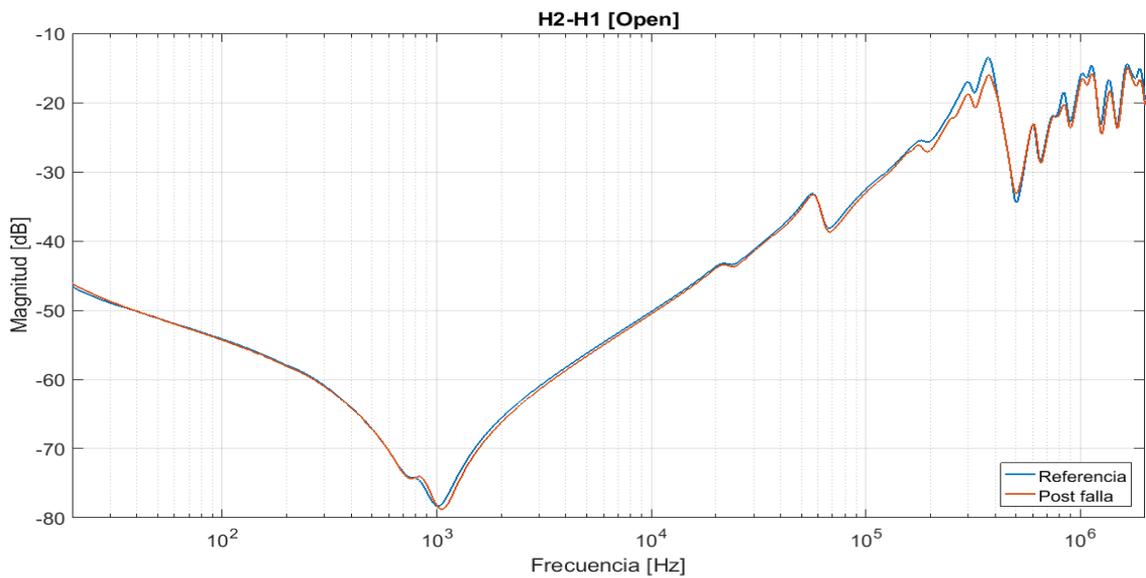


Figura 57: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

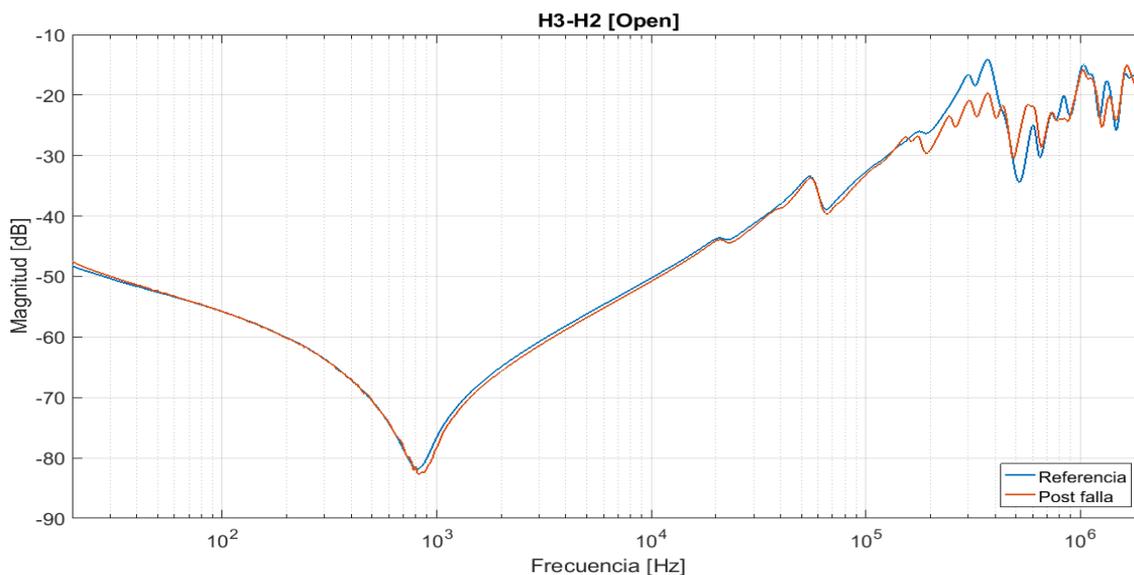


Figura 58: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Esta configuración presentó cambios ligeros en todo el espectro de frecuencias, principalmente en frecuencias medias donde la respuesta está dominada por la geometría y la continuidad de los devanados. En H3-H2 (Figura 58), donde está la bobina en falla, el análisis de la norma DL/T 911 (4) resultó en leve distorsión. También surgieron variaciones en altas frecuencias, producto de la apertura del bobinado (ver Figura 36 - Región de influencia de contactos).

6.3.2.2 Admitancia de cortocircuito

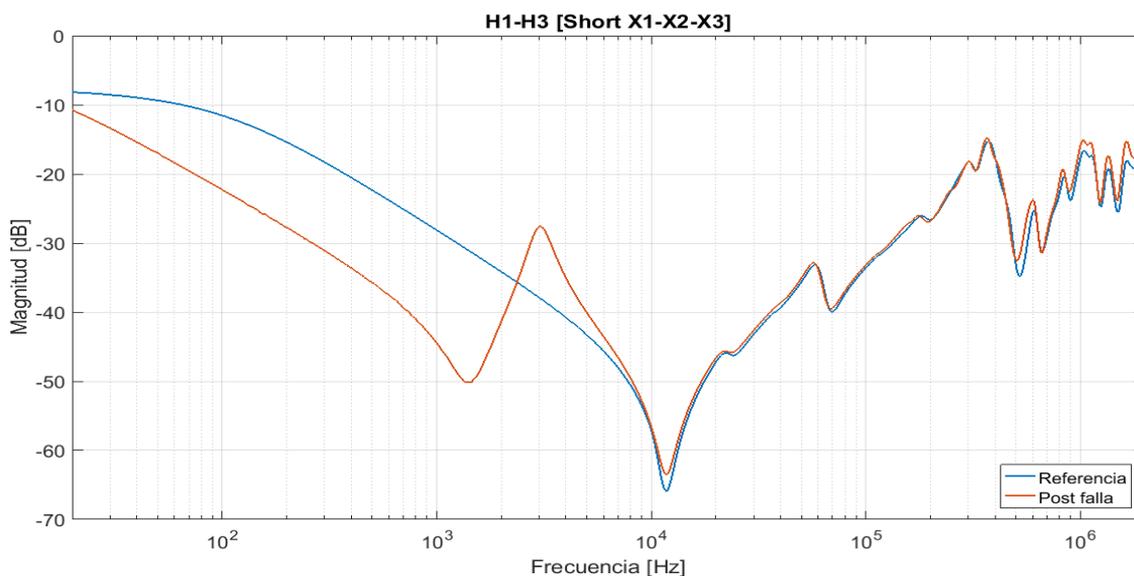


Figura 59: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

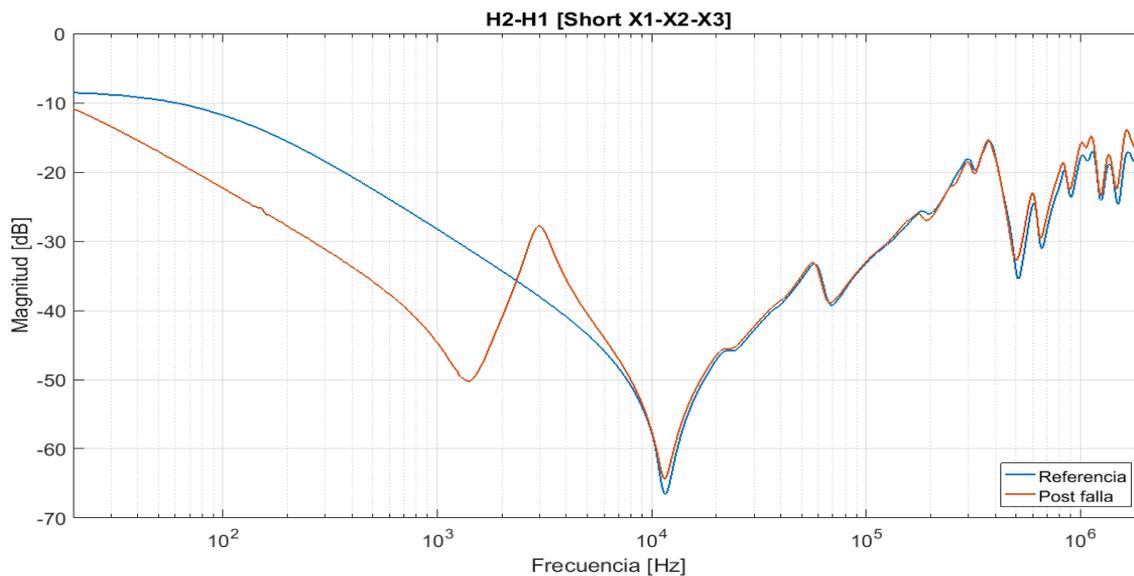


Figura 60: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

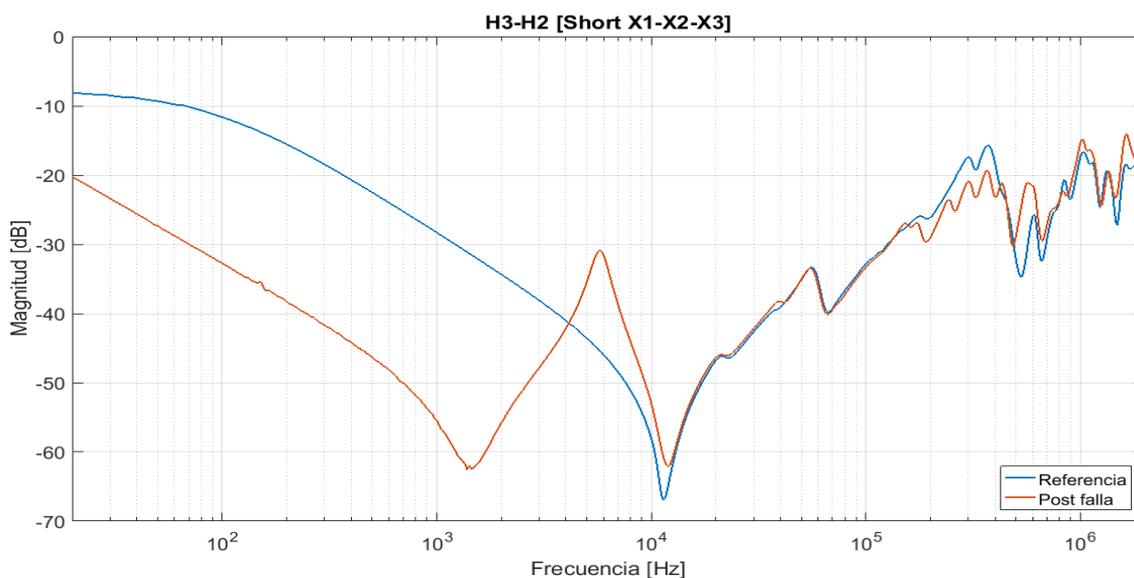


Figura 61: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

En esta configuración es donde se manifiestan las variaciones más significativas, principalmente en bajas frecuencias. Esto es producto de un aumento de resistencia y de inductancia al abrirse el bobinado. Los cambios se ven en las tres curvas por tratarse de un primario conectado en triángulo, pero son más significativos en la bobina en falla (Figura 61). En frecuencias medias y altas, los comportamientos son similares a la prueba de admitancia de circuito abierto.

6.3.2.3 Interdevanado capacitivo

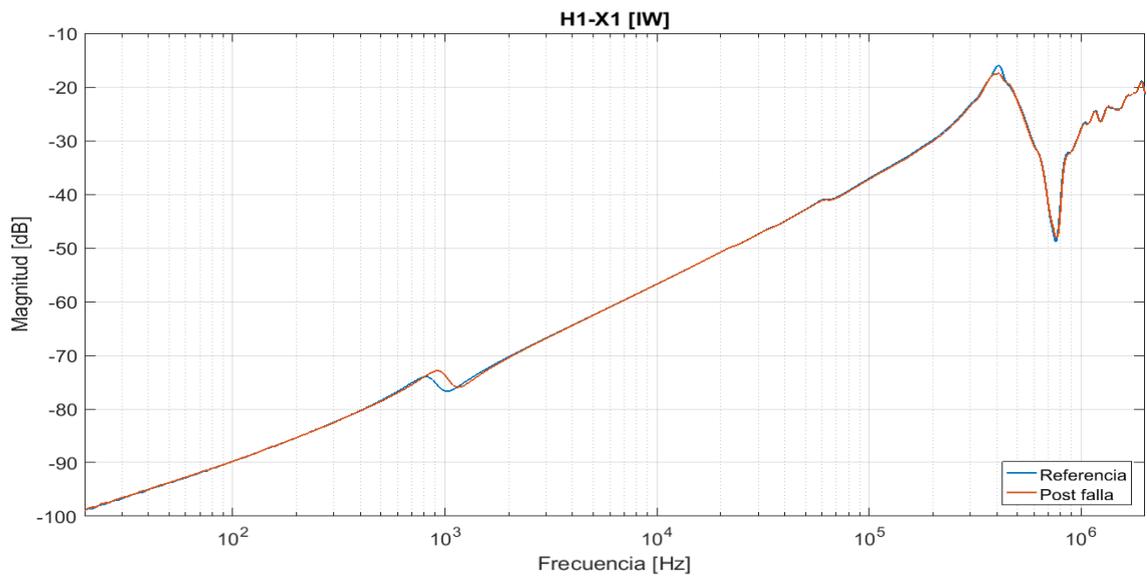


Figura 62: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

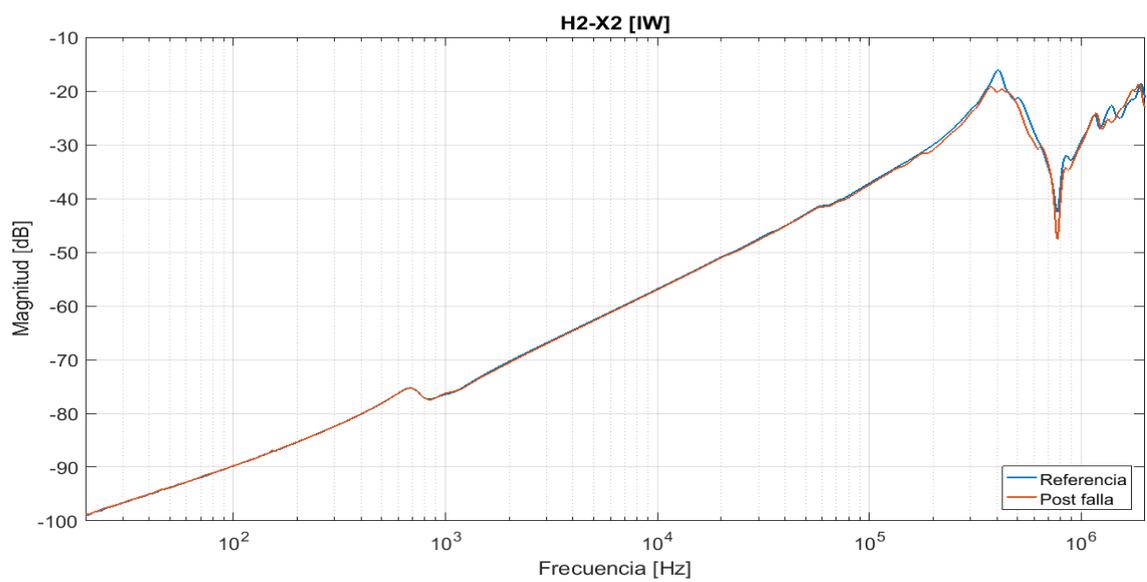


Figura 63: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

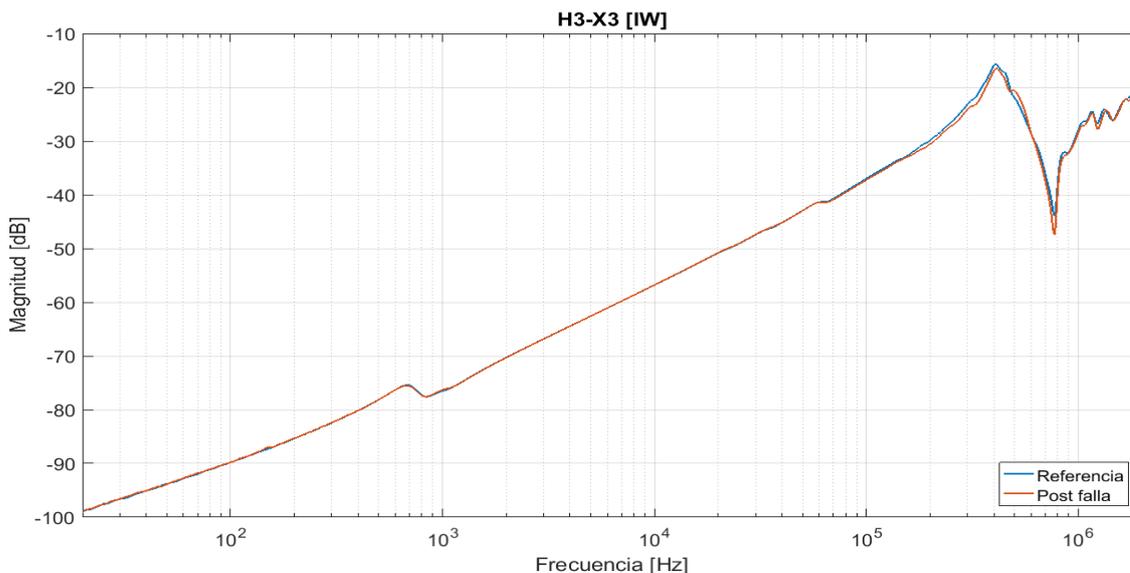


Figura 64: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

En esta configuración el único cambio significativo apareció en la primera resonancia característica y sólo en la fase H1. H2 y H3, que son los terminales donde se encuentra el devanado abierto no sufrieron cambios significativos. En altas frecuencias la situación fue la contraria, la fase H1 prácticamente no se modificó, mientras que H2 y H3 se desplazaron ligeramente hacia abajo y sufrieron algunas modificaciones en sus resonancias.

6.3.2.4 Interdevanado inductivo

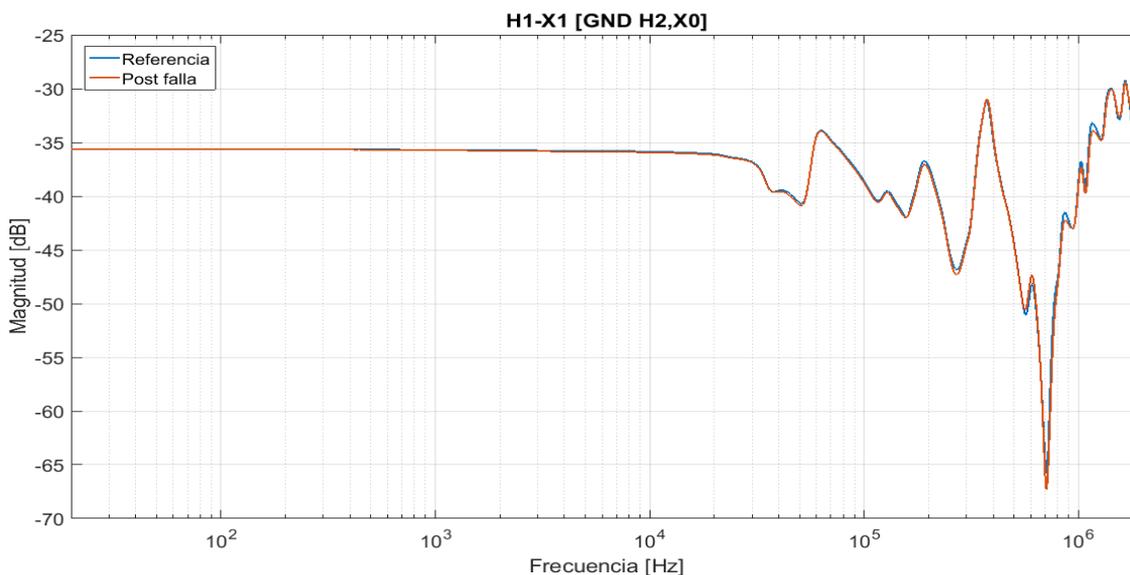


Figura 65: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

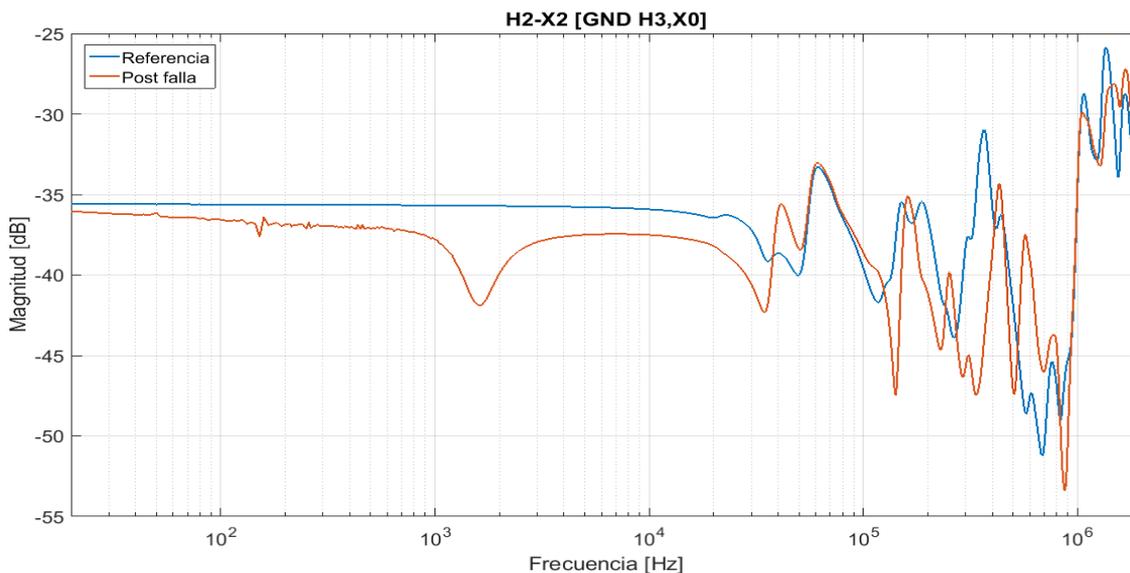


Figura 66: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

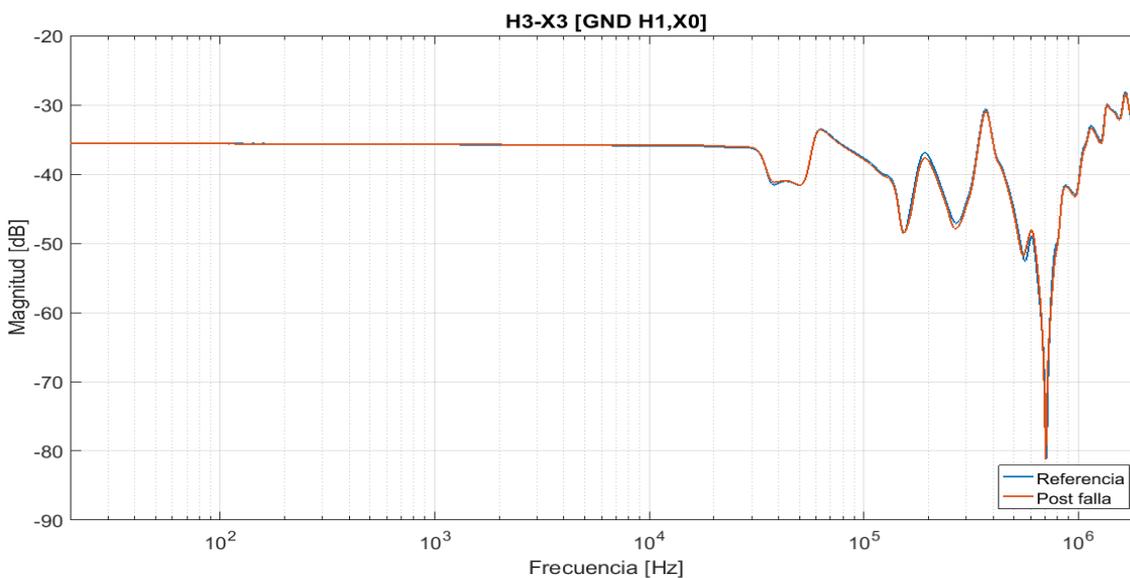


Figura 67: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

Como era de esperarse, la única configuración que se distorsionó fue la de la fase H2, ya que al abrirse el circuito, cambió la relación de transformación en la bobina.

6.3.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Devanados a circuito abierto". Fue analizada con detalle en la Tabla 9, y en la Tabla 14 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 14: "Comparación del devanado a circuito abierto".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
20 Hz - 10 kHz	YCA	SI
	YCC	SI
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC	SI
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC	SI
> 1 MHz	YCA - YCC	SI

6.4 Cambio de la reluctancia del núcleo

6.4.1 Simulación

El cambio de la reluctancia del núcleo se realizó aumentando la sección del material ferromagnético. Para esto se colocó una pieza extra de hierro en la parte superior del transformador, la misma se puede apreciar en la Figura 68 y puede ser comparada con la Figura 40 donde se ve el estado sano.



Figura 68: "Modificación de la reluctancia del núcleo".

6.4.2 Respuestas

6.4.2.1 Admitancia de circuito abierto

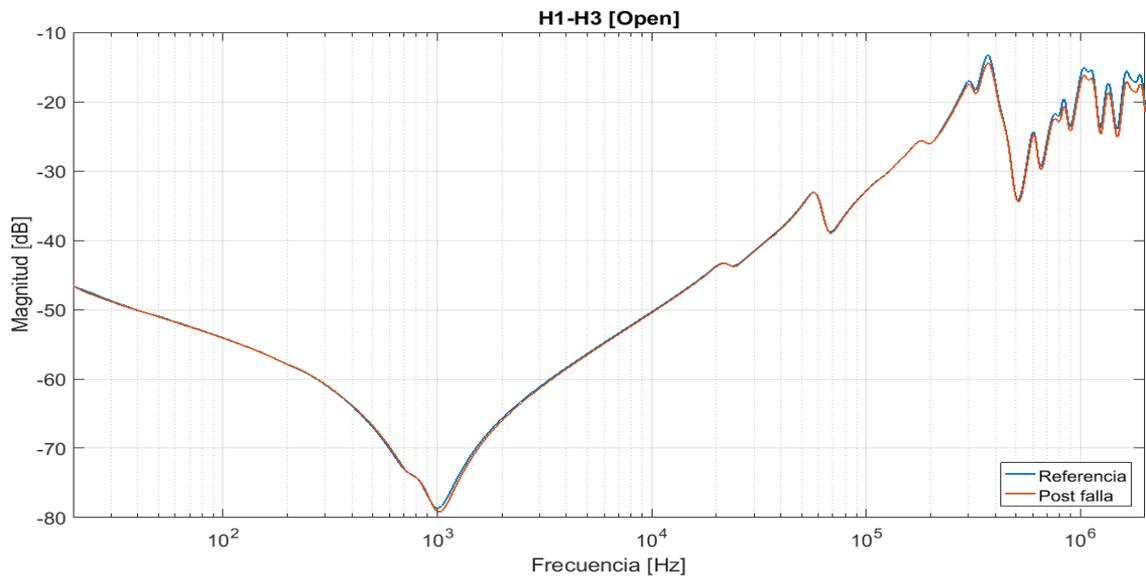


Figura 69: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

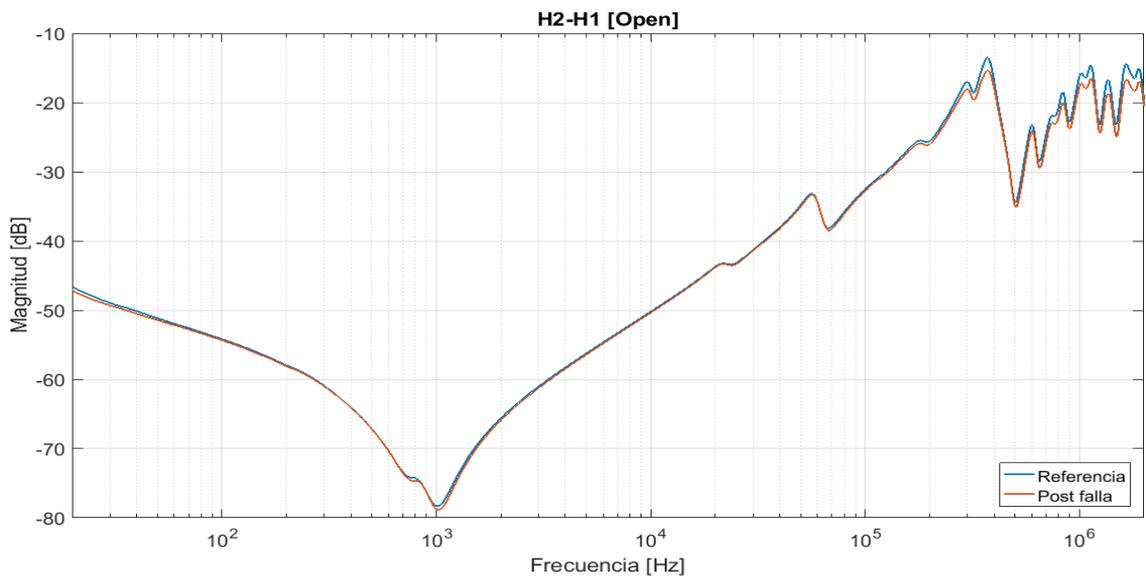


Figura 70: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

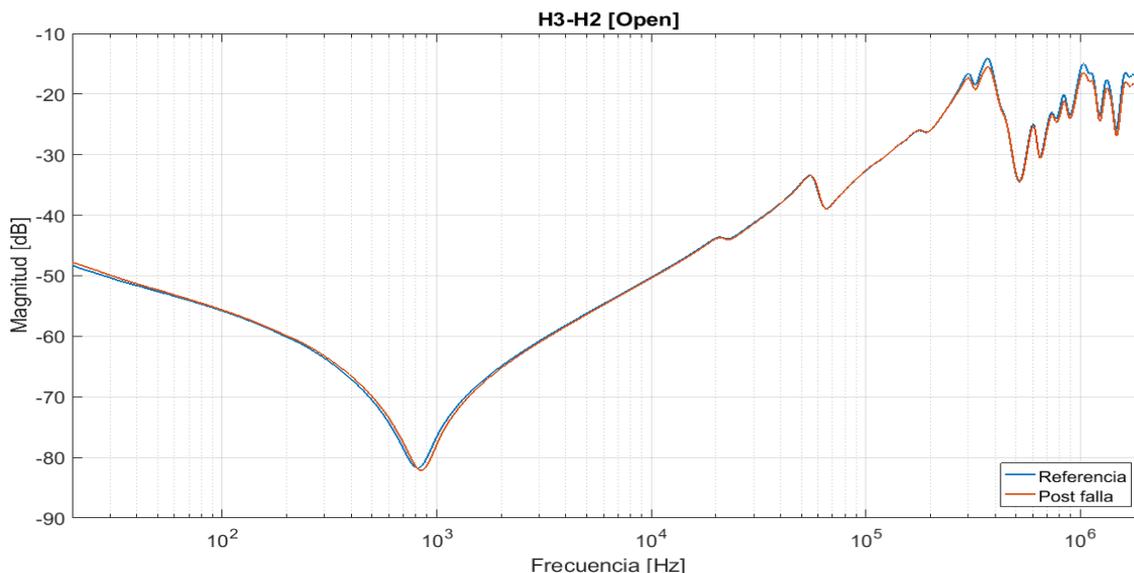


Figura 71: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Las curvas se mantuvieron prácticamente inalteradas en todo el espectro de frecuencias. La resonancia principal ubicada cerca de 1 kHz sufrió un pequeño desplazamiento hacia mayores frecuencias y una leve disminución de magnitud. Esto es producto de un aumento de la inductancia de la bobina a causa de la disminución en la reluctancia.

En frecuencias medias se ve a simple vista que no hay cambios significativos, hecho que se verificó por medio del análisis de la norma DL/T 911. (4) Se presentaron disminuciones en magnitud en la región de altas frecuencias.

6.4.2.2 Admitancia de cortocircuito

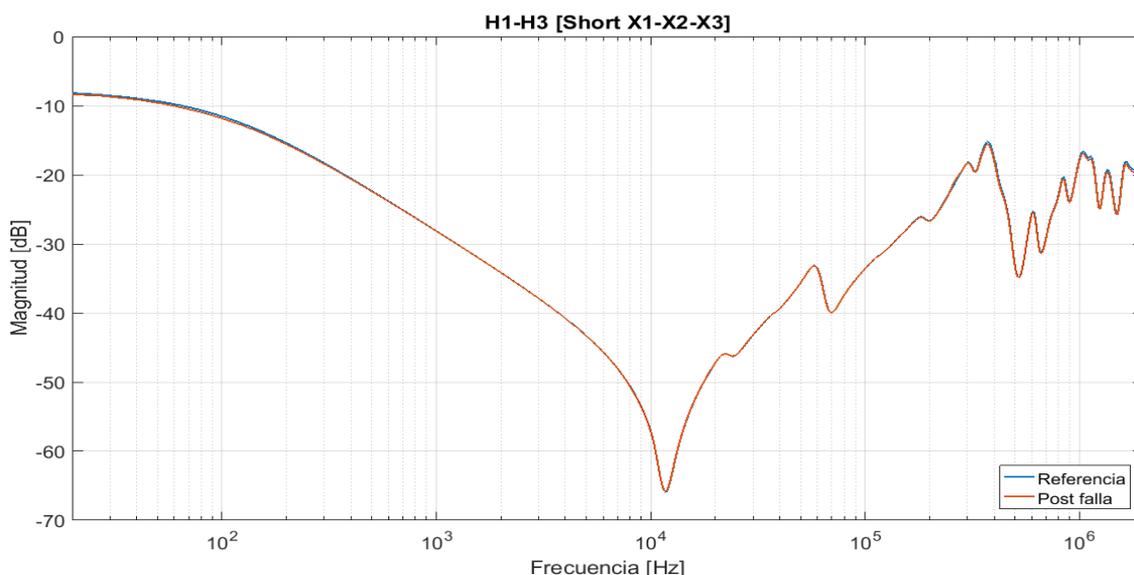


Figura 72: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

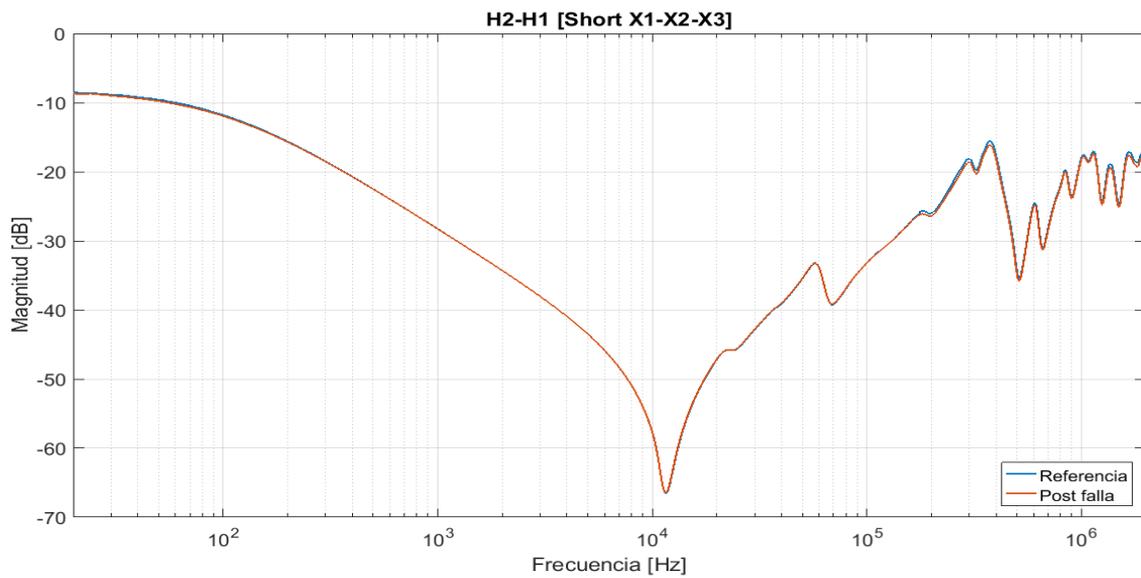


Figura 73: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

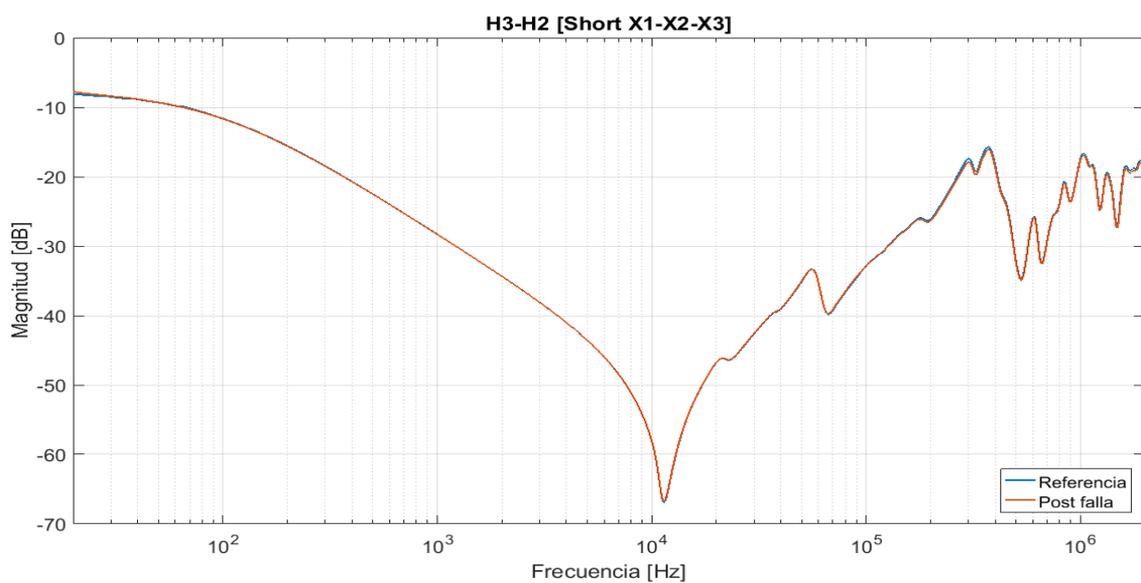


Figura 74: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

Para la configuración de YCC las curvas permanecieron inalteradas en todo el espectro de frecuencias.

6.4.2.3 Interdevanado capacitivo

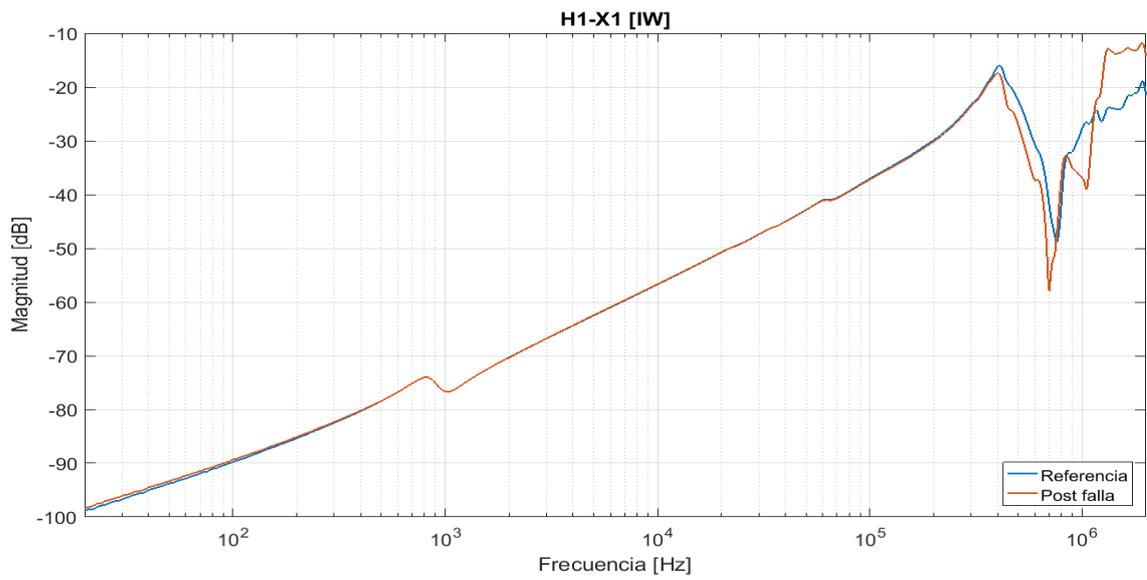


Figura 75: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

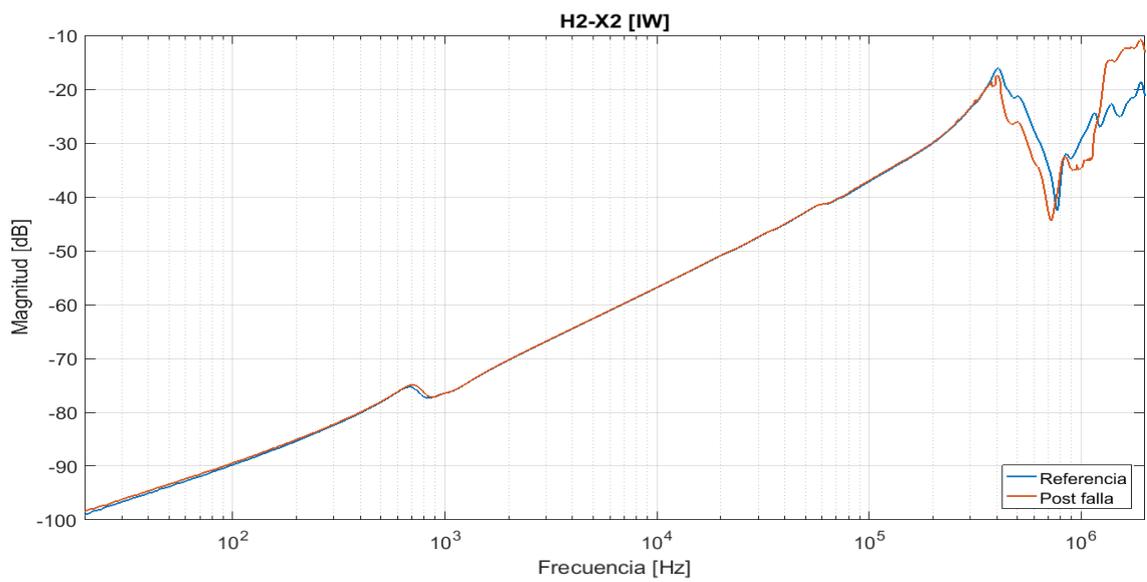


Figura 76: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

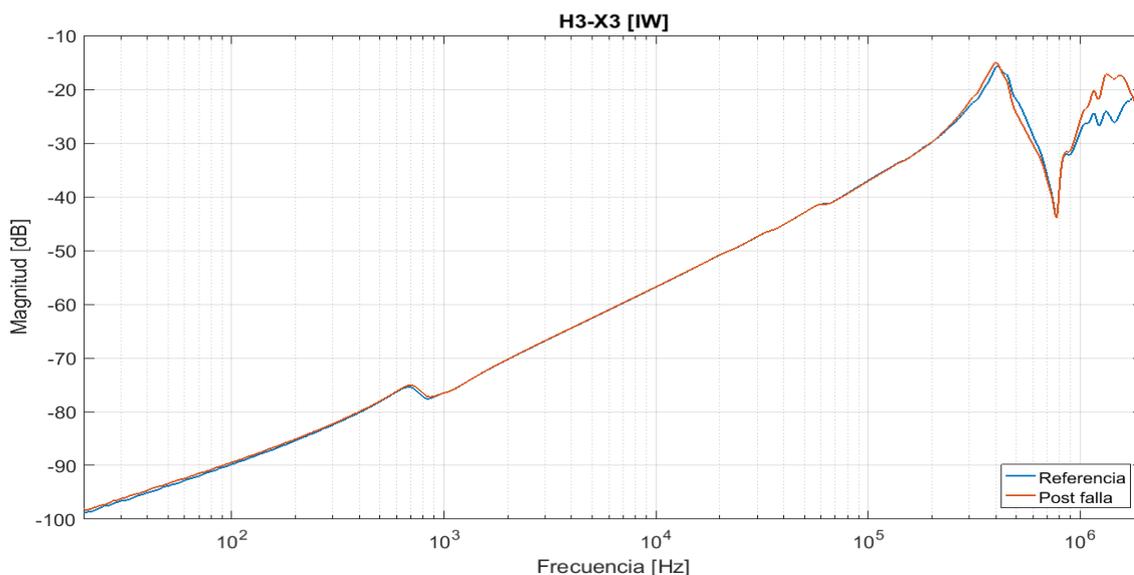


Figura 77: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

Se presentó un ligero aumento de magnitud en la región de bajas frecuencias, junto con un leve desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Las diferencias más significativas se dieron en altas frecuencias donde se modificaron e incluso aparecieron nuevas resonancias junto con un cambio en la magnitud.

6.4.2.4 Interdevanado inductivo

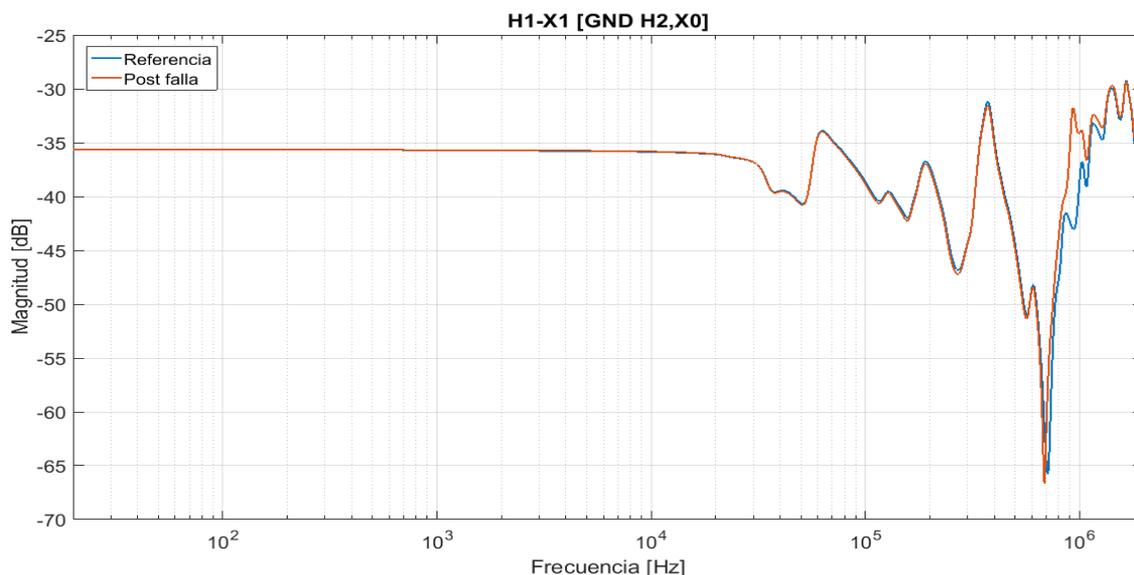


Figura 78: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

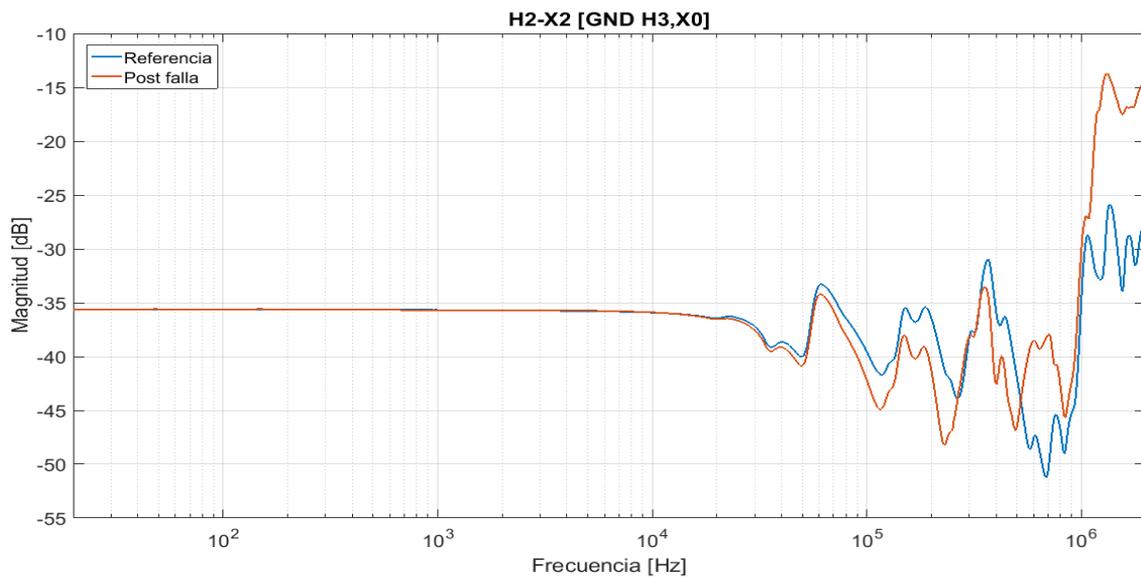


Figura 79: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

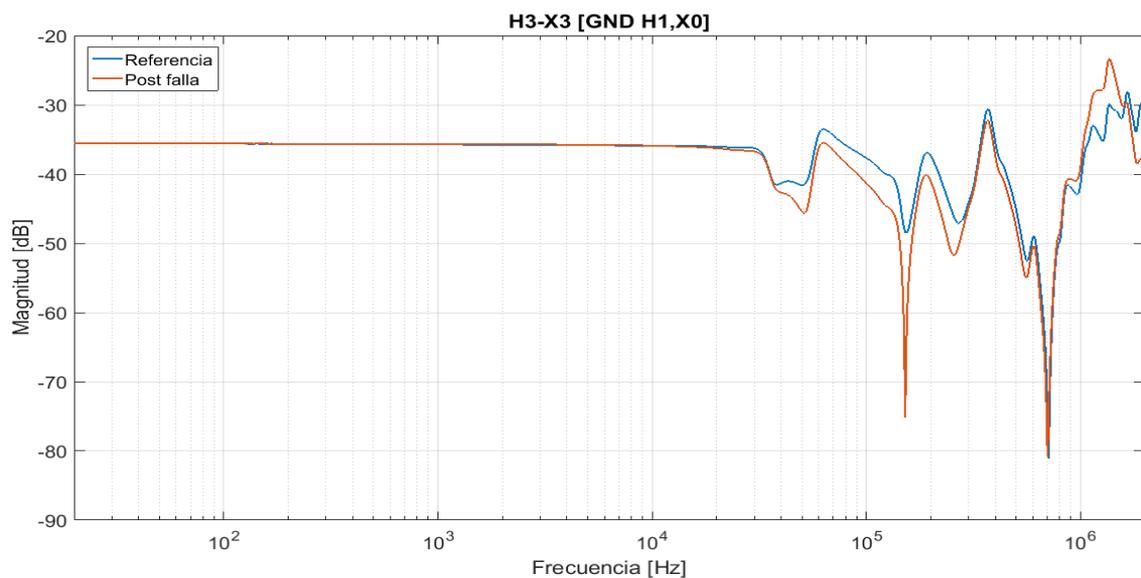


Figura 80: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

El interdevanado inductivo, como era de esperarse, no presentó variaciones en la región de bajas/medias frecuencias. Como ya se ha mencionado, esta configuración no es analizada en altas frecuencias, ya que el principal enfoque es la relación de transformación. (1)

6.4.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Defectos en el núcleo". Fue analizada con detalle en la Tabla 6, y en la Tabla 15 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 15: "Comparación del cambio en la reluctancia".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
20 Hz - 10 kHz	YCA	SI
	YCC	SI
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC	SI
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC	NO
> 1 MHz	YCA - YCC	NO

6.5 Múltiple puesta a tierra del núcleo

6.5.1 Simulación

Simplemente se colocó una puesta a tierra adicional, en contacto con las laminaciones del núcleo de hierro. En la Figura 81 se observa la puesta a tierra que ya estaba colocada en el núcleo, y en la Figura 82 la puesta a tierra intencional que se agregó para simular la falla.



Figura 81: "Puesta a tierra original del núcleo".



Figura 82: "Puesta a tierra adicional del núcleo".

6.5.2 Respuestas

6.5.2.1 Admitancia de circuito abierto

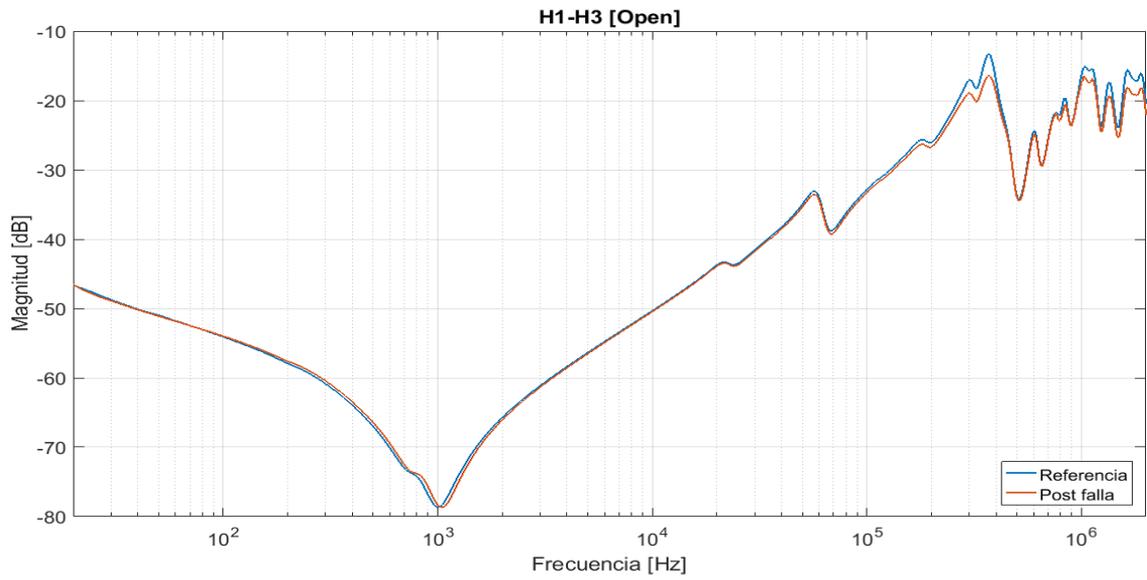


Figura 83: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

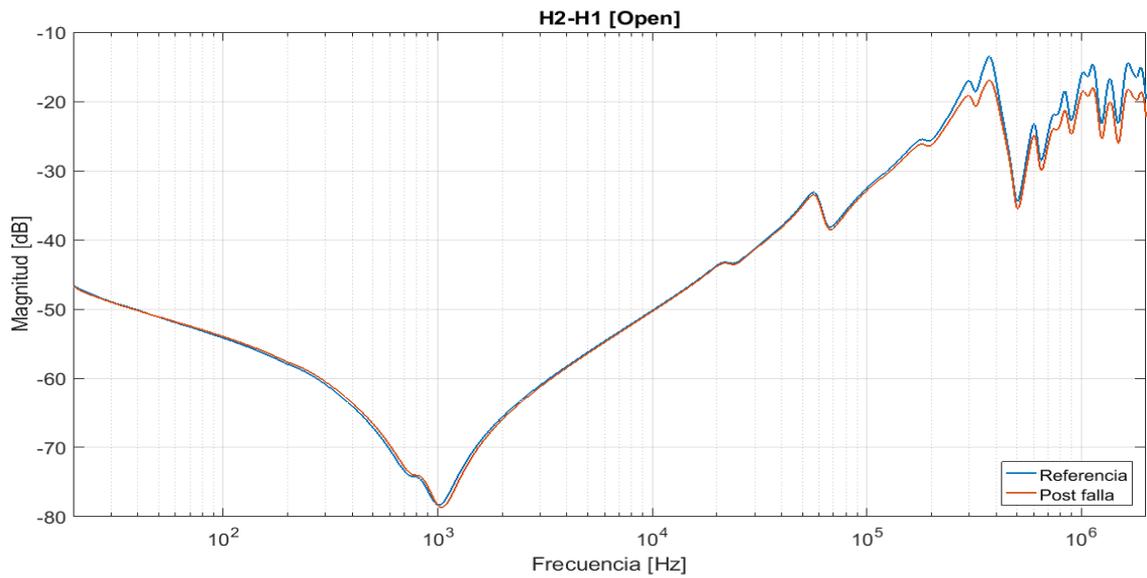


Figura 84: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

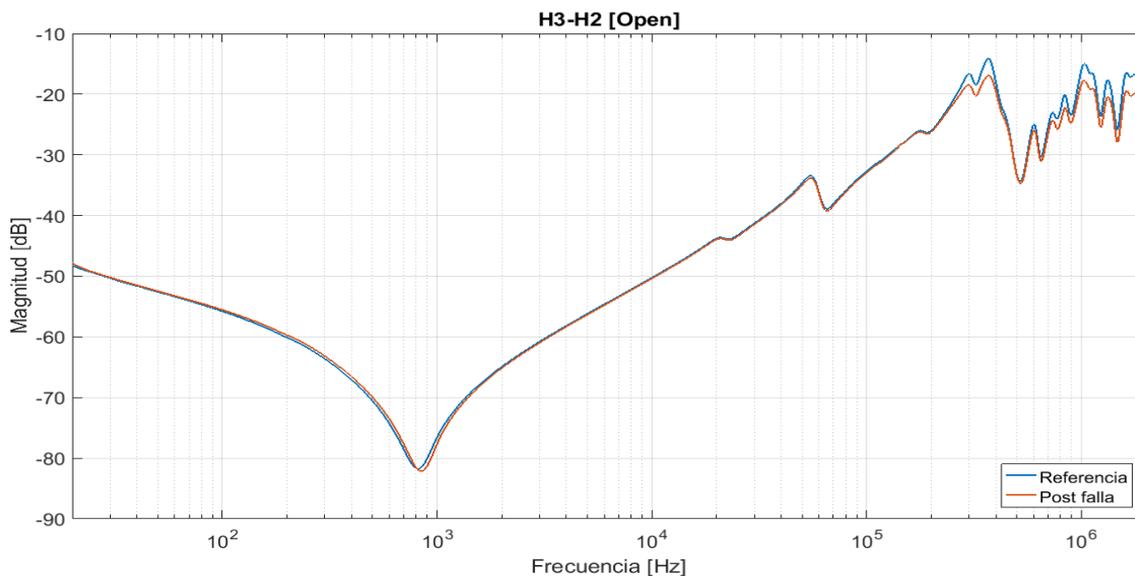


Figura 85: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Hubo un pequeño desplazamiento de la frecuencia de resonancia principal cercana a 1 kHz. En frecuencias medias las curvas permanecieron inalteradas verificándose este hecho mediante la norma DL/T 911 (4).

Los cambios más significativos surgieron en el intervalo de altas frecuencias (> 100 kHz). Esto era esperable ya que en esta región la respuesta está dominada por la condición mecánica de los contactos, puestas a tierra, etc.

6.5.2.2 Admitancia de cortocircuito

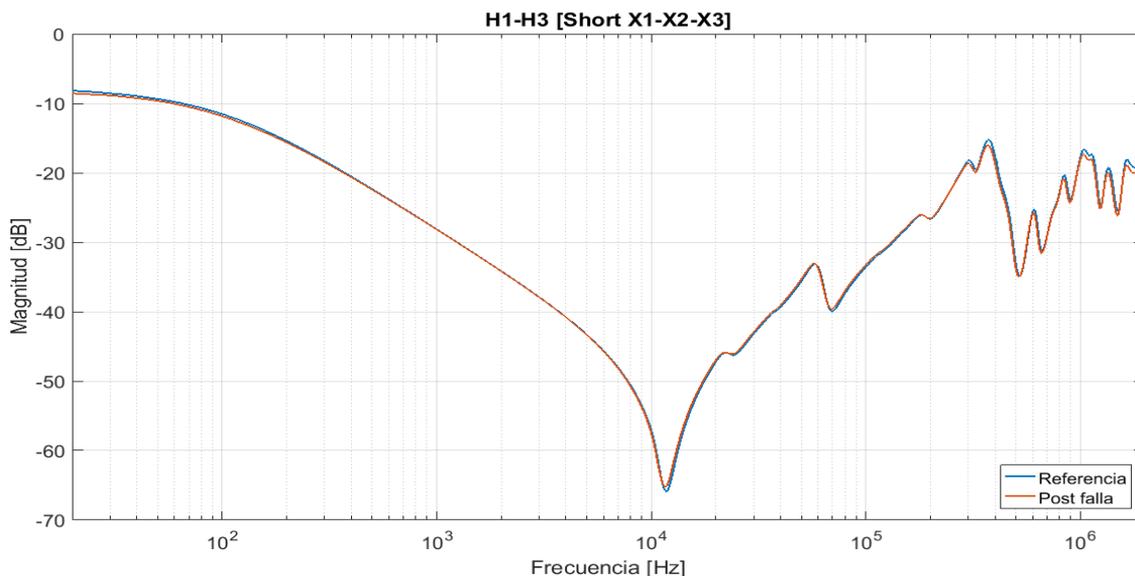


Figura 86: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

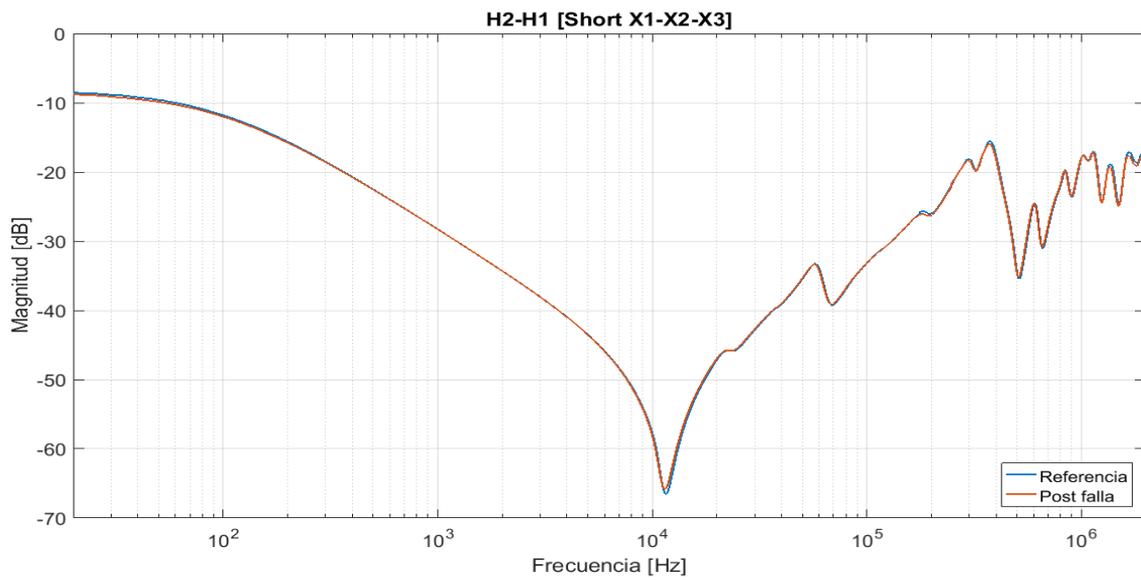


Figura 87: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

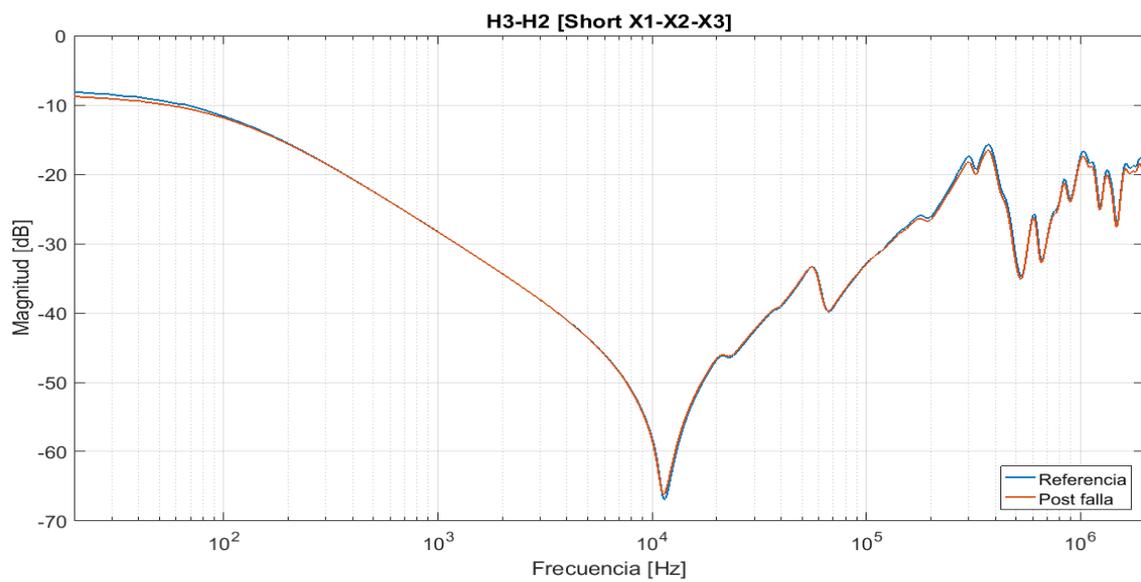


Figura 88: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

Al igual que en la configuración anterior, las variaciones significativas se dieron en la región de altas frecuencias (> 100 kHz).

6.5.2.3 Interdevanado capacitivo

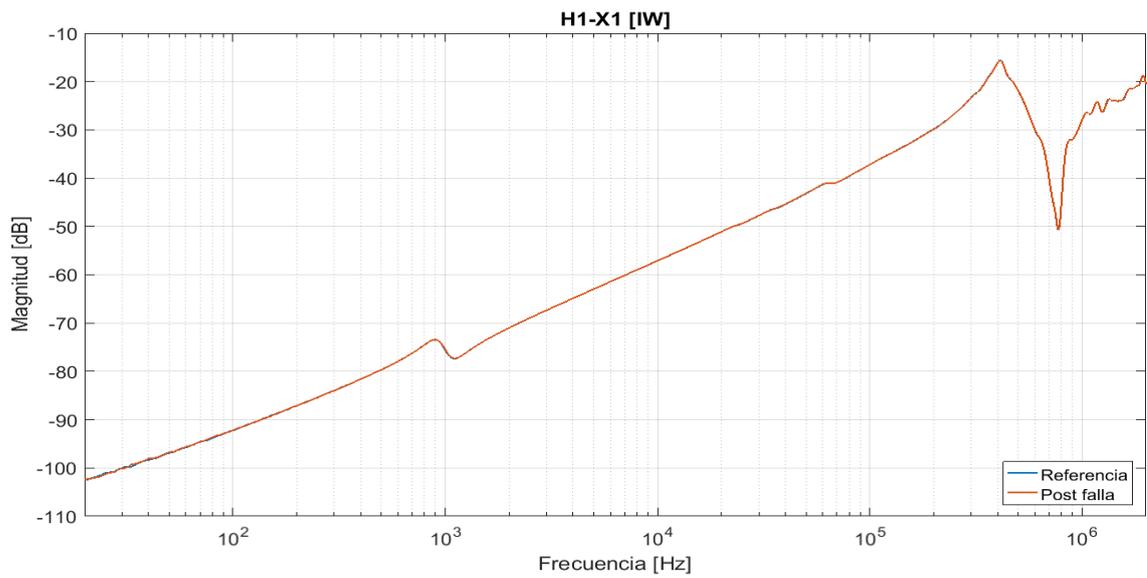


Figura 89: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

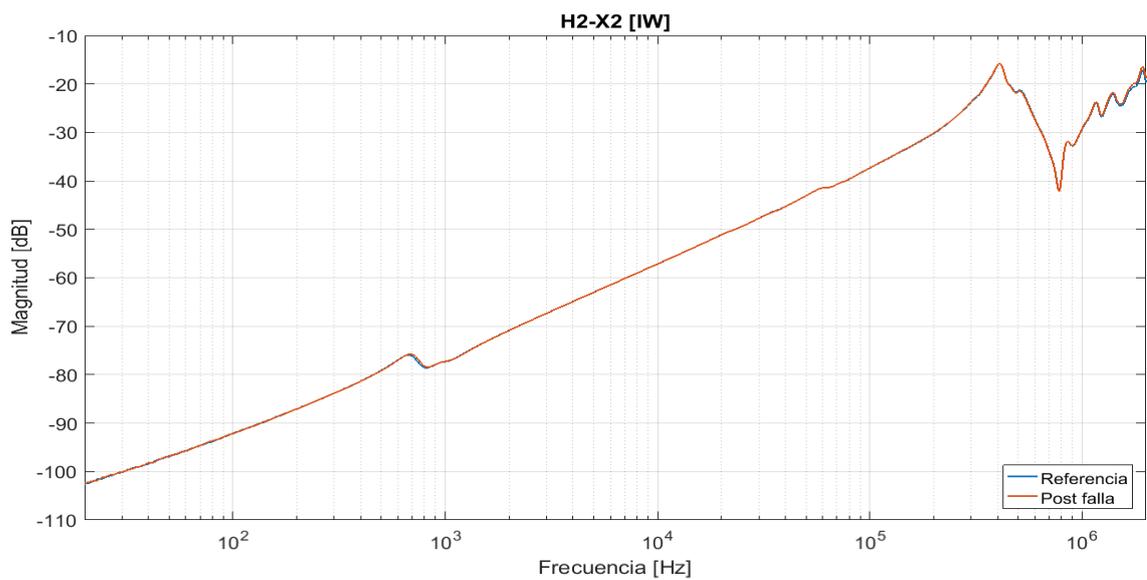


Figura 90: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

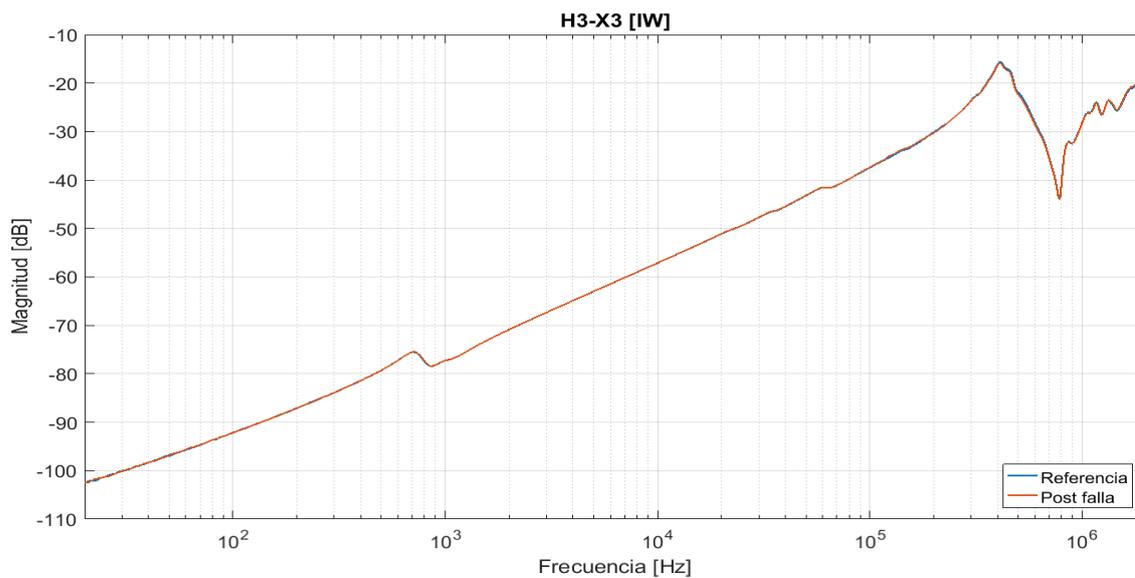


Figura 91: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

Esta configuración no presentó variaciones al realizar una doble puesta a tierra del núcleo. Esto era esperable ya que la respuesta de esta configuración depende principalmente de las capacidades interdevanado.

6.5.2.4 Interdevanado inductivo

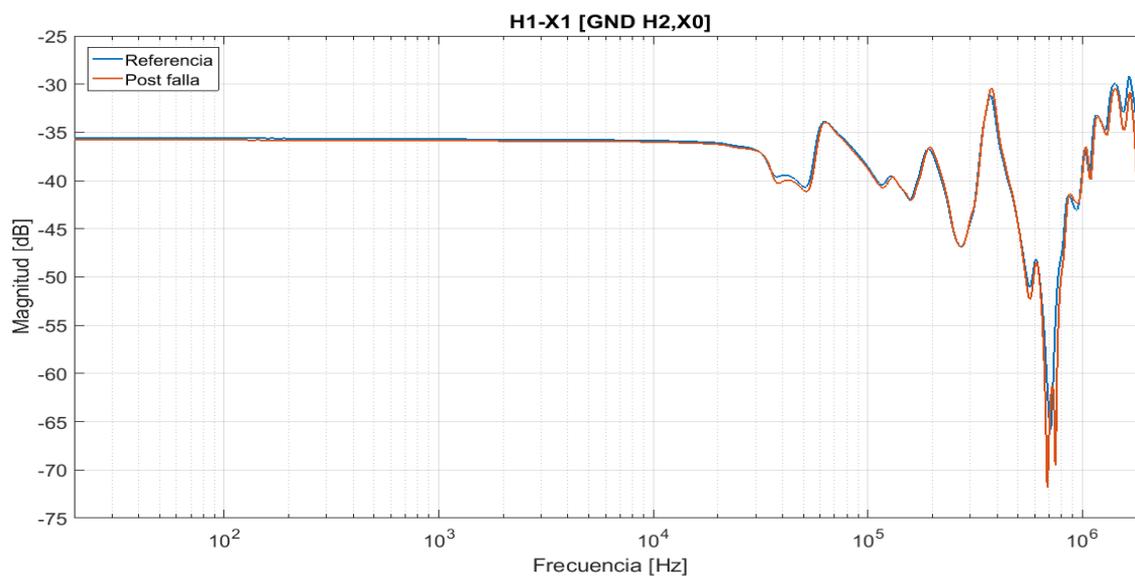


Figura 92: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

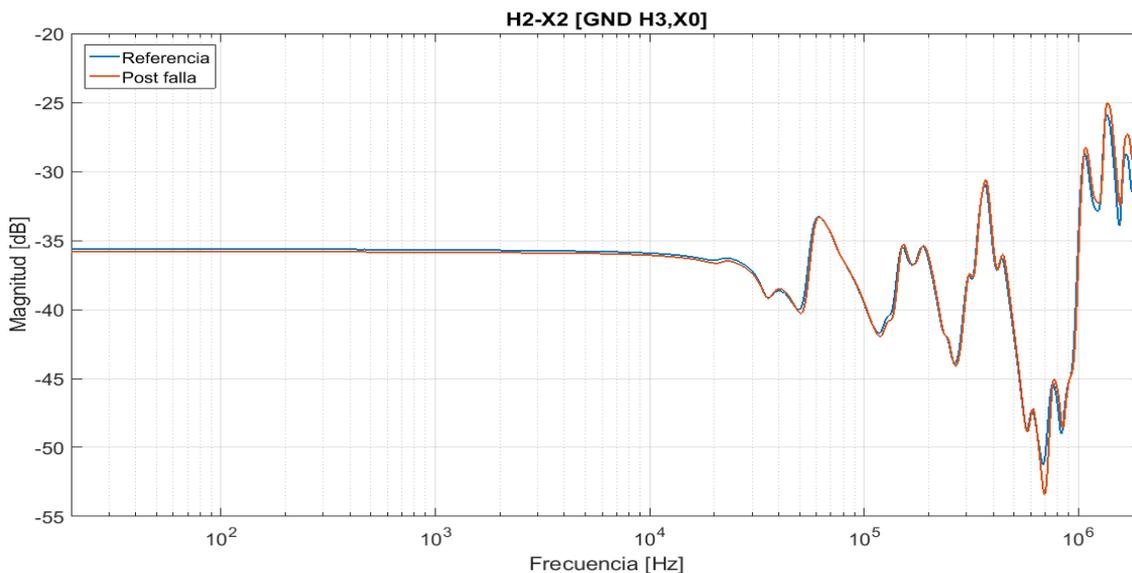


Figura 93: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

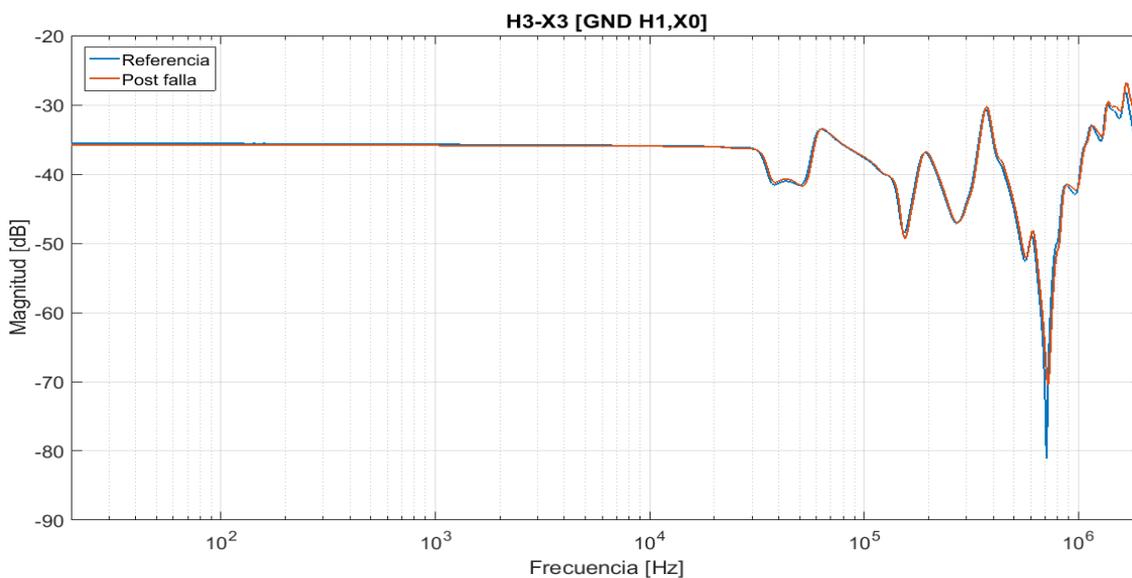


Figura 94: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

Al igual que en la configuración anterior no se detectaron cambios en la respuesta en frecuencia en el área de interés (1). Esto es así porque la relación de transformación no se ve afectada en absoluto con este modo de falla.

6.5.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Defectos en el núcleo". Fue analizada con detalle en la Tabla 6, y en la Tabla 16 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 16: "Comparación de la doble puesta a tierra del núcleo".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
20 Hz - 10 kHz	YCA	SI
	YCC	SI
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC	SI
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC	SI
> 1 MHz	YCA - YCC	SI

6.6 Núcleo levantado de tierra

6.6.1 Simulación

Para simular esta falla simplemente se aisló de tierra un conductor ubicado en la parte superior del transformador. Este conductor vinculaba galvánicamente el núcleo al yugo, el cual posee un contacto para la conexión a tierra.



Figura 95: "Núcleo levantado (cable verde) y yugo conectado a tierra (cable azul)".

6.6.2 Respuestas

6.6.2.1 Admitancia de circuito abierto

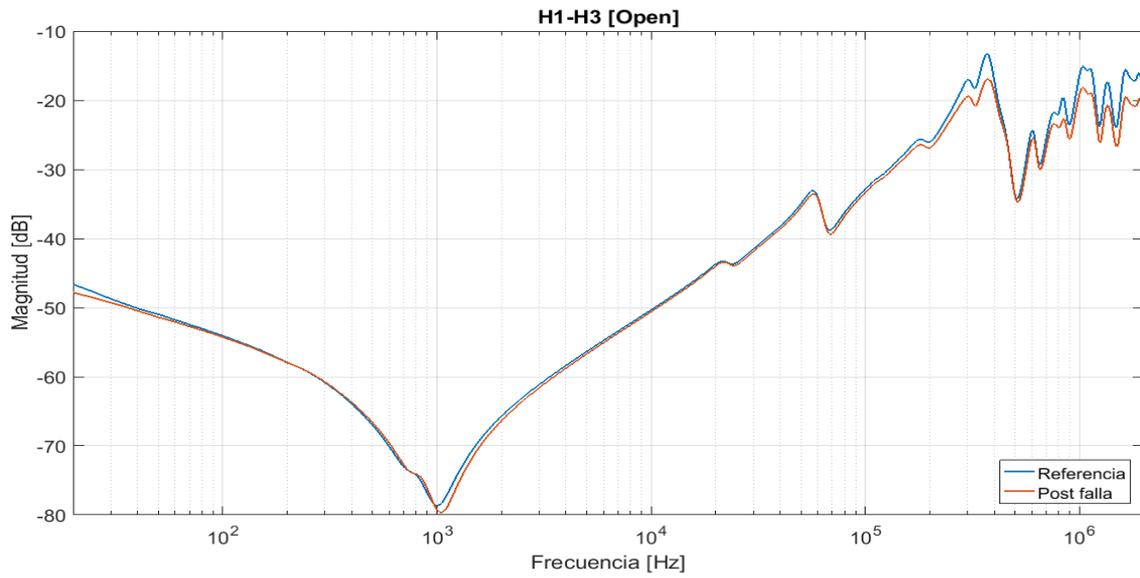


Figura 96: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

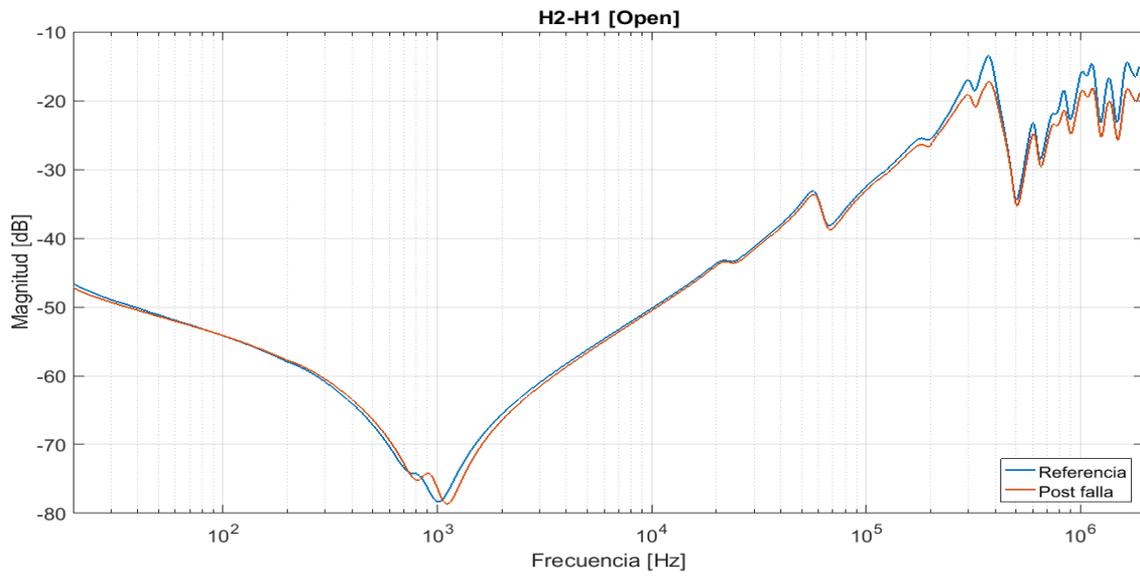


Figura 97: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

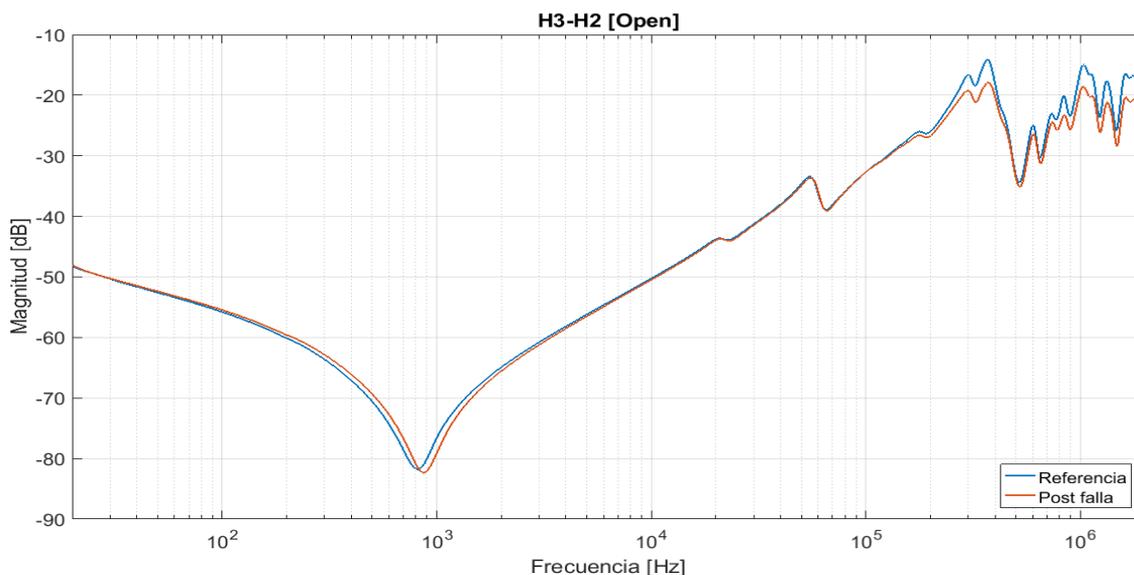


Figura 98: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Se presentaron cambios en la resonancia principal de esta configuración, hubo un ligero desplazamiento de la misma hacia frecuencias mayores. En la región de frecuencias medias no hubo cambios apreciables, lo cual fue verificado con el análisis de la norma DL/T 911 (4). La curva en altas frecuencias presentó una ligera disminución en magnitud.

6.6.2.2 Admitancia de cortocircuito

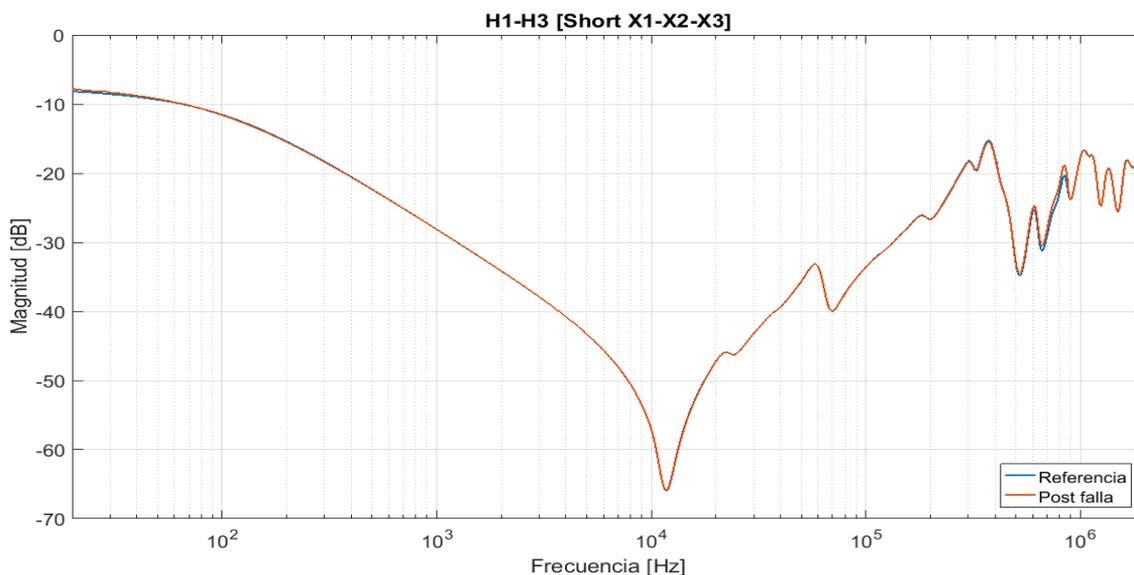


Figura 99: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

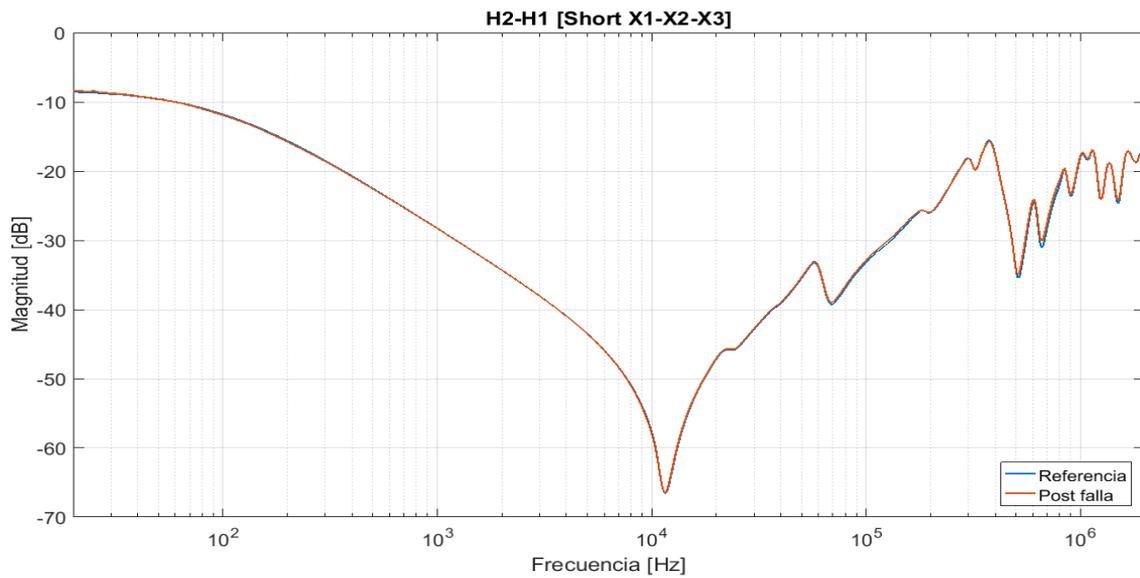


Figura 100: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

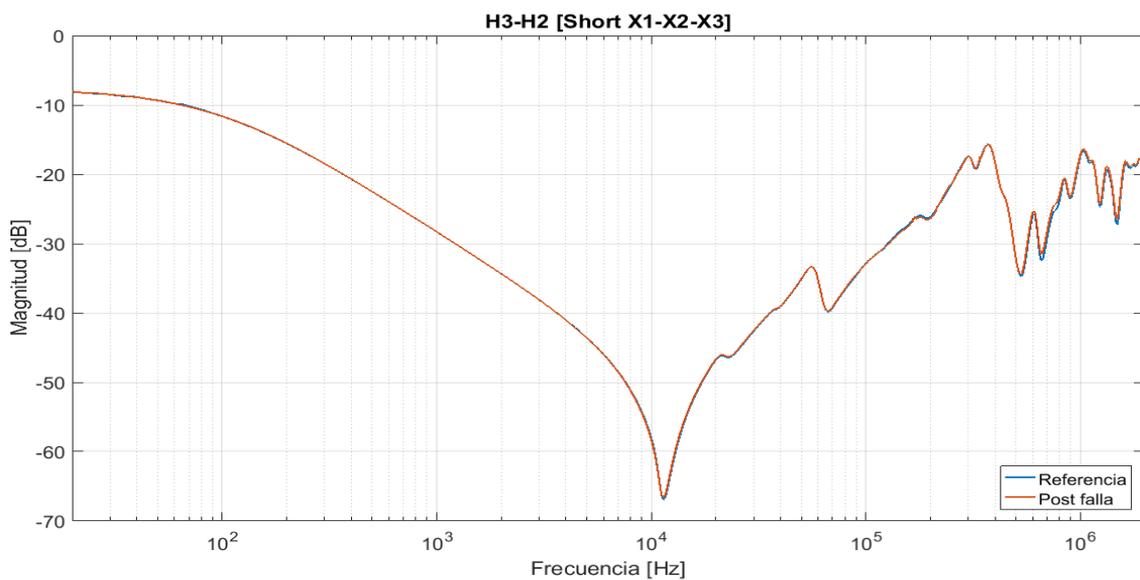


Figura 101: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

Las curvas de YCC se mantuvieron prácticamente inalteradas ante este modo de falla. En la región de frecuencias medias, este hecho se verificó mediante la norma DL/T 911.

6.6.2.3 Interdevanado capacitivo

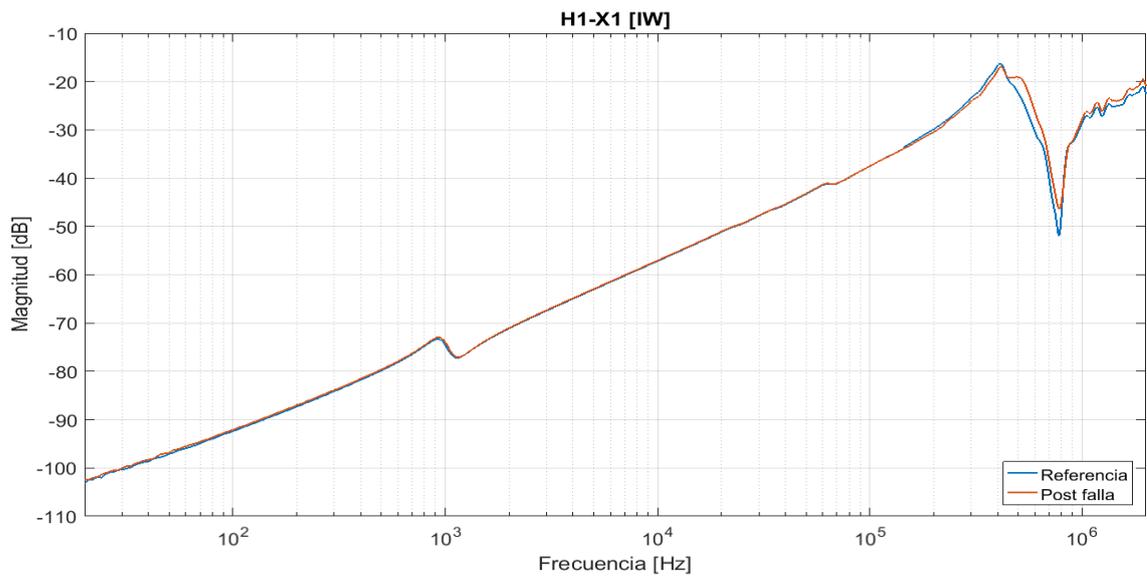


Figura 102: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

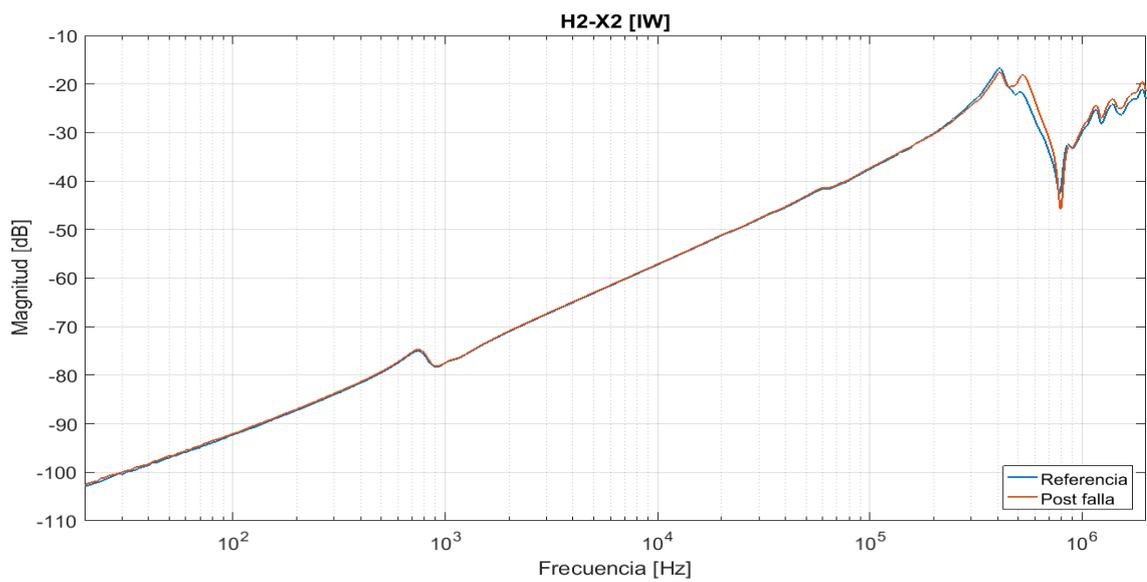


Figura 103: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

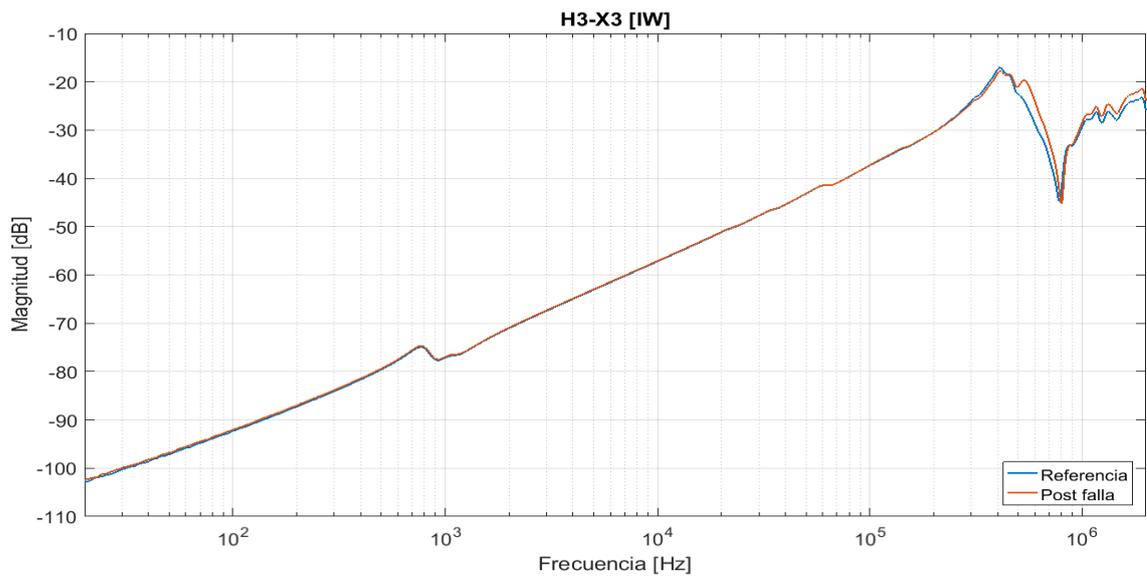


Figura 104: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

Esta configuración se mantuvo inalterada tanto en frecuencias bajas como medias. Los cambios más significativos surgieron en altas frecuencias (> 200 kHz), lo cual era esperable ya que las modificaciones mecánicas relacionadas con las puestas a tierra y contactos afectan este intervalo de frecuencias. Las tres curvas de esta configuración se presentaron en frecuencias logarítmicas para apreciar fácilmente todo el espectro. Una vez detectados los cambios en altas frecuencias, lo más útil es pasar a la escala lineal donde se aprecia mejor este fenómeno. En la figura siguiente se muestra una de las tres curvas con la frecuencia en escala lineal.

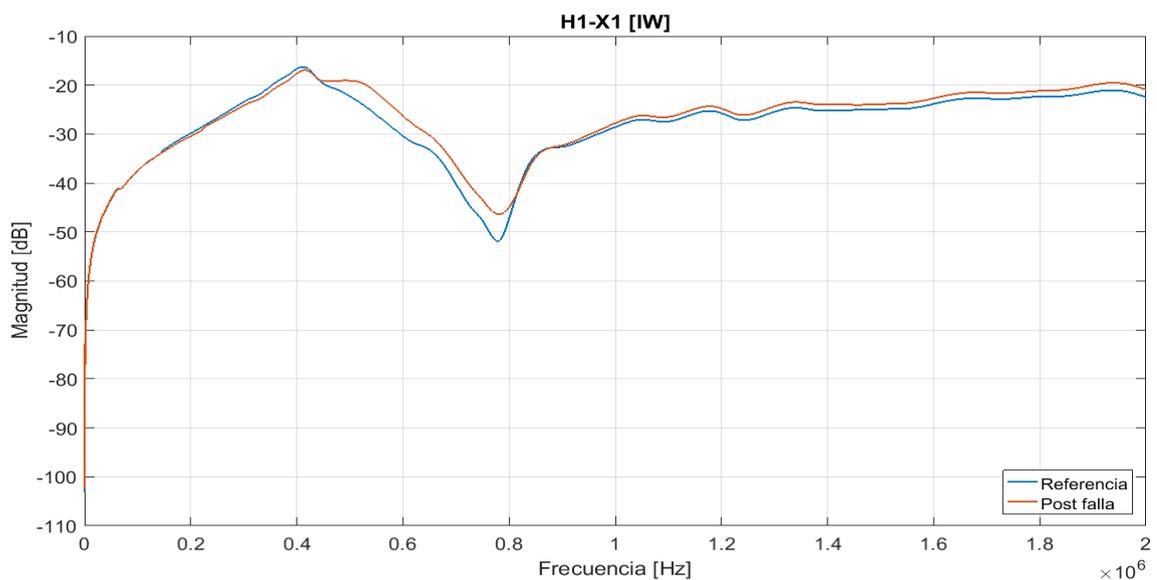


Figura 105: "Interdevanado capacitivo, H1-X1 (escala lineal)".

6.6.2.4 Interdevanado inductivo

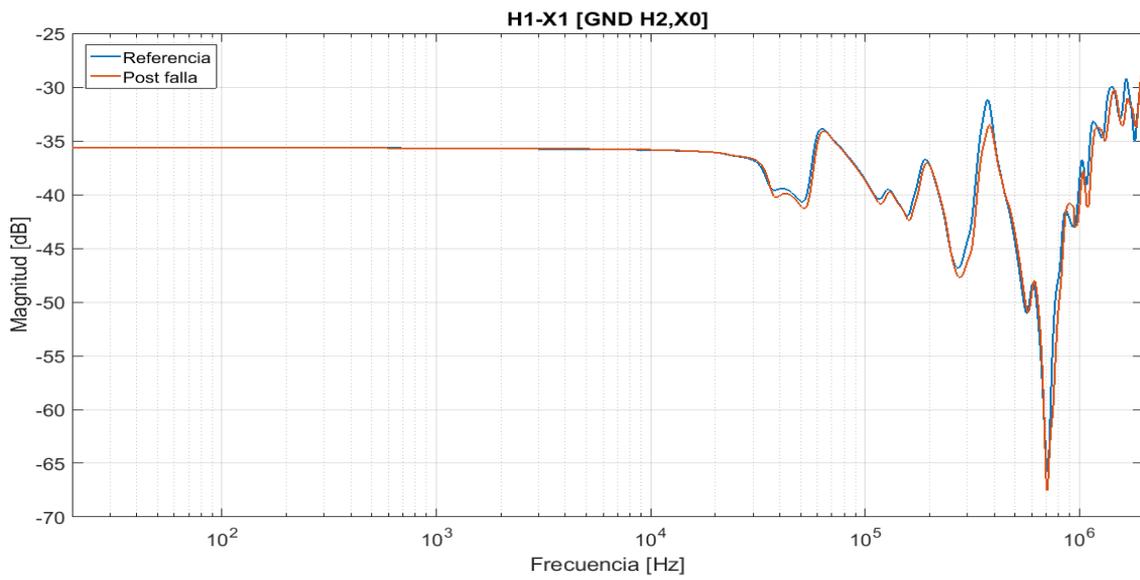


Figura 106: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

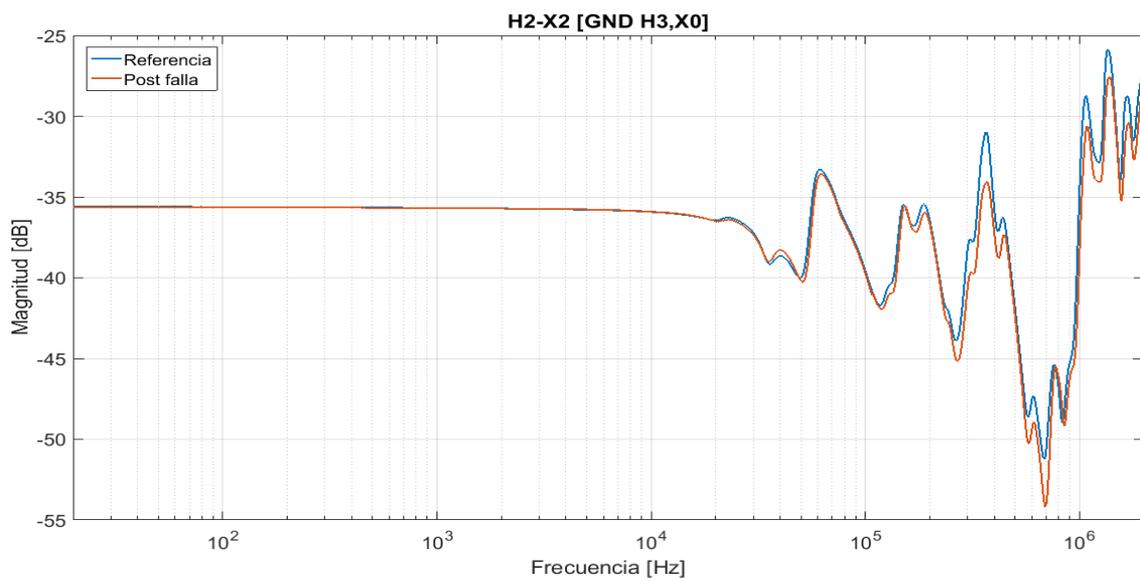


Figura 107: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

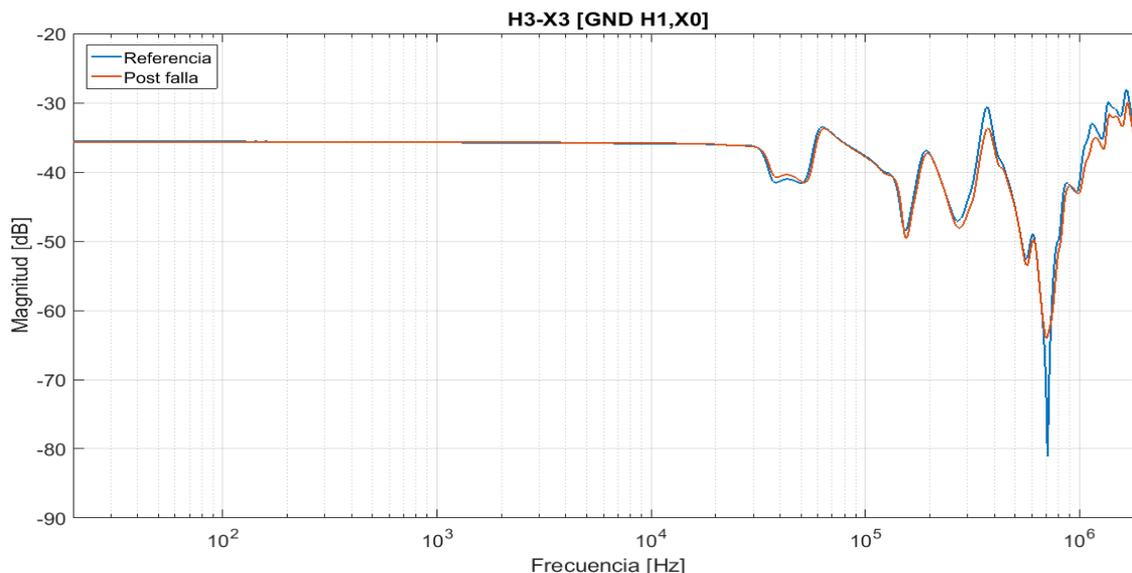


Figura 108: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

Tal como era de esperarse, las curvas de interdevanado inductivo no presentaron cambios en la región de interés (1), frente a una falla que aísla al núcleo de tierra.

6.6.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Defectos en el núcleo". Fue analizada con detalle en la Tabla 6, y en la Tabla 17 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 17: "Comparación del núcleo levantado de tierra".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
20 Hz - 10 kHz	YCA	SI
	YCC	SI
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC	SI
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC	SI
> 1 MHz	YCA - YCC	SI

6.7 Magnetización remanente

6.7.1 Simulación

Este estado del transformador se puede obtener de dos maneras distintas. La primera es energizando el transformador con una corriente alterna e interrumpiéndola de manera abrupta de modo que los dipolos magnéticos del núcleo queden orientados según el punto de la onda sinusoidal donde se halla dado el corte. La segunda es mediante la aplicación de una corriente continua que genere un campo H en un único sentido y que al desenergizar origine un magnetismo remanente.

La opción elegida para este trabajo fue la segunda. Se utilizó un óhmetro *MT0330* de Megger, el cual mide la resistencia de los arrollamientos mediante el método voltímetro - amperímetro aplicando una corriente continua y consecuentemente dejando el núcleo magnetizado.

En la Figura 109 puede verse el equipo y las conexiones que fueron utilizadas para magnetizar el núcleo.



Figura 109: "Equipo y conexiones utilizadas para magnetizar el núcleo".

6.7.2 Respuestas

6.7.2.1 Admitancia de circuito abierto

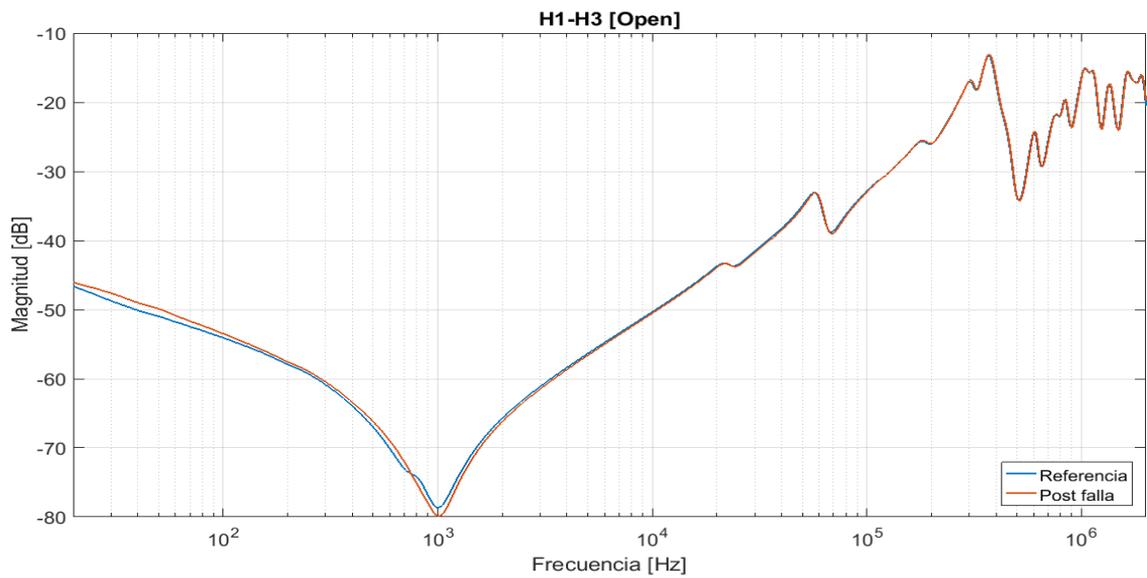


Figura 110: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

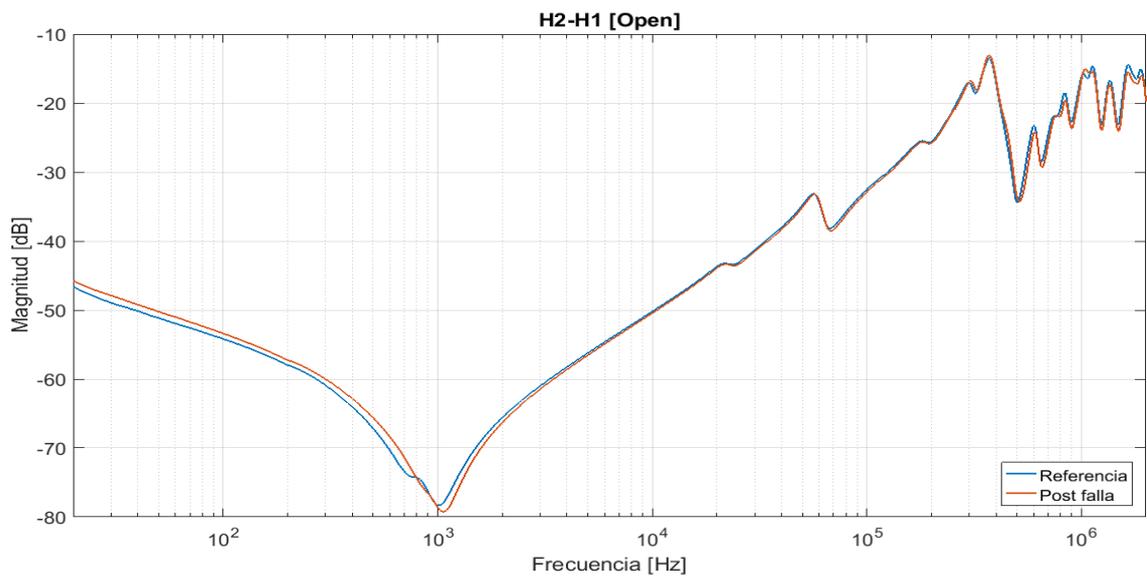


Figura 111: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

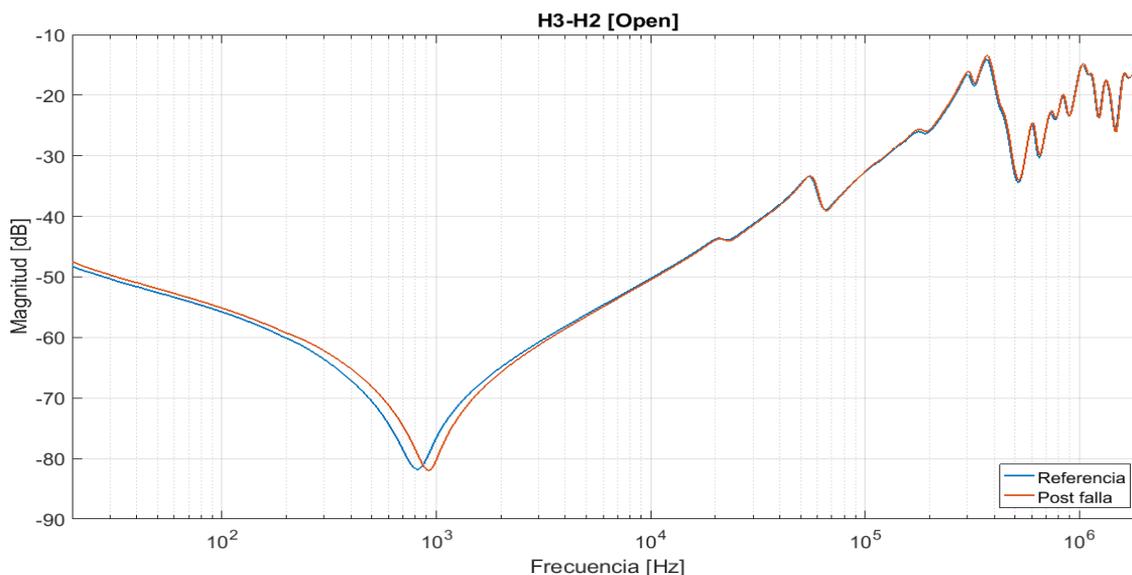


Figura 112: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Los cambios más significativos se dieron en la región de bajas frecuencias ($< 5 \text{ kHz}$), donde la respuesta está gobernada por la condición del núcleo. La curva se desplazó y hubo un corrimiento de la frecuencia de resonancia principal. Aunque no se muestra en las figuras, también se analizó la curva de fase, la cual reveló un comportamiento más capacitivo luego de producirse la falla.

Si bien la magnetización residual no se trata de una falla del transformador, se ve que tiene una influencia importante en las curvas respuesta del SFRA ya que puede conducir a interpretaciones erróneas.

6.7.2.2 Admitancia de cortocircuito

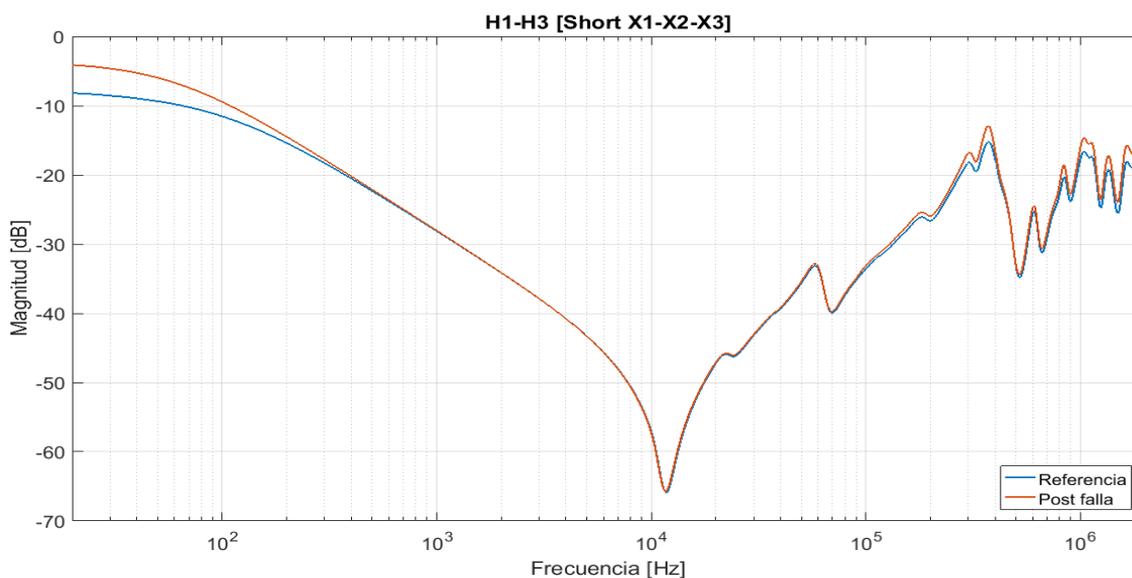


Figura 113: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

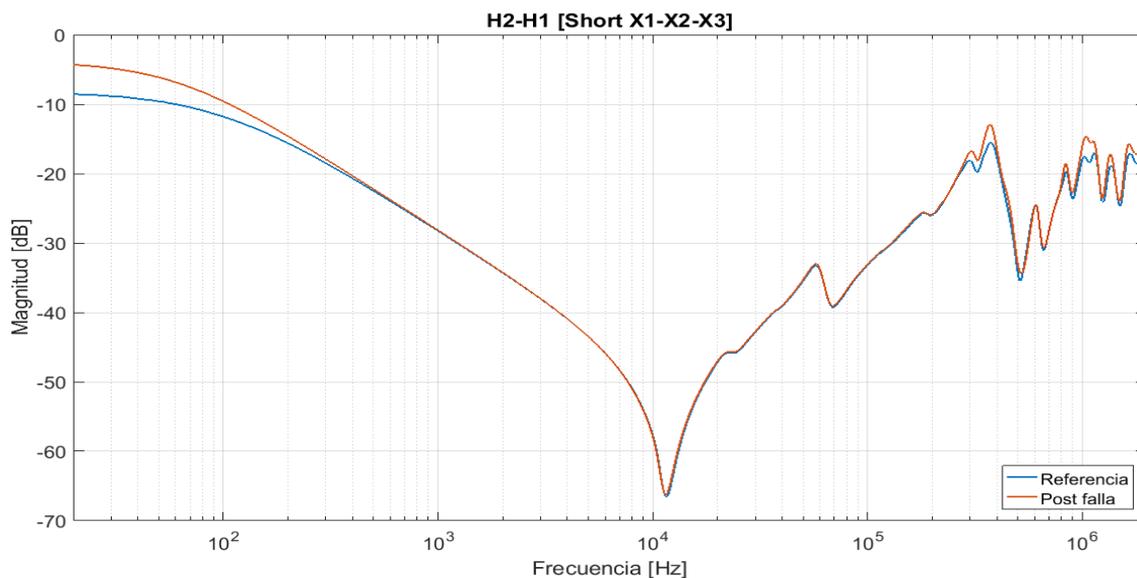


Figura 114: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

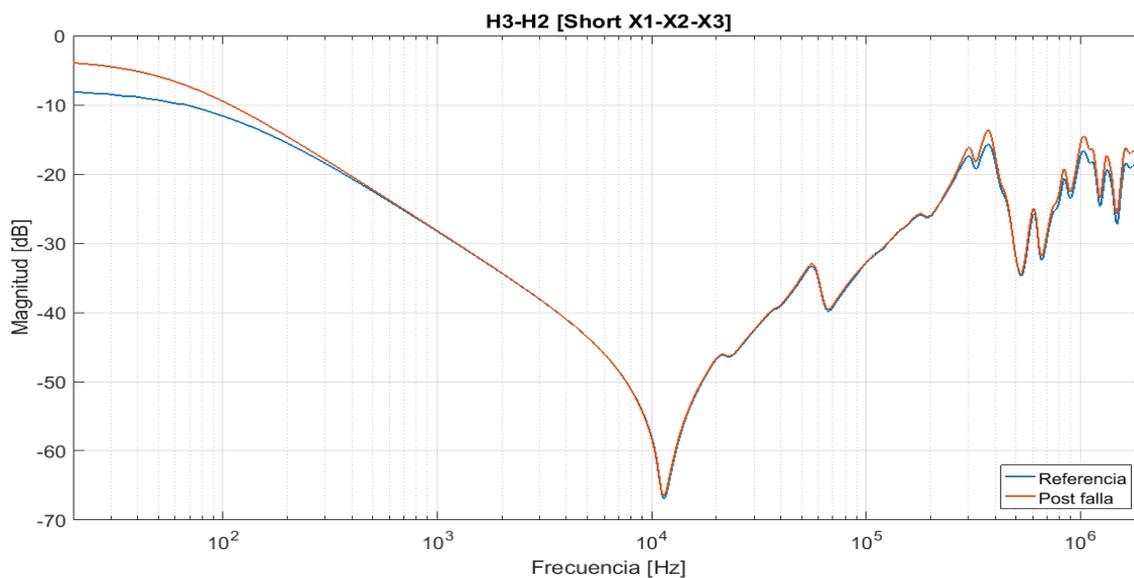


Figura 115: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

Esta configuración se ve fuertemente afectada en la región de bajas frecuencias ($< 1 \text{ kHz}$). A causa del magnetismo residual, la curva se desplaza hacia arriba, es decir que disminuye la impedancia vista hacia el transformador.

En frecuencias medias no hubieron modificaciones relevantes, lo cual se verificó con el análisis de la norma DL/T 911 (4).

En altas frecuencias ($> 100 \text{ kHz}$) también se presentaron cambios significativos, mediante un desplazamiento hacia arriba de la curva.

6.7.2.3 Interdevanado capacitivo

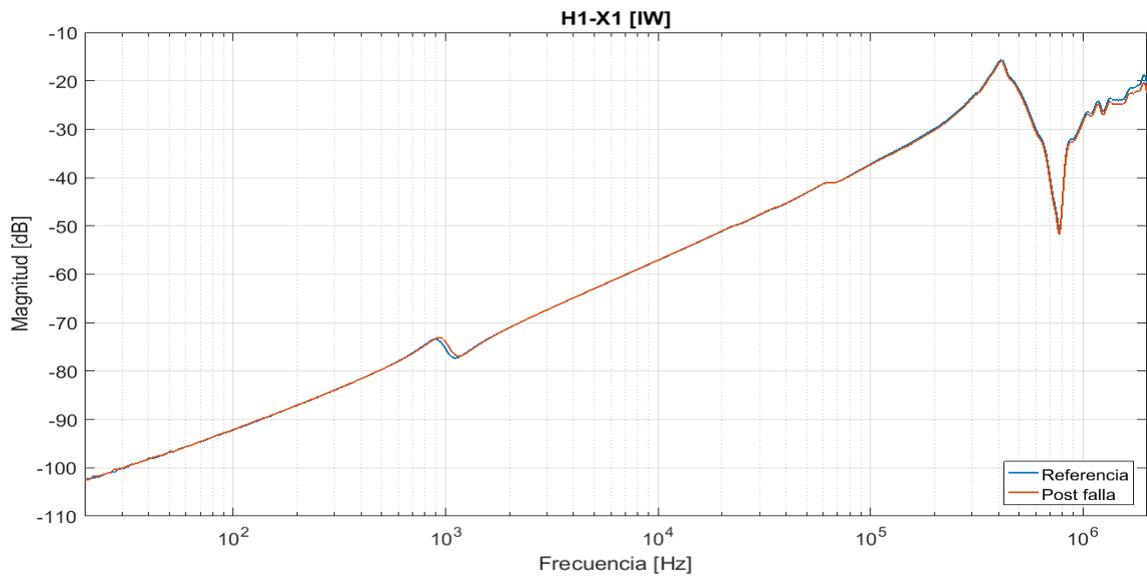


Figura 116: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

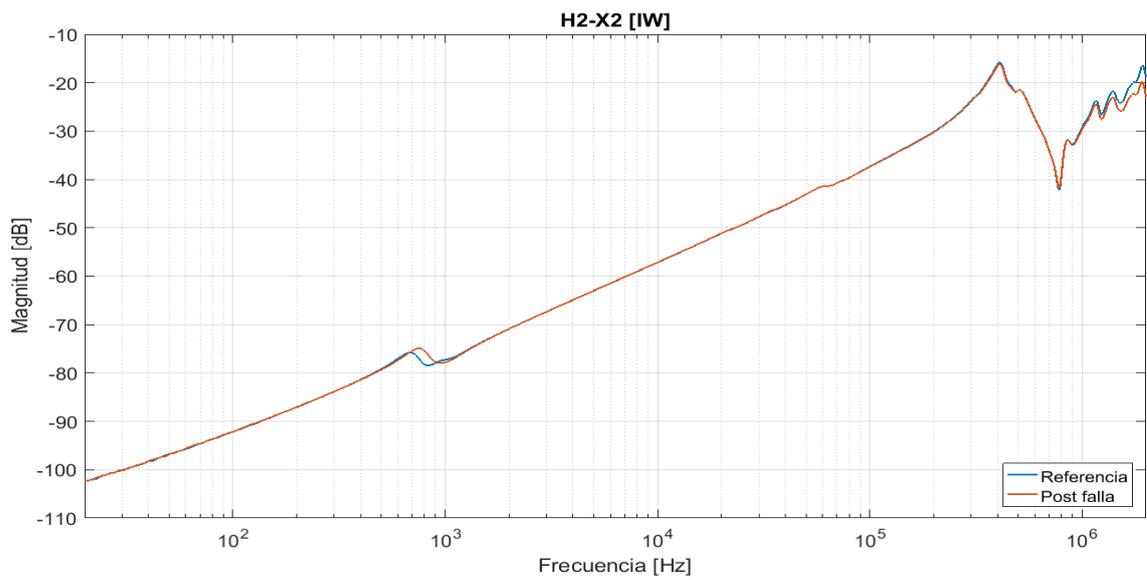


Figura 117: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

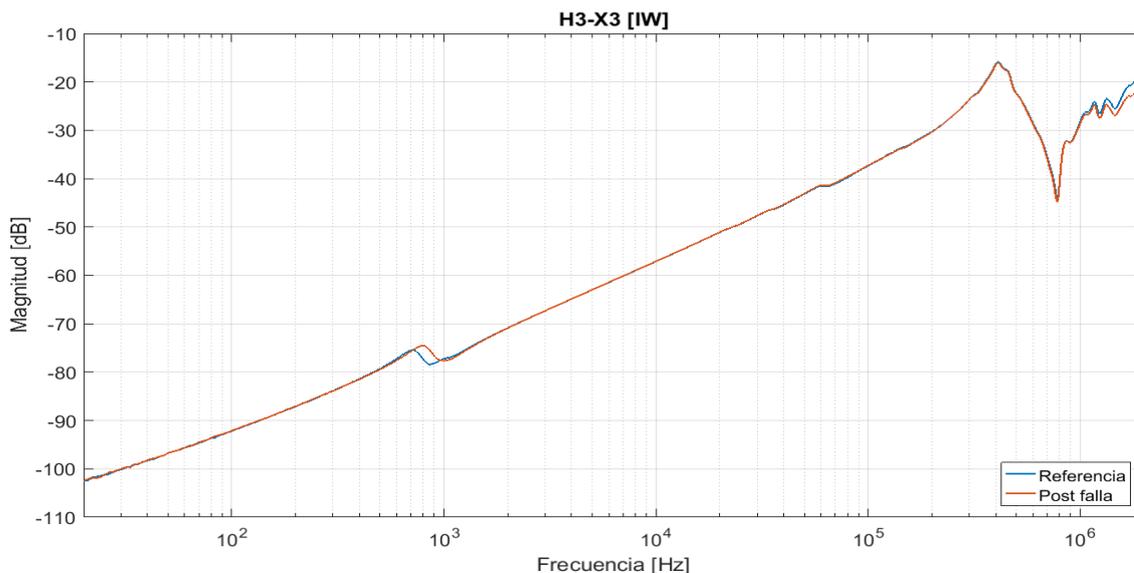


Figura 118: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

En esta configuración el cambio más representativo fue el desplazamiento de la frecuencia de resonancia característica hacia un valor ligeramente mayor.

También se evidenciaron pequeños cambios en la región de muy altas frecuencias (> 1 MHz) donde la curva se desplazó hacia abajo.

6.7.2.4 Interdevanado inductivo

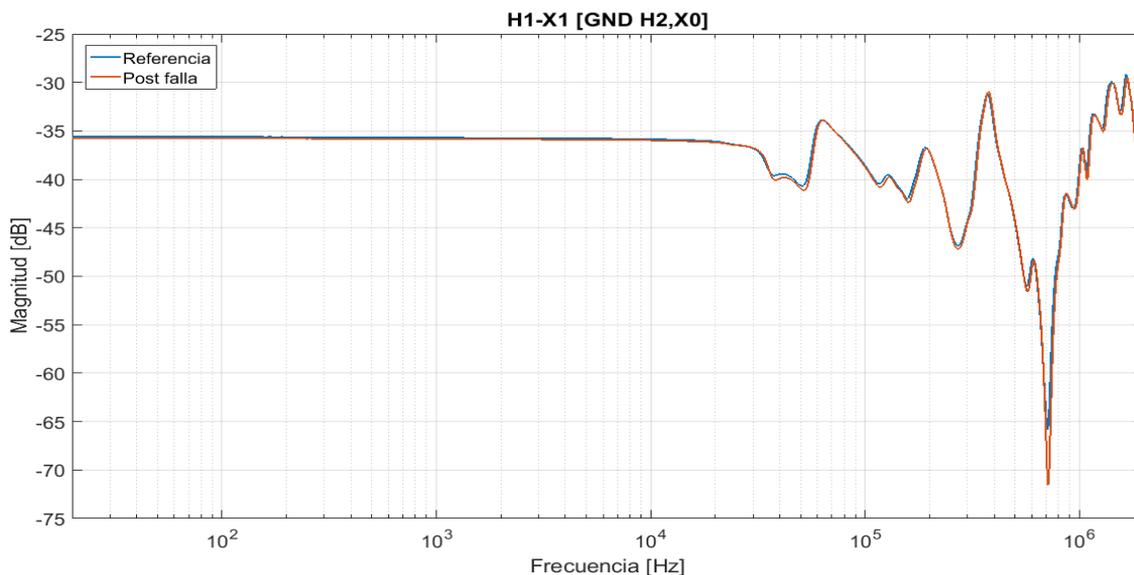


Figura 119: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

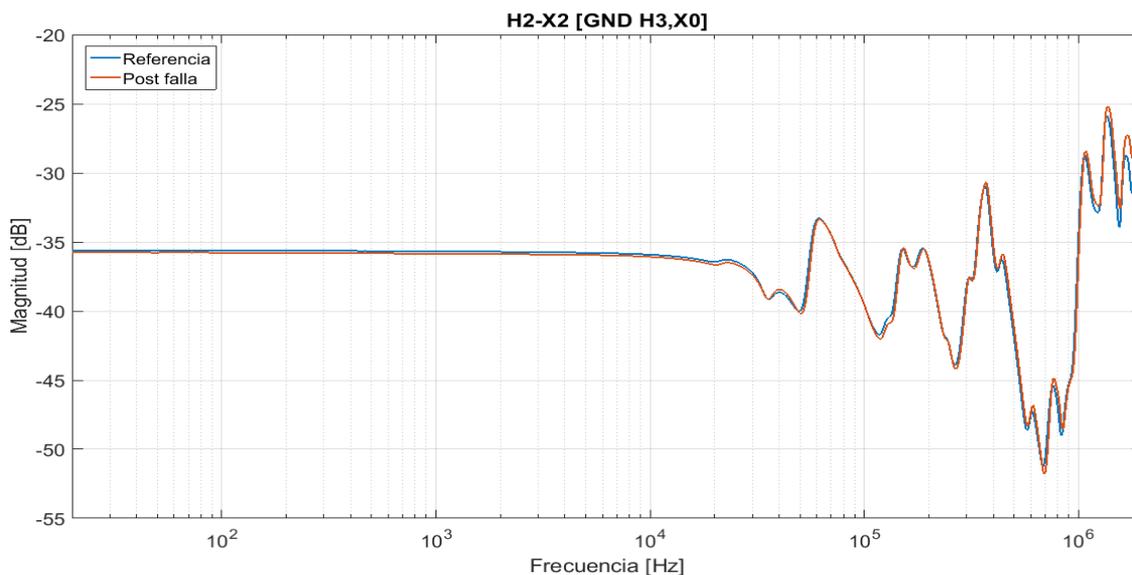


Figura 120: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

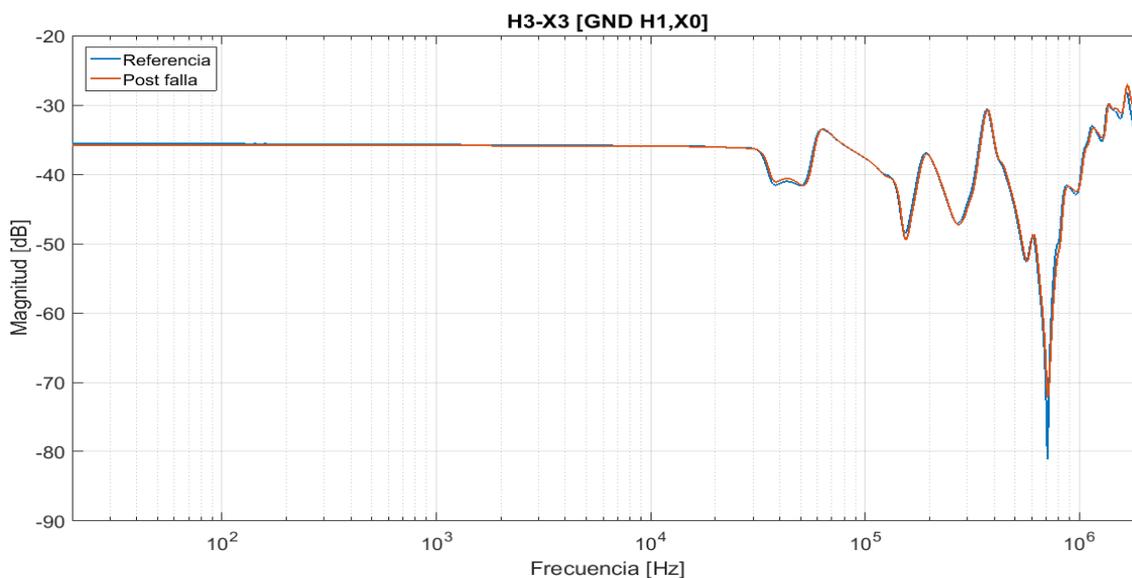


Figura 121: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

Como era de esperarse, la magnetización del núcleo no afectó a la relación de transformación de los bobinados. Las curvas no se vieron modificadas en la región considerada de interés (1).

6.7.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Magnetización residual". Fue analizada con detalle en 5.1.9, y en la Tabla 18 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 18: "Comparación con el núcleo magnetizado".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
Resonancia principal	YCA	SI

6.8 Desplazamiento axial del bobinado

6.8.1 Simulación

Para obtener este modo de falla simplemente se liberó la bobina de AT, quitando las maderas que lo sujetaban en su posición. Posteriormente se desplazó hacia arriba esta bobina y se colocaron tacos de madera para mantenerla fija. Para las pruebas realizadas, se movió solo el bobinado de AT de la fase central (H2-H3) unos 3,2 cm hacia arriba. En la Figura 122 se ve el bobinado central desplazado hacia arriba y en la Figura 123 se compara su posición con el bobinado de una fase lateral.

El bobinado de BT se mantuvo fijo en su posición inicial, ya que el diseño del transformador no permite desplazarlo. En esta falla se realiza un movimiento relativo entre bobinado de AT y bobinado de BT que probablemente refleje en un cambio de la reactancia de dispersión.



Figura 122: "Bobinado central de AT desplazado hacia arriba".



Figura 123: "Comparación de posición entre bobinado central y lateral".

6.8.2 Respuestas

6.8.2.1 Admitancia de circuito abierto

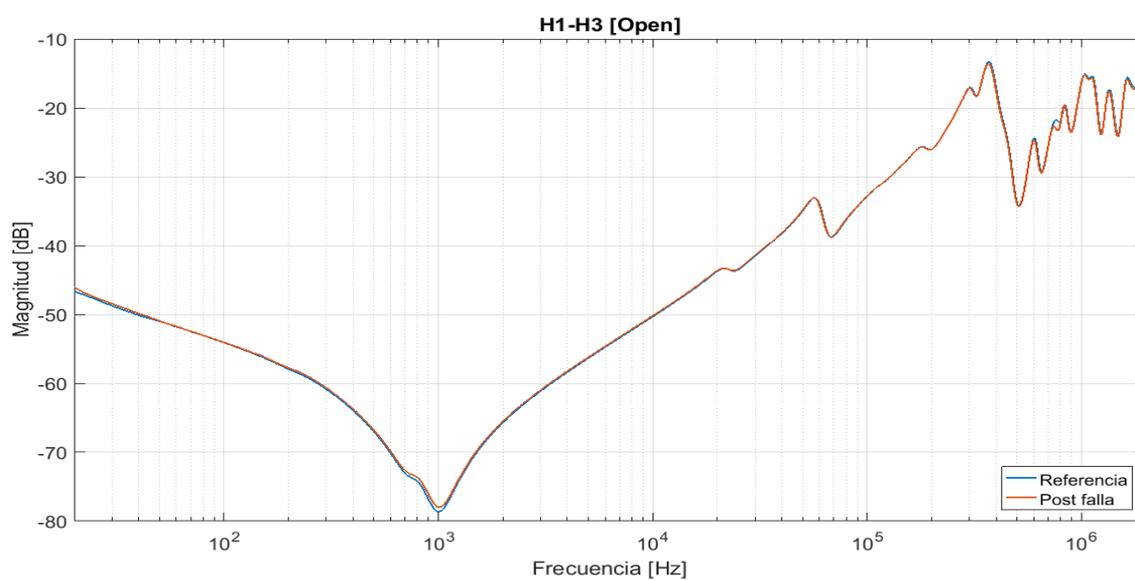


Figura 124: "Admitancia de circuito abierto, bobina H1-H3".

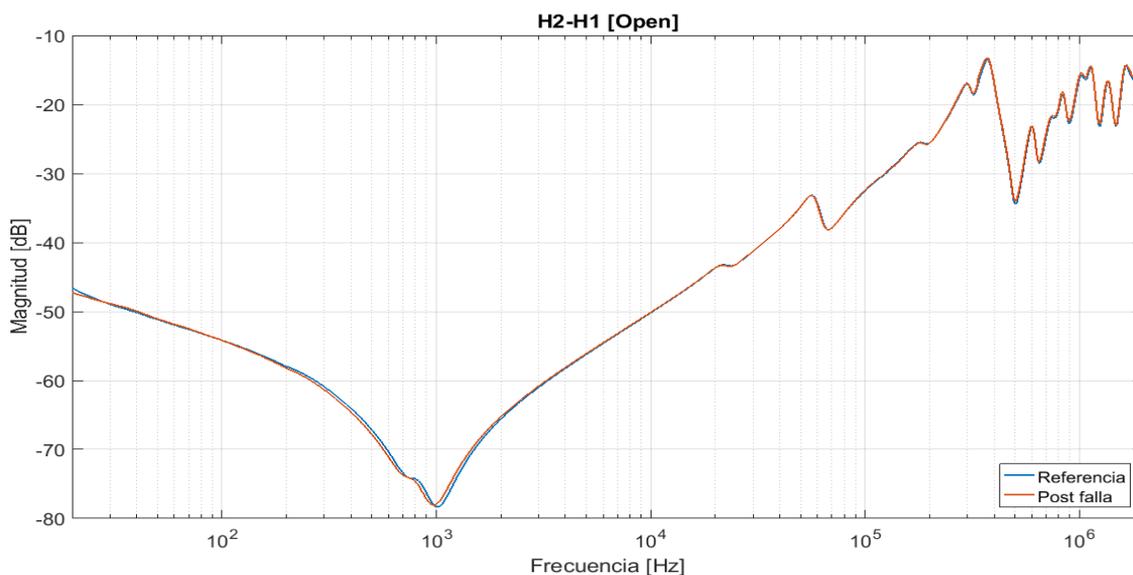


Figura 125: "Admitancia de circuito abierto, bobina H2-H1".

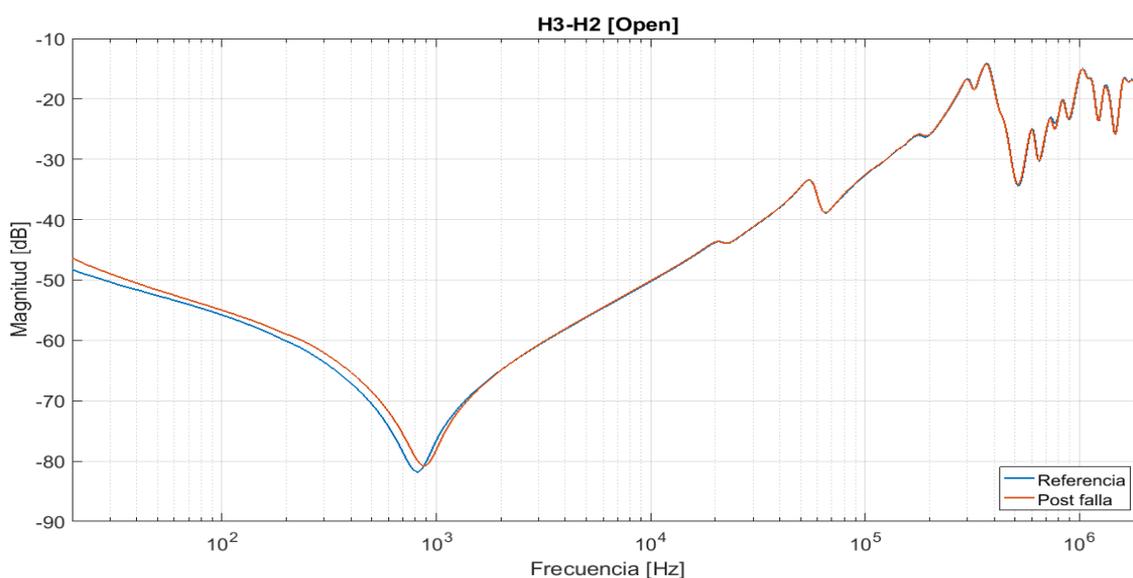


Figura 126: "Admitancia de circuito abierto, bobina H3-H2".

Esta configuración no presentó cambios significativos en las fases sanas, solo un pequeño desplazamiento en la frecuencia de resonancia principal ubicada en las cercanías de 1 kHz. En la fase central (H3-H2), donde se realizó el desplazamiento, hubo una variación significativa en la región de bajas frecuencias, hasta el orden de 2 kHz. El resto de las curvas se mantuvieron inalteradas.

El análisis de la norma DLT/911 (4) dio como resultado un estado sano de los bobinados.

6.8.2.2 Admitancia de cortocircuito

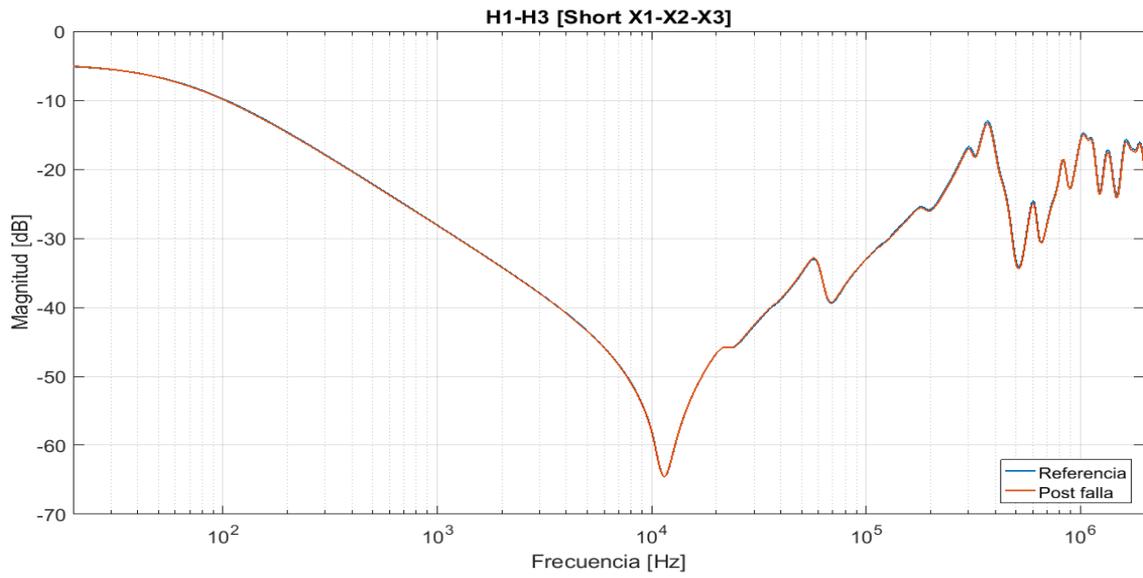


Figura 127: "Admitancia de cortocircuito, bobina H1-H3".

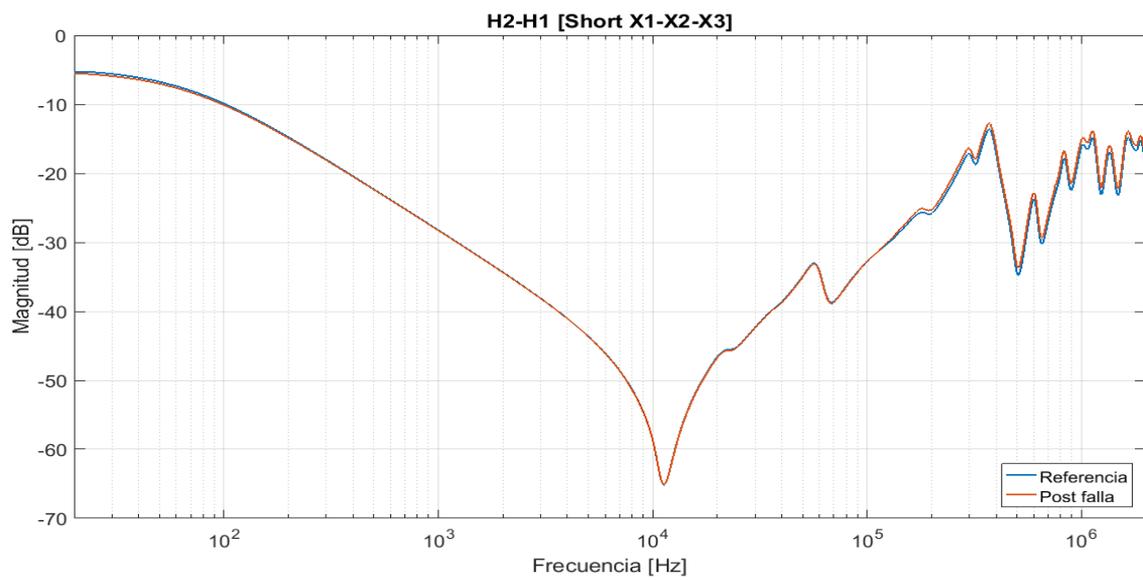


Figura 128: "Admitancia de cortocircuito, bobina H2-H1".

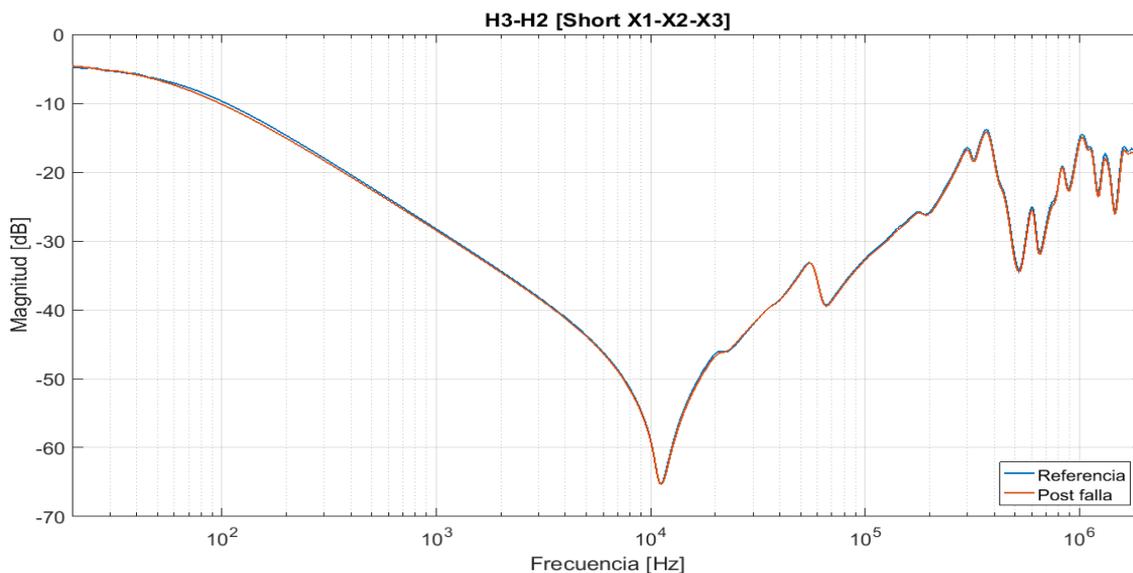


Figura 129: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2".

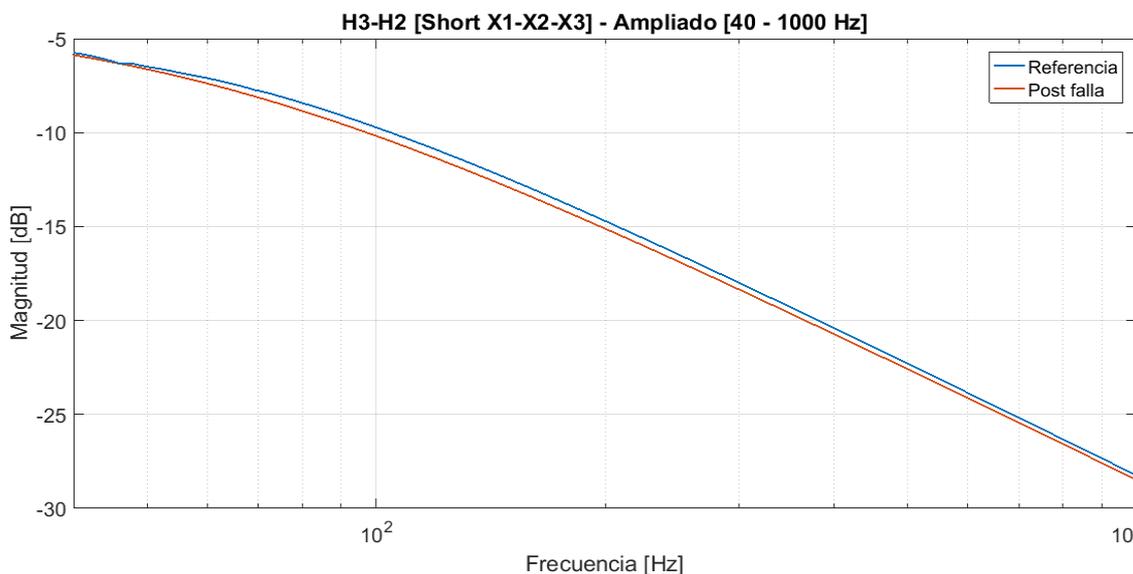


Figura 130: "Admitancia de cortocircuito, bobina H3-H2 (ampliado)".

En las fases sanas, la configuración de admitancia de cortocircuito no presentó variaciones significativas. En la fase central (Figura 129 y Figura 130), donde se produjo el desplazamiento del bobinado, la variación fue muy pequeña, imperceptible a simple vista. Se presentó de manera ampliada esta curva entre 40 Hz y 1 kHz para apreciar algo importante: En el bobinado en falla la curva se desplazó hacia abajo, producto de un aumento en la reactancia de dispersión, parámetro fuertemente influenciado al desplazar un bobinado respecto al otro.

Para una persona no entrenada en el ensayo de SFRA, un cambio tan pequeño puede pasar inadvertido, pero debe tenerse en cuenta que la reactancia de dispersión en valor porcentual, aumenta a medida que el transformador es de mayor dimensión, por lo que en una prueba real sobre un transformador de potencia, los cambios tenderían a ser más significativos.

El resto de la curva se mantuvo prácticamente inalterada.

6.8.2.3 Interdevanado capacitivo

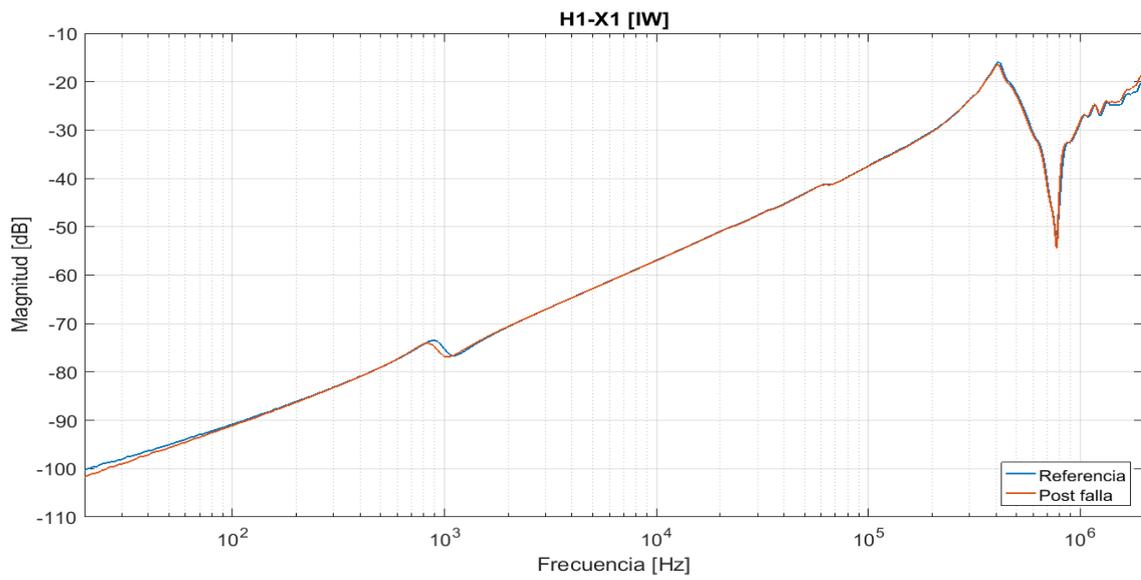


Figura 131: "Interdevanado capacitivo, H1-X1".

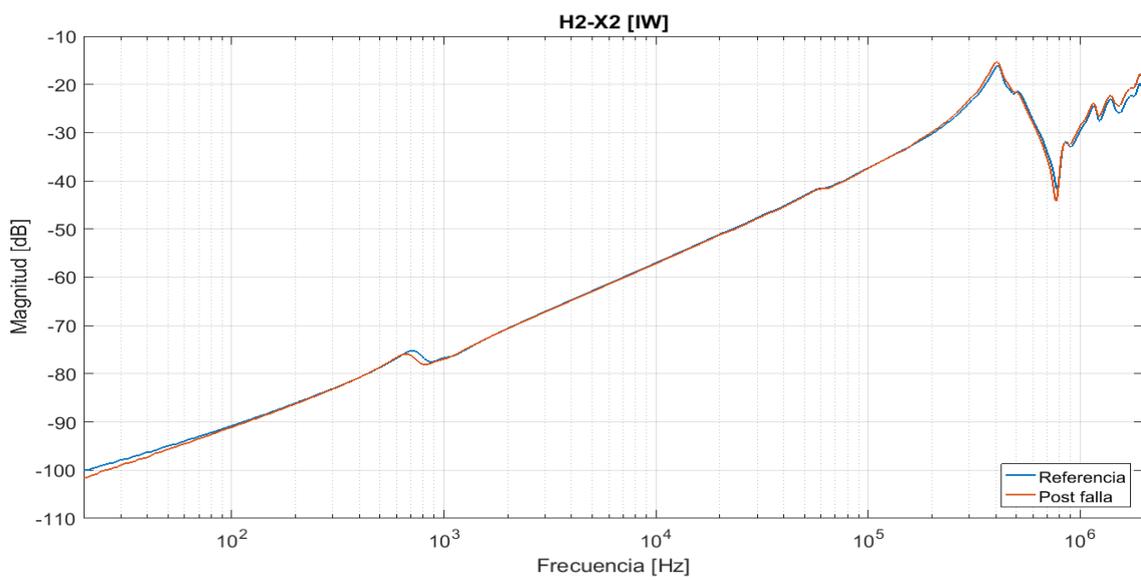


Figura 132: "Interdevanado capacitivo, H2-X2".

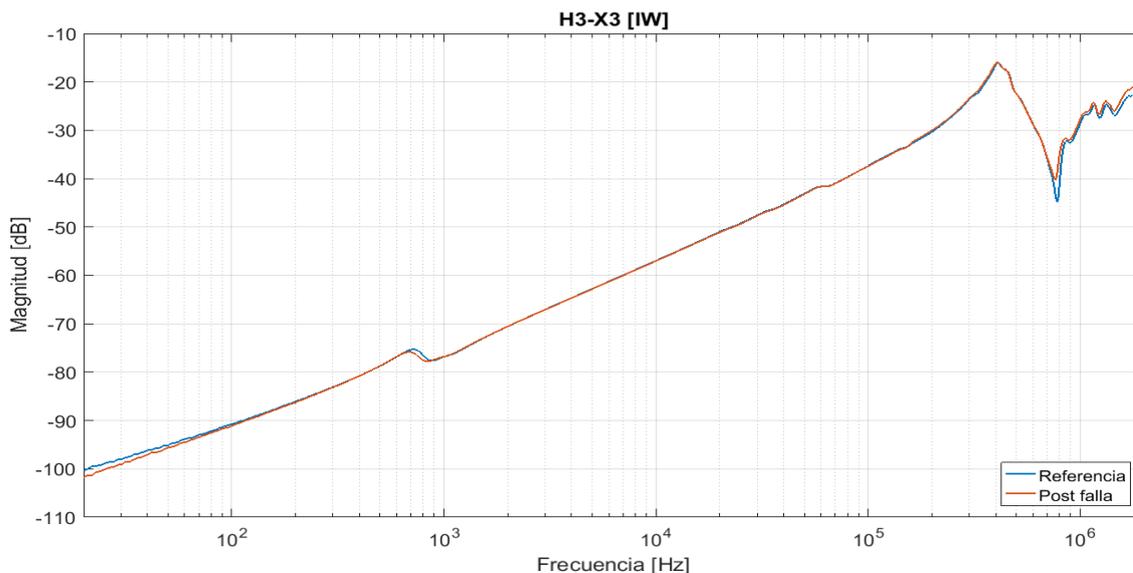


Figura 133: "Interdevanado capacitivo, H3-X3".

En este caso se presentaron variaciones similares en las tres fases. La curva se movió hacia abajo en la región de bajas frecuencias ($< 100 \text{ Hz}$), presentó alteraciones en su resonancia característica ($\cong 800 \text{ Hz}$) y también se modificó en el intervalo de altas frecuencias ($> 100 \text{ kHz}$). Estos cambios pueden ser entendidos teniendo en cuenta que el desplazamiento del bobinado de AT respecto al de BT afecta a las capacitancias interdevanado, principal parámetro analizado en esta configuración.

6.8.2.4 Interdevanado inductivo

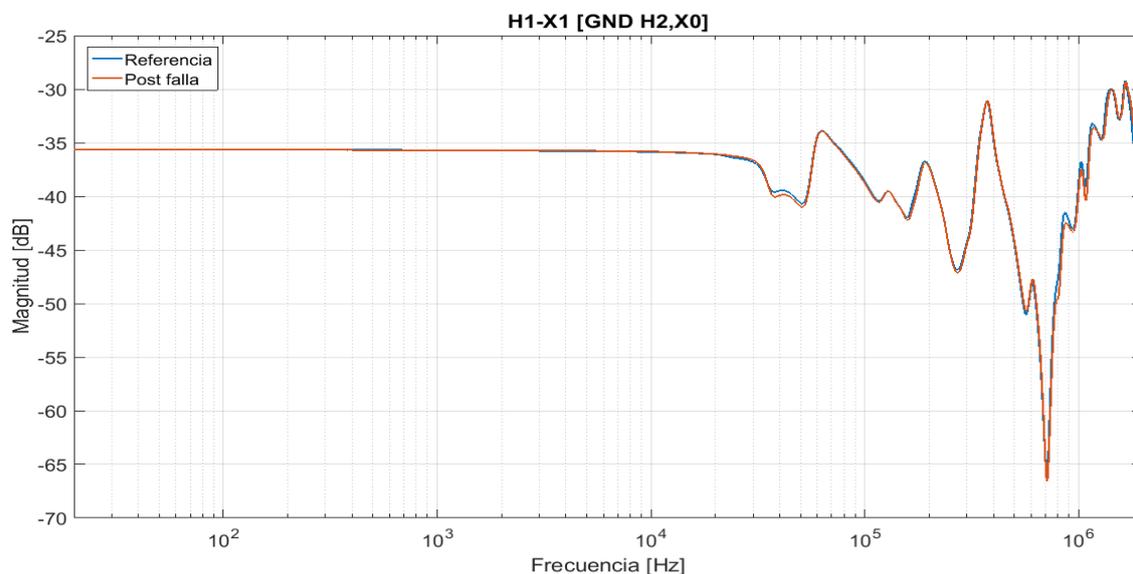


Figura 134: "Interdevanado inductivo, H1-X1".

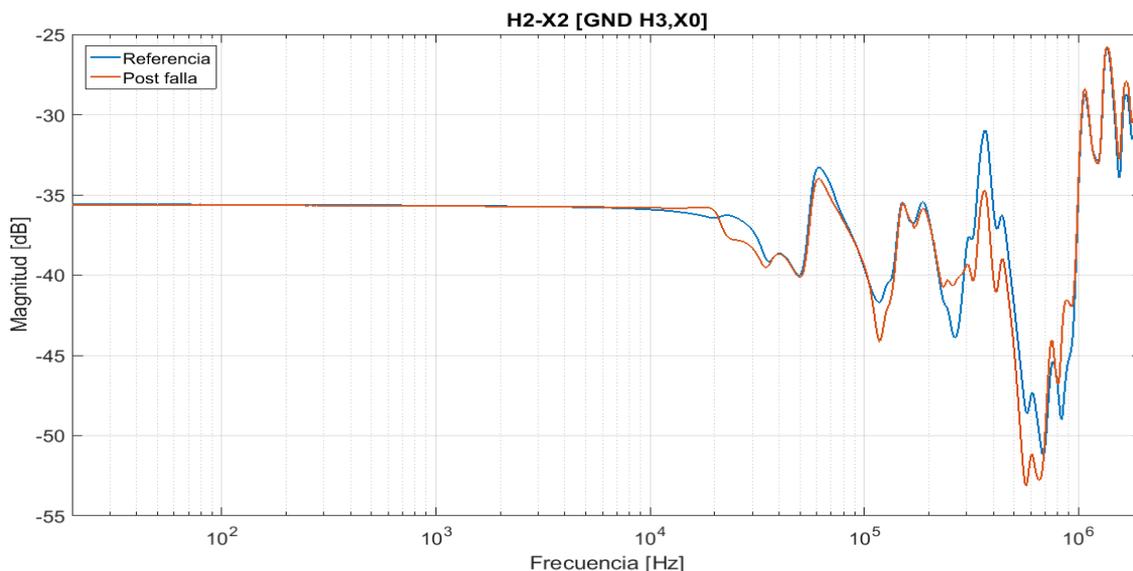


Figura 135: "Interdevanado inductivo, H2-X2".

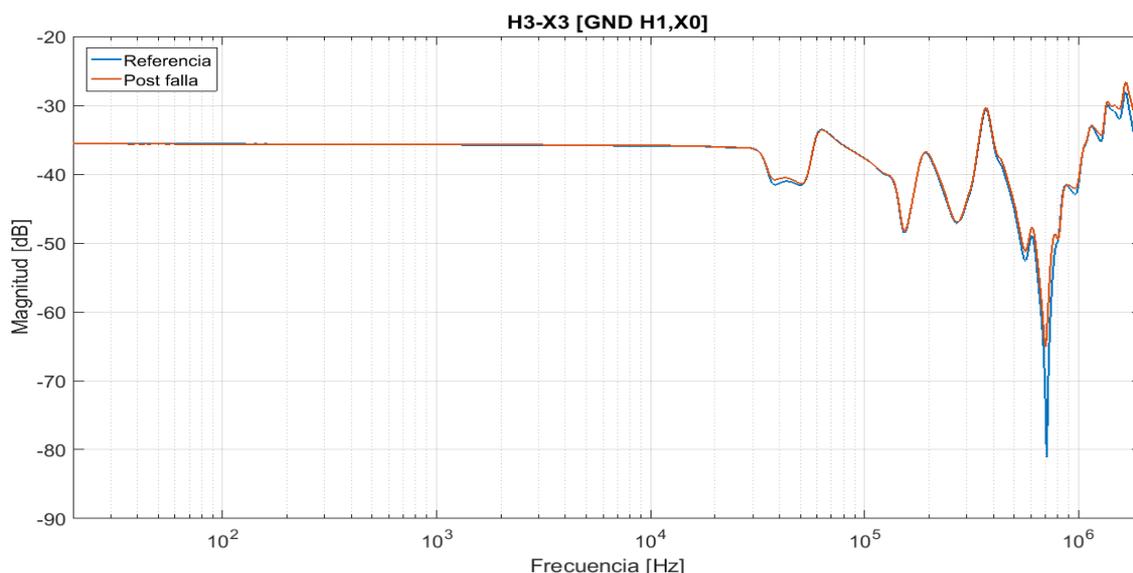


Figura 136: "Interdevanado inductivo, H3-X3".

En la región de frecuencias de interés, la configuración de interdevanado inductivo no se ve modificada. La relación de tensiones en vacío no cambia ante un desplazamiento de los bobinados. Ojo! En esta configuración al transformador se lo carga con 50Ω , si la reactancia de dispersión es comparable con este valor, sí se verán cambios de tensión en su secundario.

6.8.3 Análisis según IEEE C57.149

Tal como se indicó en el Capítulo 5, esta falla se encuadra en la norma dentro de "Desplazamiento del bobinado sin deformación". Fue analizada con detalle en la Tabla 5, y en la Tabla 19 se compara con los ensayos realizados en el transformador.

Tabla 19: "Comparación del desplazamiento de bobinado".

Rango de frecuencias	Configuración	¿Verifica?
20 Hz - 10 kHz	YCA	NO
	YCC	SI
5 kHz - 100 kHz	YCA - YCC	NO
50 kHz - 1 MHz	YCA - YCC	SI
> 1 MHz	YCA - YCC	SI

6.9 Dificultades encontradas a la hora de realizar los ensayos

6.9.1 Magnetización residual a causa del instrumento de ensayo

Al realizar las pruebas de SFRA sobre el transformador surgió la complicación de que el instrumento de ensayo, luego de aplicar la tensión de prueba y realizar el barrido en frecuencia, provocaba magnetización residual en el núcleo. Este fue un gran inconveniente por varios motivos:

- Primero, que al realizar dos barridos de idéntica configuración, uno a continuación del otro, no se obtenía repetitividad en las respuestas tanto de YCA como de YCC.
- Segundo, que las variaciones vistas al simular un modo de falla podrían ser atribuidas al efecto de esta magnetización.
- Tercero, que al momento en que se identificó esta perturbación, ya habían sido realizados muchos de los ensayos e indefectiblemente tuvieron que repetirse.

En los transformadores de potencia esto no representa un problema ya que los materiales que se utilizan son de mejor calidad y el núcleo es de mayor volumen, por lo que el equipo no es capaz de dejar un magnetismo residual.

La solución ante este inconveniente fue desmagnetizar el núcleo cada vez que se realizó un barrido, lo cual alargó mucho los tiempos que tomó realizar las pruebas. Se utilizó la función de desmagnetización del MTO 330 (Figura 109).

6.9.2 Efecto de las condiciones ambientales en los aislamientos interdevanado

Dado que el transformador bajo ensayo no tenía cuba ni aceite, la condición del aislamiento entre el devanado AT y BT era fuertemente influenciada por las condiciones atmosféricas. Esto se vio principalmente reflejado en la configuración de interdevanado capacitivo, cuya respuesta en bajas frecuencias se modificó con distintas condiciones de humedad, temperatura, etc.

En la Figura 137 se presentan tres barridos. Están identificados como 1, 2 y 3, y corresponden a curvas de IC tomadas en el estado sano, pero ante distintas condiciones atmosféricas. Los valores de temperatura y humedad no fueron registrados ya que el SFRA no dispone de un modelo para realizar correcciones por condiciones atmosféricas.

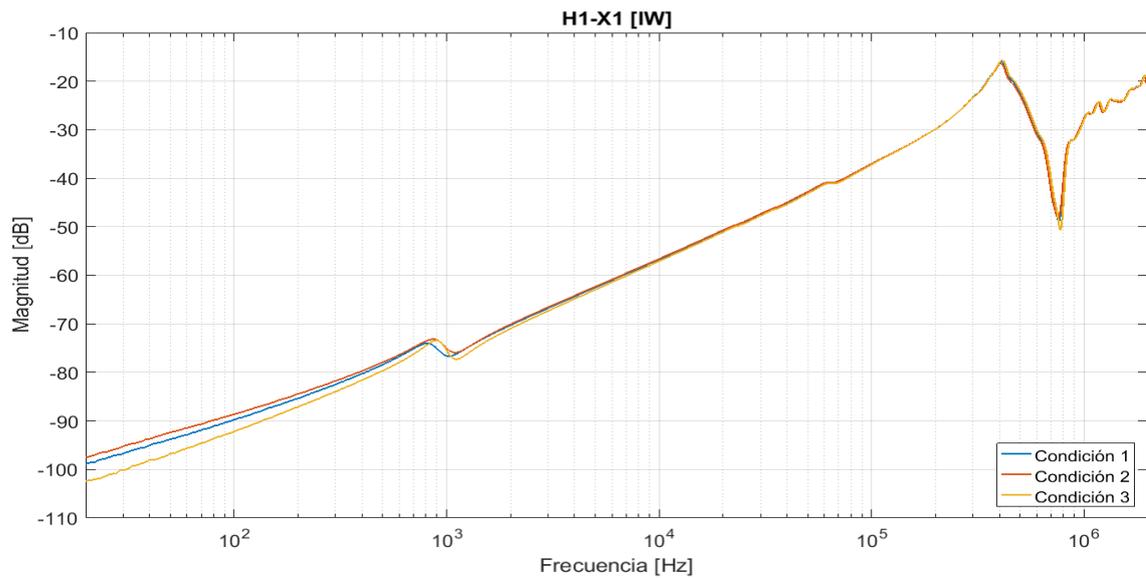


Figura 137: "Comparación de la curva de IC para distintas condiciones ambientales".

La solución frente a este inconveniente fue realizar las curvas de IC del estado sano y de cada uno de los modos de falla, el mismo día y con pequeñas diferencias de tiempo para que las condiciones atmosféricas no se modifiquen considerablemente.

Capítulo 7

Conclusiones

Se presentan las conclusiones generales del trabajo realizado y se comentan las conclusiones personales. Finalmente se exponen las futuras áreas de trabajo que pueden abordarse sobre la temática del FRA.

7.1 Conclusiones generales

Por medio de este trabajo se puso en evidencia que el SFRA es una herramienta de diagnóstico muy potente y que tiene gran capacidad para detectar diferentes condiciones de defectos que alteran las condiciones mecánicas de los transformadores. Este gran abanico de defectos que pueden ser localizados hace que la interpretación de las respuestas sea un proceso dificultoso, especialmente si el equipo bajo ensayo está afectado por varios defectos.

El objetivo principal de este trabajo fue verificar las respuestas que pueden presentar las curvas de SFRA ante distintos tipos de fallas. En base a las experiencias realizadas con el transformador prototipo, se puede concluir:

- a) Las fallas de cortocircuito entre espiras pueden ser fácilmente detectables realizando la configuración de YCA en todas las bobinas del transformador, encontrándose la espira en falla en aquel bobinado que presente mayores variaciones.
- b) Las fallas que impliquen devanados abiertos pueden ser reveladas por medio de la configuración de YCC en todos los bobinados, situándose la falla en aquel bobinado que presente mayores variaciones. Además puede verificarse esta información realizando la configuración de II sobre el bobinado.
- c) Los cambios en la reluctancia del núcleo son difícilmente detectables con la prueba de SFRA. Sin embargo, esta aseveración no es extensiva a todos los casos, sino que puede depender de la proporción de cambio de la reluctancia respecto a su valor en el estado sano.
- d) Las fallas que impliquen un núcleo aislado de tierra o una doble puesta a tierra pueden ser detectadas si se manifiestan cambios tanto en la resonancia principal del YCA como en altas frecuencias. En tal sentido, resulta muy difícil identificar de cuál de las dos fallas mencionadas se trata.
- e) Los defectos vinculados a desplazamientos de bobinados deben ser estudiados teniendo en cuenta que afectan principalmente a la reactancia de dispersión, por lo que la configuración más rica en información es la de YCC. Este modo de falla también se refleja en YCA y en menor medida en IC, si se ven modificadas las capacitancias interdevanado.
- f) Debe tenerse cuidado al analizar las curvas si se desconoce el posible magnetismo residual del transformador. Una evidencia de su existencia puede ser la variación de la curva de YCA, junto con un fuerte desplazamiento hacia arriba (disminución de impedancia) de la curva de YCC en la región de bajas frecuencias ($< 1 \text{ kHz}$). El ensayo de FRA debe precederse de una desmagnetización siempre que sea posible.
- g) En transformadores de pequeño porte, como pueden ser los de distribución, el equipo utilizado para realizar el ensayo puede llegar a aplicar una excitación tal que magnetice el transformador. En estos casos es conveniente disponer de equipos de ensayo que tengan una función de desmagnetización luego de realizado el barrido.

- h) Los transformadores conocidos como de aislamiento seco, que no tienen cuba ni aislamiento de aceite, deben ser cuidadosamente analizados a la hora de realizar los ensayos de FRA ya que la respuesta en frecuencia del IC podría modificarse con las condiciones ambientales.
- i) Empleando el transformador prototipo, y generando defectos de forma apropiada, se verificaron satisfactoriamente la mayoría de las condiciones de cada modo de fallo analizado por IEEE C57.149.
- j) La prueba de SFRA es útil como primer ensayo para tener un rápido panorama del estado de la máquina y actuar en consecuencia optimizando las pruebas subsecuentes.

Si bien las recomendaciones realizadas en este trabajo y en todas las publicaciones existentes sobre el SFRA pueden servir como una guía para la correcta interpretación de los resultados, resulta crítico el conocimiento, experiencia y nivel de entrenamiento del operador a la hora de diagnosticar los defectos en el transformador.

7.2 Conclusiones personales

El desarrollo de este trabajo fue llevado adelante mediante una serie de etapas enriquecedoras en distintos sentidos.

La fase inicial consistió en estudiar los fundamentos de la prueba de SFRA, así también como las normas e informes técnicos que tratan sobre el tema. Ese fue mi primer contacto en lo referente a interpretación y utilización de normas, las cuales son mucho más acotadas que los libros utilizados en la facultad.

La segunda etapa del trabajo consistió en realizar la prueba sobre transformadores reales, con el objetivo de obtener cierto grado de experiencia y entrenamiento en lo que respecta al ensayo. Esta experiencia fue muy enriquecedora ya que me demostró la enorme diferencia que existe entre el trabajo visto desde el punto de vista teórico y un verdadero ensayo, donde no sólo entra en juego el esfuerzo intelectual, sino también el físico.

Otro aspecto valioso que aprendí es que, al momento de realizar las pruebas, sobre todo en campo, pueden presentarse complicaciones y resultados inesperados, los cuales deben ser superados mediante decisiones basadas en el conocimiento y la experiencia, y donde no son tolerados los errores.

En la etapa de realización de ensayos pude conocer una fábrica de transformadores. Allí tomé dimensión de que aún estando próximo a recibirme, y estando bastante abocado a la temática de transformadores, mis conocimientos sobre el tema eran muy básicos. La carrera de grado nos instruye solo en los conocimientos principales y somos nosotros los que tenemos que continuar estudiando para obtener un conocimiento integral sobre nuestro tema de interés.

Finalmente, durante la etapa de escritura me vi obligado a rever todos los aspectos de la prueba y los resultados obtenidos, labor que me permitió afianzar y englobar fuertemente todos los conocimientos adquiridos.

7.3 Futuras líneas de trabajo

Si bien el objetivo de este trabajo ha sido cumplido satisfactoriamente y despeja algunas incógnitas sobre el tema tratado, de forma simultánea, genera nuevas preguntas, nuevas ideas y abre nuevas vías de trabajo. En este apartado se presentan algunas líneas de investigación que pueden ser objeto de interés, atendiendo al análisis expuesto en el presente trabajo.

Una posibilidad sería realizar un modelo numérico que represente al modelo físico utilizado en el trabajo, con el objetivo de predecir los cambios que se manifestaron en las curvas y poder simular otros tipos de fallas.

Otra posible línea de trabajo sería realizar una abundante cantidad de ensayos en transformadores de potencia, con el fin de validar y extrapolar los resultados obtenidos en nuestro modelo físico.

También sería un aporte significativo un estudio más profundo de la magnetización en el transformador y su influencia en el SFRA, con el objetivo de desarrollar un instrumento que desmagnetice el núcleo de manera eficiente antes de realizar el barrido en frecuencia.

Referencias

1. IEEE C57.149-2012: "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers".
2. CIGRÉ Technical Brochure nº 642 WG A2.37: "Transformer Reliability Survey". December 2015.
3. M.C. Rodrigo Ocón V.: "Análisis de Respuesta en frecuencia de transformadores". CIGRÉ, 6 de Junio 2007.
4. DL/T 911-2004 "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers" – The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China.
5. CIGRÉ Technical Brochure nº 342 WG A2.26: "Mechanical-Condition Assessment of Transformer windings using frequency response analysis (FRA)". April 2008.
6. IEC 60076-18-2012: "Power Transformers - Measurement of Frequency Response".
7. Jorge, Correa: "Respuesta de Frecuencia de Barrido (SFRA)" Megger, revista Electroindustria, Junio 2009.
8. Stephen J. Chapman: "Máquinas eléctricas". 5ta Edición, McGraw Hill.
9. Steven D. Mitchell, James S. Welsh: "Modeling Power Transformers to Support the Interpretation of Frequency-Response Analysis" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, N°4, October 2011.
10. Steven D. Mitchell, James S. Welsh: "Estimation of Physical Transformer Parameters from Frequency Response Analysis". 2011 IEEE Trondheim PowerTech.
11. CIGRÉ Technical Brochure nº 445 WG A2.34: "Guide for transformer maintenance". February 2011.
12. Jorge N. L. Sacchi - Alfredo Rifaldi: "Técnica de alta tensión - especificaciones de ensayos de alta tensión".
13. K. FESER, C. NEUMANN, T. LEIBFRIED, M. LOPPACHER: "The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers after Transport, Short Circuit or 30 Years of Service". CIGRÉ 2000. Haefely High voltage test.
14. Katsuhiko Ogata: "Ingeniería de control moderna". 5ta Edición.
15. S. Tenbohlen and S. A. Ryder: "Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods". XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.

16. Raúl Alvarez: "Análisis de la condición mecánica de transformadores de potencia. Mitos y realidades del ensayo de SFRA". Webinar, Megger. 2016.
17. IEEE Std C57.152™ - 2013: "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors". March 2013.
18. IEC 60076-1-2011: "Power Transformers - General".
19. Norberto A. Lemozy: "Ensayo de Transformadores". Apunte de cátedra Máquinas Eléctricas I. UTN-FRBA.
20. Jill Duplessis: "Frequency response of stray losses in transformers". Megger. January 2017.