

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**DETECCIÓN DE DEFORMACIONES INTERNAS EN TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA MAYORES A 1 MVA, APLICANDO LA PRUEBA DE BARRIDO DE  
FRECUENCIA (SFRA).**

PRESENTADO POR:

**JOSUÉ ANTONIO MARTÍNEZ QUINTEROS  
MIGUEL ÁNGEL VILLALTA ORDÓÑEZ**

PARA OPTAR AL TITULO DE:  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2025

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

TITULO:

**DETECCIÓN DE DEFORMACIONES INTERNAS EN TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA MAYORES A 1 MVA, APLICANDO LA PRUEBA DE BARRIDO DE  
FRECUENCIA (SFRA).**

PRESENTADO POR:

**JOSUÉ ANTONIO MARTÍNEZ QUINTEROS**

**MIGUEL ANGEL VILLALTA ORDOÑEZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

**MSc. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ**

SAN SALVADOR, OCTUBRE DEL 2025

TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

**MSc. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ**

## NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, lunes 27 de octubre de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 1:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle  
Director

  
Firma

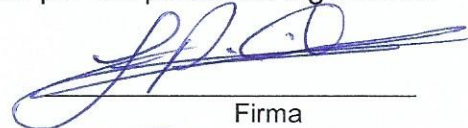


2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

  
Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ  
(Docente Asesor)

  
Firma

- ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ

  
Firma

- ING. GERARDO MARVIN JORGE HERNÁNDEZ

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DETECCIÓN DE DEFORMACIONES INTERNAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MAYORES A 1 MVA, APLICANDO LA PRUEBA DE BARRIDO DE FRECUENCIA (SFRA)

A cargo de los Bachilleres:

- MARTÍNEZ QUINTEROS JOSUÉ ANTONIO
- VILLALTA ORDÓÑEZ MIGUEL ÁNGEL

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.5  
(Nueve punto cinco)

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por su guía y fortaleza en cada etapa de este camino. Todo logro y aprendizaje provienen de Su voluntad y propósito perfecto.

A mi madre, por su amor incondicional, por cada desvelo y por acompañarme siempre con esfuerzo y dedicación.

A mi padre, por su apoyo económico y por estar presente cuando más lo necesité.  
A Griselda Maravilla, mi compañera, amiga y futura esposa, por su apoyo constante, su paciencia y su cariño inquebrantable. Su presencia ha sido un pilar fundamental en esta etapa de mi vida.

A José López y Dennis Álvarez, por tenderme la mano y apoyarme económicamente en los momentos más difíciles del camino.

A Reina Vides, por su apoyo y disposición durante el desarrollo de este proceso académico.

A mi compañero y amigo Miguel Villalta, por su compromiso y dedicación en la realización de este trabajo. Su esfuerzo conjunto hizo posible culminar este proyecto.

A nuestro asesor, MSc. Luis Chévez, por su orientación, tiempo y valiosas sugerencias para fortalecer el contenido técnico del trabajo.

Finalmente, a los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, por su enseñanza y ejemplo.

**Josué Martínez**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, agradezco por guiar mi camino incluso en los momentos más difíciles, recordándome que cada prueba forma parte de un propósito mayor. Confío plenamente en que sus planes son perfectos, porque en el orden mismo del cosmos se refleja su infinita inteligencia.

A mi madre y a su esposo, por todo su apoyo incondicional y todo su sacrificio a lo largo de este recorrido. Aun en los momentos de dificultad, su respaldo siempre estuvo presente para ayudarme a alcanzar este objetivo.

A mi padre, por cuidar los caminos de mi juventud con su disciplina y corrección.

A Reina Vides, a quien aprecio profundamente por su incansable apoyo durante todo este proceso. Su calidad humana y su constante disposición a ayudar representan una gran bendición para toda la comunidad de la EIE.

A nuestro asesor, MSc. Luis Chévez, por su valioso tiempo y dedicación para desarrollar este tema de la mejor manera. Sus observaciones, sugerencias y guía fueron un pilar fundamental para la realización de este trabajo.

A mi compañero y amigo, Josué Quinteros, a quien aprecio. Por su compromiso y dedicación, que hicieron posible sacar adelante este trabajo en conjunto.

Finalmente, a todos los docentes que, durante la carrera, fueron una fuente constante de inspiración

**Miguel Villalta**

## **AGRADECIMIENTOS ESPECIALES**

**A Distribuidora de Electricidad DELSUR, S.A. de C.V.**, por abrir sus puertas y proporcionar información técnica de alto valor, posibilitando el análisis de un caso real, contribuyendo significativamente al fortalecimiento de este trabajo de tesis.

# INDICE DE CONTENIDO

Glosario .....	6
ABSTRACT (RESUMEN) .....	9
Palabras clave .....	9
CAPITULO 1. PERFIL DEL PROYECTO. ....	10
1.1 Descripción del tema. ....	10
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1 Objetivo general. ....	10
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Alcances.....	11
1.4 Antecedentes.....	12
1.5 Planteamiento del problema. ....	13
1.6 Justificación .....	14
1.7 Resultados esperados.....	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	15
2.1 El Transformador.....	15
2.1.1 Principios de Funcionamiento de un transformador.....	15
2.1.2 Transformadores de Potencia .....	16
2.1.3 Componentes Estructurales .....	17
2.1.4 Tipos de Transformadores de Potencia .....	22
2.1.5 Fallas Comunes en Transformadores. ....	25
2.2 Pruebas Convencionales en Transformadores de Potencia .....	27
2.2.1 Pruebas Eléctricas Estándar .....	27
2.2.2 Pruebas Físico-Químicas.....	27
2.3 Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA).....	28
2.3.1 Fundamentos Teóricos .....	28
2.3.2 Fundamentos del análisis de respuesta en frecuencia de un transformador mediante el modelado de circuitos. ....	33
2.3.3 Modelos Eléctricos y Electrónicos.....	50
2.3.4 Principios del Barrido de Frecuencia (SFRA).....	51
2.3.5 Interpretación de Resultados SFRA .....	52
2.4 NORMALIZACIÓN DE LA PRUEBA SFRA .....	53

2.4.1 IEC 60076-18 (Ed. I, Julio 2012).....	53
2.4.2 Norma DL/T 911 .....	57
2.4.3 Otras Normativas Relevantes .....	61
<b>CAPÍTULO 3: SITUACIÓN ACTUAL DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN EL SALVADOR .....</b>	<b>64</b>
3.1 Marco Regulatorio del Sector Eléctrico Salvadoreño.....	64
3.1.1 Ley General de Electricidad.....	66
3.1.2 Reglamento de la Ley General de Electricidad.....	67
3.1.3 Normas Técnicas Emitidas por SIGET .....	67
3.1.4 Rol de la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET).....	68
3.2 Procesos de Adquisición e Importación de Transformadores.....	69
3.2.1 Modelos de Contratación .....	70
3.3 Procedimientos Actuales de Puesta en Servicio .....	73
3.3.1 Descripción del transformador bajo estudio.....	74
3.3.2 Fase Previa: Verificación Mecánica y Condiciones del Equipo .....	75
3.3.3 Ensayos Eléctricos y Pruebas Funcionales.....	76
3.3.4 Integración y Comunicación .....	77
3.3.5 Validación Final y Energización .....	77
3.4 Estadísticas de Fallas en Transformadores .....	77
3.4.1 Situación en El Salvador .....	78
3.4.2 Referencias Internacionales: SAIDI y SAIFI.....	82
3.4.3 Aplicación Local y Mejores Prácticas.....	83
3.5 Costos Asociados a Transformadores.....	83
3.5.1 Costos de Adquisición.....	83
3.5.2 Costos de Transporte e Instalación.....	85
3.5.3 Costos de Pruebas Convencionales .....	85
3.5.4 Costos por Fallas y Reemplazo .....	86
<b>CAPÍTULO 4: APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PRUEBA SFRA .....</b>	<b>87</b>
4.1 Equipos Utilizados para Pruebas SFRA .....	87
4.1.1 Normas y Guías Aplicables.....	90
4.2 Casos de Estudio.....	92
4.2.1 Transformador ABB Subestación Ateos Del SUR .....	92

4.2.2 Transformadores en Operación .....	97
4.2.3 Resultados y análisis de pruebas a transformadores .....	101
4.2.4 Transformadores con Fallas Conocidas .....	113
4.3 Comparativa de Resultados .....	126
4.3.1 SFRA vs Pruebas Convencionales .....	126
4.3.2 Análisis de Sensibilidad y Efectividad.....	144
<b>CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE NORMATIVA.....</b>	<b>146</b>
5.1 Estructura de la Normativa Propuesta .....	146
5.2 Contexto Normativo y Técnico.....	146
5.2.1 Fundamentos normativos .....	146
5.2.2 Justificación técnica .....	147
5.3 Procesos de Compra, Transporte y Garantías .....	148
5.3.1 Cadena de suministro .....	148
5.3.2 Garantías.....	148
5.3.3 Pólizas de seguro.....	148
5.4. Datos Económicos de Referencia .....	149
5.5 Análisis Económico .....	149
5.5.1 Caso 1 – Transformador 1 MVA.....	149
5.5.2 Caso 2 – Transformador 7.5 MVA.....	150
5.6 Discusión y Valor Umbral de Obligatoriedad .....	152
5.7 Conclusiones Parciales .....	152
5.8 Conclusión General.....	152
<b>CAPÍTULO 6: PROPUESTA NORMATIVA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PRUEBA SFRA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN EL PROCESO DE COMISIONAMIENTO .....</b>	<b>153</b>
6.1 Objetivo de la Propuesta Normativa.....	153
6.2 Alcance .....	154
6.3 Procedimiento de Ensayo.....	154
6.3.1. Preparación del equipo .....	154
6.3.2. Conexiones recomendadas .....	155
6.3.3. Rango de frecuencia .....	155
6.3.4. Curvas de análisis.....	155
6.4 Índices de Evaluación .....	155

6.5 Criterios de Aceptación o Rechazo.....	156
6.6 Justificación Económica y Técnica.....	157
6.7 Recomendaciones Normativas Finales .....	157
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>159</b>
7.1 Conclusiones.....	159
7.2 Recomendaciones .....	160
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>164</b>
ANEXO A.....	164
ANEXO B.....	165
ANEXO C.....	170

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<b>Figura 1.</b> Esquema del principio de funcionamiento de un transformador con devanado primario y secundario. Extraído de (China Electric Power Research Institute, 2004).....	15
<b>Figura 2.</b> Transformador de potencia utilizado sistemas eléctricos de alta tensión. 115/46kV.....	16
<b>Figura 3.</b> Tipologías constructivas de Transformadores: Tipo núcleo y acorazado. Extraído (Chapman, 2012) .....	18
<b>Figura 4.</b> Respuesta en frecuencia típica de un transformador mostrando resonancias y antirresonancias características en el rango de frecuencias de análisis SFRA. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020).....	29
<b>Figura 5.</b> Curva típica de prueba SFRA. Adaptado de Feasibility study on the detection of turn-to-turn fault severity in the transformer winding by frequency response analysis and numerical indices (Samimi, Faiz, & Ghasemi Parchini, 2023). .....	31
<b>Figura 6.</b> Curva típica de prueba SFRA con secundario cortocircuitado, se muestra la región influenciada por el canal de fuga (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020) ...	32
<b>Figura 7.</b> Red de escalera LC de elementos concentrados de n etapas de un devanado de núcleo de aire único. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020).....	35
<b>Figura 8.</b> Comparación de respuestas SFRA entre devanados de baja tensión (LV) y alta tensión (HV) mostrando frecuencias de resonancia características identificadas. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020).....	36
<b>Figura 9.</b> Control de voltaje en devanado tipo disco: continuo, con vuelta de blindaje (inter-shield) e intercalado (interleaved). Fuente: Mohammed (2011), PEguru.....	40
<b>Figura 10.</b> Configuración física de devanados de transformador (a) y su representación mediante circuito equivalente de elementos distribuidos (b) para análisis SFRA. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020).....	42
<b>Figura 11.</b> Espectros de amplitud y fase de los devanados de alta tensión (HV) y baja tensión (LV) en un transformador monofásico. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020).....	44
<b>Figura 12.</b> Circuito equivalente de un transformador monofásico. Extraído de (Chapman, 2012).....	44
<b>Figura 13.</b> Circuito de un transformador a altas frecuencias (Megger, Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA. 2016).....	45
<b>Figura 14.</b> Modelo de cuadripolos de un transformador (Megger, Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA. 2016). .....	46
<b>Figura 15.</b> El transformador como cuadripolo. ....	46

<b>Figura 16.</b> Grafica típica de la magnitud de la respuesta en frecuencia obtenida en pruebas SFRA (Megger, Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA. 2016).....	48
<b>Figura 17.</b> Grafica de la fase de respuesta de frecuencia (Megger, Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA. 2016). .....	49
<b>Figura 18.</b> Comportamiento grafico de la respuesta de frecuencia (Megger, Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA. 2016).....	49
<b>Figura 19.</b> Configuraciones básicas de conexión para la prueba SFRA. Extraído de (CIGRÉ Working Group A2.26, 2008).....	56
<b>Figura 20.</b> Segmentación por bandas de frecuencia para análisis. Extraído de (Megger, Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA. 2016). ....	60
<b>Figura 21.</b> Transformador de potencia ABB instalado en campo, durante labores de conexionado.....	73
<b>Figura 22.</b> Placa de características del transformador trifásico ABB inmerso en éster vegetal.....	74
<b>Figura 23.</b> Punto de izaje del tanque del transformador ABB, donde se observan marcas de fricción y oxidación superficial, indicativas de esfuerzos mecánicos durante el transporte o instalación. ....	78
<b>Figura 24.</b> Detalle del punto de izaje lateral del transformador ABB, donde se observa corrosión superficial y desgaste por fricción, posibles indicadores de esfuerzos mecánicos no controlados durante el izaje o traslado del equipo. ....	79
<b>Figura 25.</b> Evidencia de oxidación circular en la base del transformador ABB, posiblemente originada por fricción o microdeslizamientos durante el izaje o transporte del equipo. ....	80
<b>Figura 26.</b> Punto de izaje superior del tanque del transformador ABB, identificado con el símbolo de cadena. Se observa el rótulo de presurización con nitrógeno y leves marcas de desgaste en la superficie metálica.....	82
<b>Figura 27.</b> Analizador de barrido de frecuencia Omicron FRANEO 800. ....	87
<b>Figura 28.</b> Diagrama de bloques del sistema de medición SFRA mostrando la configuración de equipos y conexiones para la adquisición de datos de respuesta en frecuencia.....	89
<b>Figura 29.</b> Esquema de conexión para prueba SFRA en transformador monofásico mostrando generador, referencias de $50\Omega$ y puntos de medición en los devanados. Extraído de (Islam, Khan, & Hoque, 2011).....	93
<b>Figura 30.</b> Curva SFRA H1–H3 .....	101
<b>Figura 31.</b> Curva SFRA H2–H1 .....	103
<b>Figura 32.</b> Curva SFRA H3–H2 .....	105
<b>Figura 33.</b> Curva SFRA X1–X0 .....	107
<b>Figura 34.</b> Curva SFRA X2–X0.....	109
<b>Figura 35.</b> Curva SFRA X3–X0.....	111

<b>Figura 36.</b> Caso 1 Mediciones de circuito abierto en devanados en serie. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	114
<b>Figura 37.</b> Caso 1 Mediciones de circuito abierto en devanados comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	115
<b>Figura 38.</b> Caso 2 Mediciones de circuito abierto de devanados en serie y comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020).....	116
<b>Figura 39.</b> Caso 2 Mediciones de circuito abierto de devanados terciarios. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	116
<b>Figura 40.</b> Caso 2 Mediciones de cortocircuito de devanados comunes con devanados terciarios en cortocircuito. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020).....	117
<b>Figura 41.</b> Caso 2 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020).....	118
<b>Figura 42.</b> Caso 3 Mediciones de circuito abierto en los devanados comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	119
<b>Figura 43.</b> Caso 3 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020).....	119
<b>Figura 44.</b> Caso 4 Mediciones de circuito abierto en los devanados en serie. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	121
<b>Figura 45.</b> Caso 3 Mediciones de circuito abierto en los devanados comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	122
<b>Figura 46.</b> Caso 3 Mediciones de circuito abierto del devanado estabilizador. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	123
<b>Figura 47.</b> Caso 4 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020).....	124
<b>Figura 48.</b> Mediciones de circuito abierto de alta tensión del caso 5. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020) .....	125
<b>Figura 49.</b> Caso 8 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020).....	126
<b>Figura 50.</b> Curva SFRA AC–BA .....	128
<b>Figura 51.</b> Curva SFRA AC–CB .....	131
<b>Figura 52.</b> Curva SFRA BA–CB .....	133
<b>Figura 53.</b> Curva SFRA a1n1–b1n1 .....	136
<b>Figura 54.</b> Curva SFRA a1n1–c1n1.....	139
<b>Figura 55.</b> Curva SFRA b1n1–c1n1 .....	142

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Comparación de configuraciones de devanado tipo disco y su comportamiento eléctrico .....	41
<b>Tabla 2.</b> Configuraciones de medición utilizadas en la prueba de Respuesta en Frecuencia (SFRA) .....	55
<b>Tabla 3.</b> Análisis de Problemas Previos y Soluciones Proporcionadas por la Norma DL/T 911 .....	58
<b>Tabla 4.</b> Costos de adquisición referenciales de transformadores de potencia y servicios asociados en El Salvador. ....	84
<b>Tabla 5.</b> Comparación de características técnicas del analizador FRANEO 800 frente a otros equipos SFRA.....	89
<b>Tabla 6.</b> Configuraciones de conexión utilizadas en la prueba SFRA y sus objetivos principales.....	92
<b>Tabla 7.</b> Resultados e interpretación de pruebas eléctricas convencionales en el transformador de potencia. ....	95
<b>Tabla 8.</b> Registro del plan de mediciones SFRA .....	98
<b>Tabla 9.</b> Significado de cada columna de la tabla 4.....	98
<b>Tabla 10.</b> Configuración de los rangos de frecuencia para el ensayo SFRA. ....	99
<b>Tabla 11.</b> Significado de cada columna de la Tabla 6.....	100
<b>Tabla 12.</b> Ficha de especificación medición entre las fases H1 y H3 del devanado de Alta Tensión.....	102
<b>Tabla 13.</b> Ficha de especificación medición entre las fases H2 y H1 del devanado de Alta Tensión.....	104
<b>Tabla 14.</b> Ficha de especificación medición entre las fases H3 y H2 del devanado de Alta Tensión.....	106
<b>Tabla 15.</b> Ficha de especificación medición entre el terminal X1 (fase A) y el neutro X0 del devanado de Baja Tensión (Low Voltage). ....	108
<b>Tabla 16.</b> Ficha de especificación medición entre el terminal X2 (fase B) y el neutro X0 del devanado de Baja Tensión (Low Voltage). ....	110
<b>Tabla 17.</b> Ficha de especificación medición entre el terminal X3 (fase C) y el neutro X0 del devanado de Baja Tensión (Low Voltage). ....	112
<b>Tabla 18.</b> Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración AC-BA.....	129
<b>Tabla 19.</b> Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración AC-BA.....	130
<b>Tabla 20.</b> Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración AC-CB.....	132
<b>Tabla 21.</b> Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración AC-CB.....	133
<b>Tabla 22.</b> Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración BA-CB.....	134

<b>Tabla 23.</b> Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración BA-CB.....	135
<b>Tabla 24.</b> Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración a1n1-b1n1.....	137
<b>Tabla 25.</b> Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración a1n1-b1n1.....	138
<b>Tabla 26.</b> Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración a1n1-c1n1.....	140
<b>Tabla 27.</b> Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración a1n1-c1n1.....	141
<b>Tabla 28.</b> Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración b1n1-c1n1.....	143
<b>Tabla 29.</b> Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración b1n1-c1n1.....	144
<b>Tabla 30.</b> Estimación económica de referencia para transformadores de distinta capacidad .....	149
<b>Tabla 31.</b> Parámetros de interpretación de la respuesta en frecuencia del transformador.	156

## Glosario

### **Aislamiento dieléctrico.**

Material que impide el paso de corriente eléctrica y mantiene separadas las partes energizadas del transformador.

### **Análisis SFRA (Sweep Frequency Response Analysis).**

Método de diagnóstico que analiza la respuesta en frecuencia para detectar deformaciones mecánicas internas en el transformador.

### **Armonía magnética.**

Equilibrio del flujo magnético entre núcleo y devanados bajo condiciones normales de operación.

### **Autoinducción.**

Fenómeno en el cual una corriente variable induce un voltaje en el mismo conductor por el que circula.

### **Baja frecuencia.**

Rango de frecuencia SFRA donde domina la inductancia de magnetización del núcleo.

### **Bobina.**

Conductor enrollado que genera campo magnético cuando circula corriente por él.

### **Bobinado helicoidal (helical winding).**

Devanado continuo en forma helicoidal, utilizado en aplicaciones de alta corriente.

### **Bobinado intercalado (interleaved).**

Diseño de devanado donde los discos se alternan para incrementar la capacitancia serie y mejorar la distribución del campo eléctrico.

### **Bobinado tipo disco.**

Devanado conformado por discos apilados axialmente, común en transformadores de alta potencia.

### **Bushing.**

Aislador que permite el paso seguro de conductores a través del tanque del transformador.

### **Canal de fuga.**

Espacio físico entre y dentro de los devanados donde circula flujo magnético de fuga.

### **Capacitancia derivación (shunt).**

Capacidad eléctrica entre devanados y tierra o núcleo del transformador.

### **Capacitancia serie.**

Capacitancia entre segmentos del devanado consecutivos.

### **Circuito abierto.**

Condición SFRA donde el devanado no tiene carga conectada.

### **Circuito cerrado.**

Condición SFRA donde el devanado está en cortocircuito para evaluar el flujo de fuga.

### **Conexión delta ( $\Delta$ ).**

Arreglo de devanados en forma triangular, sin acceso al neutro.

**Conexión estrella (Y).**

Arreglo de devanados con punto neutro disponible para conexión a tierra.

**Conexión zig-zag.**

Arreglo especial para minimizar armónicos y balancear cargas.

**Conductores internos.**

Alambres o barras que constituyen físicamente los devanados del transformador.

**Corrientes parásitas (eddy currents).**

Corrientes inducidas en las laminaciones del núcleo que producen pérdidas y fuerzas desmagnetizantes.

**Deformación axial.**

Desplazamiento vertical de los devanados debido a esfuerzos mecánicos.

**Deformación radial.**

Cambio geométrico radial de los devanados producido por esfuerzos electromecánicos.

**Devanado primario.**

Bobina conectada a la fuente de alimentación.

**Devanado secundario.**

Bobina conectada a la carga..

**Efecto capacitivo.**

Comportamiento dominante en alta frecuencia debido a la capacitancia del sistema.

**Efecto inductivo.**

Comportamiento dominante en baja frecuencia asociado a inductancia del núcleo.

**Efecto piel (skin effect).**

Fenómeno donde la corriente se concentra en la superficie del conductor al aumentar la frecuencia.

**Ensayo en corto.**

Medición con el secundario en cortocircuito controlado.

**Ensayo en vacío.**

Medición con el secundario abierto.

**Falla entre espiras.**

Defecto debido a perforación del aislamiento entre conductores del mismo devanado.

**Flujo de fuga.**

Porción del flujo magnético que no se acopla mutuamente entre devanados.

**Frecuencia de resonancia.**

Punto donde la impedancia es máxima o mínima debido al equilibrio de inductancia y capacitancia.

**Impedancia eléctrica.**

Oposición al paso de corriente alterna, combinación de resistencia e inductancia.

**Inductancia de fuga.**

Inductancia asociada al flujo no acoplado entre bobinas.

**Inductancia de magnetización.**

Capacidad del núcleo para almacenar energía magnética.

**Laminaciones del núcleo.**

Placas ferromagnéticas aisladas que conforman el núcleo del transformador y reducen corrientes parásitas..

**Núcleo ferromagnético.**

Estructura metálica donde se concentra el flujo magnético del transformador.

**Ondas estacionarias eléctricas.**

Patrones de oscilación que se producen en el devanado por resonancia entre inductancia y capacitancia.

**Punto neutro.**

Conexión común en sistemas en estrella.

**Rango de media frecuencia.**

Región SFRA donde se analiza la interacción entre devanados.

**Red capacitiva.**

Conjunto de capacitancias distribuidas dentro del transformador.

**Región de alta frecuencia.**

Zona SFRA donde predomina el comportamiento capacitivo y el estado de bushings, conexiones y cables.

**Reluctancia magnética.**

Oposición al paso del flujo magnético.

**Respuesta en frecuencia.**

Curva que describe la relación entre impedancia del transformador y la frecuencia de prueba.

**Resonancia eléctrica.**

Punto de mínima o máxima impedancia debido al equilibrio de inductancia y capacitancia.

**Transformador tipo carcasa (shell-type).**

Diseño donde el núcleo rodea parcialmente a los devanados.

**Transformador tipo núcleo (core-type).**

Diseño donde los devanados rodean las columnas principales del núcleo.

**Vector de grupo.**

Clasificación del desplazamiento angular entre devanados (por ejemplo, Dy11, Yd1).

## ABSTRACT (RESUMEN)

El presente trabajo desarrolla un análisis técnico-económico de la adopción de la prueba de Respuesta en Frecuencia (SFRA) en la puesta en marcha de transformadores de potencia mayores a 1 MVA instalados en subestaciones eléctricas de El Salvador. Este estudio surge ante la necesidad de mejorar la confiabilidad operativa del sistema eléctrico nacional, dado que los métodos convencionales de ensayo —como las pruebas de relación de transformación, resistencia de devanados o corriente de excitación— presentan limitaciones para detectar deformaciones mecánicas o desplazamientos internos en los devanados ocasionados durante el transporte, izaje o montaje de los equipos.

La metodología integra tres ejes principales: el análisis teórico del principio de funcionamiento eléctrico y electromagnético de los transformadores, la evaluación comparativa entre pruebas convencionales y la técnica SFRA, y la estimación de los costos asociados a su implementación. Se obtuvieron datos experimentales de estudios realizados a un transformador nuevo propiedad de la Distribuidora de Electricidad DELSUR S.A de C.V, utilizando el analizador Franeo 800, también se realizó una revisión de los casos de estudio SFRA en transformadores con fallas conocidas, contenidas en el Technical Brochure 812 de CIGRE. siguiendo las configuraciones de ensayo establecidas en las normas IEC 60076-18 y DL/T 911, para validar su aplicabilidad en condiciones locales.

Los resultados demuestran que la prueba SFRA ofrece una alta sensibilidad para detectar desplazamientos axiales, torsión y deformaciones del núcleo o devanados, lo que permite prevenir fallas catastróficas y reducir los costos por interrupciones del servicio o reemplazo de equipos. El análisis económico evidencia que, si bien la incorporación inicial de esta prueba implica un costo adicional marginal en el proceso de comisionamiento, el beneficio obtenido por la disminución del riesgo de fallas y la extensión de la vida útil del transformador compensa ampliamente dicha inversión.

Finalmente, se propone una normativa técnica nacional que formalice la aplicación de la prueba SFRA en transformadores de potencia mayores a 1 MVA durante la fase de puesta en servicio, garantizando la alineación con estándares internacionales y fortaleciendo la confiabilidad del sistema eléctrico salvadoreño.

**Palabras clave:** SFRA, transformadores de potencia, análisis de respuesta en frecuencia, confiabilidad eléctrica, diagnóstico de transformadores.

# **CAPITULO 1. PERFIL DEL PROYECTO.**

## **1.1 Descripción del tema.**

El estudio evaluará la implementación de la prueba de Barrido de Frecuencia (Sweep Frequency Response Analysis, SFRA) como un requisito estándar en la puesta en marcha de transformadores de potencia con capacidad superior a 1 MVA en subestaciones de El Salvador. Se analizará su efectividad en la detección de desplazamientos mecánicos y deformaciones internas causadas por transporte, instalación o eventos eléctricos. Se estudiarán los modelos que históricamente se han desarrollado para la técnica de barrido en frecuencia para, determinar los principios eléctricos y electrónicos en los que se basa la tecnología, hasta su desarrollo con el equipamiento con el que se cuenta actualmente para desarrollar el presente estudio. Se estudiarán los procedimientos técnicos y administrativos que se realizan para la importación y/o compra de transformadores de potencia mayores a 1 MVA, así como los posibles casos en los que el transformador resulte dañado en su transporte tomando en cuenta sus costos adicionales y el costo de la prueba.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Analizar la detección de las deformaciones internas en transformadores de potencia mayores a 1 MVA, aplicando la prueba de barrido de frecuencia (SFRA)

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Examinar la normativa y estándares internacionales relacionados con la aplicación de la prueba SFRA (entre ellas: IEC 60076 -18 Ed. I: Power Transformer Part -18, July 2012, Norma DL/T 911)
- Identificar los costos asociados a la reparación de transformadores de potencia, basados en los resultados de las pruebas convencionales.
- Realizar un análisis financiero, considerando las diversas alternativas de detección de fallos en transformadores de potencia.
- Evaluar los resultados de la prueba de barrido en frecuencia, y su efectividad en la detección de desplazamientos y deformaciones internas de transformadores.
- Justificar la inclusión de la prueba SFRA, como parte del protocolo estándar en la puesta en servicio de transformadores mayores a 1 MVA.

### **1.3 Alcances.**

- Comprender las bases eléctricas y electrónicas de la tecnología utilizada en de Barrido de Frecuencia (SFRA), en el equipo que se utilizará.
- El estudio se enfocará en transformadores con capacidad superior a 1 MVA instalados en subestaciones eléctricas del país dependiendo del acceso que tengan el o los estudiantes y/o la Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- Se analizarán equipos nuevos y en operación para validar la efectividad del método, dependiendo del acceso que tengan el o los estudiantes y/o la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

- Se compararán los datos obtenidos con pruebas realizadas en estudios internacionales para determinar su aplicabilidad local por los costos de las pruebas versus los costos de aplicar pruebas convencionales.

#### **1.4 Antecedentes.**

El análisis de respuesta en frecuencia (FRA) —y su aplicación práctica como SFRA (Sweep Frequency Response Analysis)— surgió a finales del siglo XX como una técnica no invasiva para diagnosticar deformaciones mecánicas y desplazamientos de devanados en transformadores de potencia. Desde sus primeras aplicaciones en empresas de transmisión europeas y norteamericanas, SFRA se consolidó como complemento de las pruebas convencionales (relación de transformación, resistencia de devanados, corriente de excitación, DGA, etc.), aportando sensibilidad frente a cambios geométricos internos que las pruebas eléctricas estándar no detectan con facilidad.

Durante la década de 2000, diversos fabricantes de equipos de ensayo y organismos técnicos publicaron guías que estandarizaron procedimientos y criterios de interpretación. Esa madurez técnica quedó reflejada en la normalización internacional de la prueba mediante documentos como IEC 60076-18 y lineamientos IEEE, que definen configuraciones de conexión, rangos de barrido y buenas prácticas de comparación (huella de fábrica, unidad gemela o comparación entre fases). En paralelo, experiencias reportadas por utilities y laboratorios de alta tensión mostraron la correlación entre cambios en las curvas de respuesta y eventos como golpes durante transporte, esfuerzos por cortocircuitos externos, o aflojamiento de sujeciones internas—causas frecuentes de fallas tempranas tras la puesta en servicio.

En América Latina, la adopción de SFRA ha sido progresiva, primero en empresas de transmisión y generación con flotas de alta criticidad, y luego en distribuidoras que incorporaron la técnica en programas de diagnóstico, recepción de equipos y análisis post-evento. La motivación principal ha sido reducir la incertidumbre en el

comisionamiento y acotar riesgos de fallas catastróficas, integrando SFRA como evidencia técnica en garantías de fábrica y pólizas de transporte.

En El Salvador, los procedimientos de puesta en servicio se han apoyado históricamente en pruebas eléctricas y fisicoquímicas convencionales. Sin embargo, la sensibilidad limitada de estas frente a deformaciones mecánicas ha abierto la puerta a evaluar la incorporación de SFRA como práctica estándar en transformadores  $\geq 1$  MVA. Este trabajo se inserta en ese contexto: analiza los fundamentos eléctricos y electrónicos que dan forma a la “huella” de un transformador, revisa el marco normativo aplicable y contrasta el costo de aplicar SFRA frente a los costos potenciales de no detectar oportunamente daños por transporte o montaje. Además, aprovecha la disponibilidad local de instrumentos (p. ej., analizadores tipo FRAX) para validar en campo la metodología y generar evidencia que sustente una propuesta normativa nacional de comisionamiento con SFRA.

### **1.5 Planteamiento del problema.**

El transporte y la instalación de transformadores de potencia pueden causar desplazamientos internos en las bobinas, deformaciones en el núcleo o aflojamiento de estructuras, lo que compromete su vida útil y desempeño. Actualmente, en El Salvador, los métodos de puesta en servicio convencionales pueden no ser suficientes para identificar estas anomalías antes de la puesta en servicio. Aunque sea más económicos, no se ha determinado los posibles costos que se incurrirían en la realización de una prueba más precisa y menos invasiva en la determinación de dichas posibles fallas de transporte, que influyen en la vida útil del transformador y/o su posible falla cuando este en servicio activo, lo cual incrementaría los costos exorbitantes para todos los participantes del mercado e industria eléctrica. La implementación de la prueba SFRA como un procedimiento estándar de puesta en servicio, permitiría detectar problemas mecánicos antes de que afecten la operación del transformador, reduciendo el riesgo de fallas catastróficas y mejorando la confiabilidad del sistema eléctrico nacional.

## **1.6 Justificación**

La prueba SFRA mejora la puesta en marcha de transformadores al detectar daños estructurales antes de la puesta en servicio, reduciendo costos de mantenimiento y fallas inesperadas o inclusive catastróficas. Su implementación en El Salvador alinearía los procedimientos con normas internacionales. Además, se cuenta con datos de prueba realizada con el dispositivo Franeo 800, en un transformador nuevo propiedad de la Distribuidora de Electricidad DELSUR S.A. de C.V. lo que permite validar la metodología con pruebas reales y analizar su viabilidad técnica. Además, no se tiene conocimiento del funcionamiento eléctrico/electrónico que necesita tener el medidor por barrido de frecuencia a nivel de análisis de circuitos y tampoco del costo de la adquisición de transformadores de potencia y las pruebas convencionales que se aplican, así como; el costo de realizar las pruebas convencionales y las pruebas que investigaremos en el presente estudio.

## **1.7 Resultados esperados**

- Determinar la relación de costo / beneficio que implica adoptar la prueba de barrido en frecuencia para transformadores de potencia mayor a 1 MVA, versus las pruebas convencionales que se aplican en la actualidad.
- Determinación de la reducción del riesgo de fallas mecánicas en transformadores debido a daños no detectados en el transporte o instalación.
- Determinación de la efectividad de la prueba en barrido en frecuencia versus los métodos convencionales de prueba.
- Informe de la realización de la aplicación de metodología de prueba propuesta en casos reales.
- Propuesta de norma nacional para la prueba de barrido en frecuencia (SFRA) como una herramienta efectiva para la detección de fallas mecánicas en transformadores de potencia mayor a 1 MVA.
- Documento de trabajo de graduación
- Artículo científico

# CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

## 2.1 El Transformador

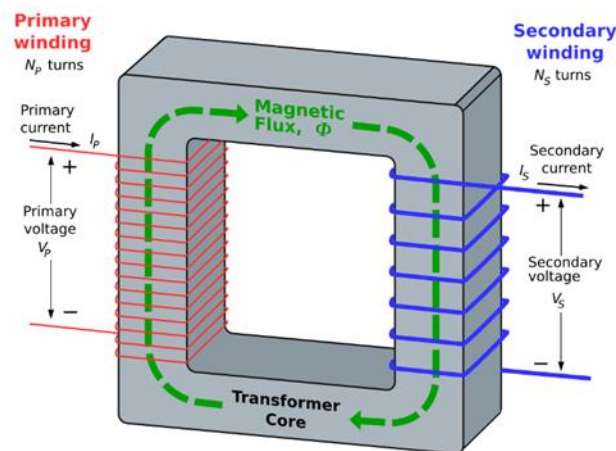
### 2.1.1 Principios de Funcionamiento de un transformador.

Un transformador es una maquina estática que transforma la tensión y corriente de entrada en un valor mayor o menor a su salida, dependiendo su uso. Puede estar constituido por uno o más devanados, para simplificar la explicación de su funcionamiento se utilizará un modelo de dos devanados de una fase.

Se tiene un núcleo magnético formado por un material ferromagnético compuesto por chapas laminadas apiladas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas e histéresis. Se tiene a su vez dos bobinados compuestos por un conductor aislado.

Su principio de funcionamiento se basa en el la ley de inducción electromagnética de Faraday, al inyectar una corriente alterna por el devanado primario, esta corriente alterna genera un flujo magnético alterno en el núcleo ferromagnético. El flujo electromagnético alterno induce una tensión en el devanado secundario.

**Figura 1.** Esquema del principio de funcionamiento de un transformador con devanado primario y secundario. Extraído de (China Electric Power Research Institute, 2004)



La relación entre los valores de tensión en el devanado primario y el secundario está dada por lo que llamamos la relación de transformación, que está en función del número de espiras en cada devanado. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Donde:

$N_i$  = Numero de espiras del devanado primario o secundario.

$V_i$  = La tensión en el devanado primario o secundario.

$I_i$  = La corriente en el devanado primario o secundario.

Si  $a > 1$ , tenemos un transformador elevador, tenemos una tensión mayor en el devanado secundario.

Si  $a < 1$ , tenemos un transformador reductor, con una corriente menor en el devanado secundario.

### 2.1.2 Transformadores de Potencia

*Figura 2. Transformador de potencia utilizado sistemas eléctricos de alta tensión.  
115/46kV.*



Los transformadores de potencia, son un elemento de suma importancia dentro de un sistema eléctrico de potencia. Son capaces de manejar altos niveles de potencia, por lo que son esenciales en generación, transmisión y distribución.

Los podemos encontrar en grandes centrales de generación, cuyo rol es elevar la tensión de niveles de 13.2 kV a 115 kV o 230 kV (en el caso de el salvador), lo que facilita la transmisión de energía a grandes distancias de forma eficiente, reduciendo la corriente que debe de circular por las líneas de transmisión, lo que se traduce en menos perdidas por calentamiento.

Así mismo los podemos encontrar en subestaciones de transmisión y distribución de media tensión. En las subestaciones de transmisión se encargan de reducir los niveles de voltaje a valores de media tensión, como lo son 23 kV, 34.5 kV o 46 kV (En El Salvador). Para luego transportar la energía a subestaciones de distribución, en las cuales se reduce a valores de distribución de 13.2 kV y luego a valores residenciales, hasta llegar al usuario final.

Es así como se destaca su gran importancia dentro del sistema, ya que permite que la energía generada en las grandes centrales, llegue hasta el consumidor final, los cuales son industrias o viviendas. Lo que es vital para el desarrollo económico del país.

Cabe señalar que, dentro de una subestación, es el equipo más caro, así como también de presentar una falla, puede desencadenar eventos en cascada en un sistema de potencia. Por lo que es de suma importancia realizarle pruebas para evaluar su integridad, a fin de evitar fallos que deriven en pérdidas económicas, ya sea por energía no servida o por el fallo total del equipo.

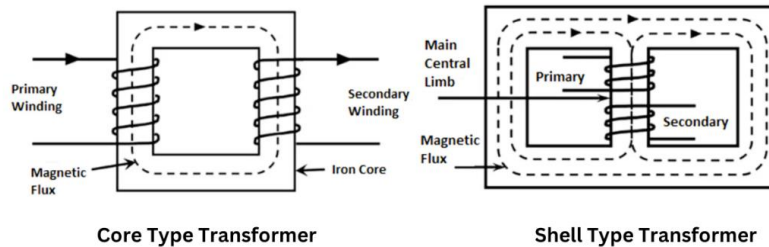
### **2.1.3 Componentes Estructurales**

#### **NUCLEO MAGNETICO:**

El núcleo este compuesto por un material ferromagnético de alta permeabilidad, su función es ser el medio por el cual circula el flujo magnético generado por la corriente alterna que circula en el devanado primario. El núcleo también está compuesto por laminas apiladas entre sí, con el objetivo de reducir las pérdidas por corrientes parasitas, también su material es seleccionado para disminuir las perdidas por

histéresis, que se da por ciclos repetitivos de magnetización y desmagnetización producto de la característica alterna de la corriente.

**Figura 3.** Tipologías constructivas de Transformadores: Tipo núcleo y acorazado. Extraído (Chapman, 2012)



#### DEVANADOS:

Los devanados están formados por un conductor que por lo general es cobre, enrollado en el núcleo. Son los elementos principales donde ocurre la transferencia de energía a un valor de tensión mayor o menor, pero a misma frecuencia. Los transformadores están compuestos de dos o más devanados. Para simplificar la comprensión tratemos el caso de un transformador de dos devanados:

- Devanado primario: es en el que circula la corriente alterna que excita el núcleo ferromagnético, generando un flujo magnético en este.
- Devanado secundario: en este devanado se recibe la excitación en forma de voltaje inducido.

#### TANQUE PRINCIPAL:

Es la carcasa metálica en la que se alojan los componentes principales del transformador, como el núcleo y los devanados los cuales se encuentran sumergidos en un medio aislante como por ejemplo en aceite dieléctrico. Su función es salvaguardar estos componentes del ambiente exterior protegiéndolos contra el polvo, humedad, gases contaminantes, etc. También ofrece un soporte mecánico.

También tiene la capacidad de resistir presiones internas causadas por el calentamiento de los componentes internos o por fallas. Su diseño está destinado también para ofrecer un medio de intercambio de calor con el medio, con radiadores o aletas acopladas. Una fuga en este componente significa un riesgo grave a la operatividad y a la integridad del transformador.

#### ACEITE DIELECTRICO:

Este cumple dos funciones importantes, aislar los componentes internos y ser un medio de enfriamiento, absorbiendo el calor que se genera por las pérdidas electromagnéticas. Para mejorar la disipación del calor, circula a los radiadores los cuales están diseñados con una mayor área de contacto con el aire, el aceite circula ya sea por convección natural o forzada.

El aceite debe cumplir con requisitos exigentes para el buen funcionamiento de un transformador, debe poseer una alta rigidez dieléctrica, estabilidad térmica, y baja probabilidad de desarrollar lodos producto de su propia oxidación.

Al aceite es importante realizarle pruebas cada cierto tiempo, ya que tiende a degradarse por la presencia de humedad, temperaturas elevadas y presencia de oxígeno en el mismo

#### SISTEMA DE ENFRIAMIENTO:

Los transformadores de potencia, por su operación a potencias elevadas, están diseñados con un sistema de enfriamiento orientado a garantizar un manejo eficiente de las pérdidas de energía en forma de calor, estos transformadores suelen estar inmersos en aceite dieléctrico, el cual como se menciona anteriormente, sirve como medio aislante y como disipador de calor. Este aceite absorbe el calor generado por las pérdidas en el núcleo y los devanados, luego circula por radiadores acoplados al transformador que forman parte del sistema de refrigeración, en los cuales disipa el calor al entrar en contacto indirecto con el aire. Hay diferentes tipos de sistema de enfriamiento, entre los cuales destacan:

- ONAN (Oil Natural Air Natural): En este tipo de sistema, el sistema circula por convección natural, tanto el aceite como el aire, por lo general este sistema es utilizado en transformadores de mediana potencia.
- ONAF (Oil Natural Air Forced): En este Sistema, el aceite circula por convección natural, y el aire por ventilación forzada, implementado grupos de ventiladores en los radiadores, con el fin de disipar mejor el calor generado por las pérdidas. Este sistema es utilizado en transformadores que soportan mayores niveles de carga durante su operación normal.

#### CAMBIADOR DE TAPS:

Este componente es sumamente importante para la operación, estabilidad y seguridad del sistema de potencia. En el transformador, es el encargado de ajustar la relación de transformación entre devanados para obtener un determinado valor de tensión de salida. Esto ofrece una herramienta importante para control voltaje en el sistema dentro una determinada área.

En cuanto a este componente, los tenemos de dos tipos:

- OLTC (On Load Tap Changer): Como su significado lo indica, permite realizar cambios en la relación de transformación mientras el equipo esta energizado y operando, lo que significa una gran ventaja dentro de la operación.
- NLTC (No Load Tap Changer): Para realizar el cambio de taps en este caso, se debe de hacer mientras el equipo este desenergizado e indisponible.

### CONSERVADOR DE ACEITE:

Los transformadores de potencia, en su gran mayoría tienen sus componentes principales inmersos en aceite dieléctrico, el tanque conservador al que también se le conoce como depósito de expansión, alberga en su interior una cierta cantidad de aceite.

Cuando el aceite se calienta, producto de las pérdidas en sus componentes internos, este se dilata y aumenta su volumen. El tanque conservador ofrece al aceite un espacio extra para que el aceite se dilate, así se evitan sobrepresiones que amenacen la estructura del transformador.

El tanque también es un punto de contacto con el ambiente, a través de un respiradero que suele estar compuesto por un deshumidificador con gel de sílice, evitando que el aceite absorba humedad y pierda su rigidez dieléctrica.

En resumen, el tanque conservador es un mecanismo que protege al transformador contra sobrepresiones internas producto de la expansión del aceite por las altas temperaturas de operación, así como también servir como barrera que impide o minimiza la contaminación del aceite.

### RELÉ BUCHHOLZ:

Es de las protecciones internas más importantes del transformador, ya que previene fallas catastróficas que puedan poner en peligro el sistema y al personal. Está ubicado entre el tanque conservador y el tanque principal, su función es detectar la acumulación de gases que se puedan generar a raíz de un cortocircuito entre espiras, descargas eléctricas internas o sobrecalentamiento. Cuando ocurre una falla interna el calentamiento producido por la falla, genera gases por la descomposición del aceite, el relé detecta esos gases y al acumularse en su interior, activa una alarma. Cuando ocurre una falla más grave que genere un flujo brusco de aceite, este puede activar el relé de disparo y bloqueo 86T, y dejar fuera de servicio el transformador, con el fin de salvaguardar el equipo, al sistema y a las personas que se puedan encontrar cerca.

#### 2.1.4 Tipos de Transformadores de Potencia

Los transformadores de potencia se pueden clasificar según sus diferentes características.

##### Según su sistema de refrigeración o ventilación:

###### a. Transformadores con refrigeración por aceite

- **ONAN (Oil Natural, Air Natural):** Este Sistema es común en transformadores de mediana potencia, el aceite absorbe el calor de los devanados, y el aire natural de disiparlo.
- **ONAF (Oil Natural, Air Forced):** Este Sistema es utilizado en transformadores de mayor potencia, el aceite cumple la misma función que en el caso antes mencionado, y los ventiladores se encargan de mejorar la disipación del calor.

###### b. Transformadores con refrigeración por aire:

- **AN (Air Natural):** Únicamente el aire natural es utilizado para disipar el calor, es común en transformadores pequeños.
- **AF (Air Forced):** Se utilizan ventiladores para mejorar la disipación de calor, utilizado en transformadores más grandes.

###### c. Transformadores con refrigeración por agua:

- **OFAF (Oil Forced Air Forced):** Utilizan aceite y ventiladores. Además, se puede utilizar agua para enfriar el aceite.

- **OFWF (Oil Forced Water Forced):** En este caso, el aceite es forzado a través de un sistema cerrado de tubos, y el calor se disipa a través de un intercambiador de calor utilizando agua.

**d. Según su medio aislante:**

- **Transformadores con aceite:** utilizan aceite mineral o sintético como medio aislante. El aceite sirve para aislar eléctricamente los devanados como para refrigerarlos. Son más comunes en transformadores gran capacidad.
- **Transformadores secos:** su medio aislante es sólido, se utilizan materiales como epoxi o resinas para aislar los devanados. Suelen encontrarse en áreas donde el riesgo de incendios debe ser mínimo. Su ventaja es que no presentan riesgo de fugas de aceite y son más amigables con el medio ambiente.

**e. Según el número de fases**

- **Transformadores monofásicos:** usados en sistemas de baja potencia, comunes para uso residencial o pequeña industria.
- **Transformadores trifásicos:** son los más utilizados a nivel de transmisión y distribución. Este compuesto como su nombre lo indica, por tres fases.

**f. Según la potencia nominal**

- **Transformadores de baja potencia:** con capacidad de potencias menores a 500 kVA. Su uso es a nivel residenciales o pequeñas industrias.
- **Transformadores de media potencia:** su capacidad esta entre 500 kVA y 10 MVA. Usados en instalaciones industriales medianas o en subestaciones de distribución.

- **Transformadores de alta potencia:** soportan potencias mayores a 10 MVA y se utilizan a nivel de transmisión para elevar a altos voltajes para poder transportar la energía a largas distancias, usados en plantas de generación y subestaciones de transmisión.

#### **g. Según la relación de transformación**

- **Transformadores elevadores:** aumentan la tensión de salida. Comúnmente utilizados en centrales de generación, para elevar el voltaje a niveles de transmisión.
- **Transformadores reductores:** en estos la tensión de salida es menor que la de entrada, utilizados en subestaciones de distribución, o subestaciones de transmisión donde se reduce su valor de niveles de transmisión a valores de media tensión, o en subestaciones de distribución, donde se reducen de valores de MT a valores de distribución de 13.2 kV. Posteriormente estos reducen el voltaje a uso residencial.

#### **h. Según el tipo de conexión de los devanados.**

- **Conexión estrella (Y):** Utilizado en sistemas trifásicos para conectar el punto neutro. Poseen la ventaja de que pueden manejar voltajes más altos y son comunes a nivel de transmisión.
- **Conexión delta ( $\Delta$ ):** Utilizado a nivel de distribución, ofrece mejor capacidad en el manejo de altas corriente y se usa principalmente para equilibrar carga en sistemas de baja y media tensión.

### **2.1.5 Fallas Comunes en Transformadores.**

Es sumamente necesario conocer las fallas comunes en los transformadores de potencia ya que podrían afectar la estabilidad y la confiabilidad del sistema. Conocer las causas y las consecuencias de estas fallas comunes nos puede ayudar a prevenirlos, entre las fallas más comunes tenemos:

#### **Falla en aislamiento de devanados:**

Es la causa más común que pueden derivar en fallas catastróficas. Los devanados, que están formados por conductor aislado, ya sea por esmalte o papel impregnado de aceite, lo que permite un aislamiento entre espiras. Con el tiempo este aislamiento se va deteriorando, debido a la operación a altas temperaturas, sobrecargas, envejecimiento químico y humedad. Cuando se presentan cortocircuitos externos, por el transformador fluyen altas corrientes que, si no son despejadas a tiempo según su curva de daño, puede comprometer su integridad deformando los devanados y deteriorando severamente su aislamiento, debido a las fuerzas electromagnéticas. Un aislamiento deteriorado y débil, puede sucumbir a sobretensiones transitorias y provocar fallas severas en el interior, como cortocircuito entre espiras o a tierra. La presencia de humedad también puede ser causante de fallas severas ya que disminuye la rigidez dieléctrica del medio aislante, siendo más probable la presencia de descargas parciales.

Este tipo de fallas suelen ser las más severas y destructivas para un transformador.

#### **Fugas de aceite:**

En transformadores de aceite, una fuga de este representa una falla grave ya que el aceite cumple las funciones de servir como aislante y como refrigerante. Las fugas pueden presentarse por daños en el tanque principal del transformador, juntas o sellos en mal estado. Una pérdida significativa de aceite puede causar sobrecalentamiento debido a la incapacidad del transformador para disipar el calor. En casos más graves pueden generarse incendios. Esta falla puede indicar deficiencias en la estructura del transformador que podría desencadenar fallas más severas.

**Fallas mecánicas:**

Pueden ser el resultado de fuerzas electromagnéticas o vibraciones que tienen un efecto en la estructura interna del transformador. Estas pueden causar desplazamiento de los devanados o una deformación o ruptura de componentes importantes. Las vibraciones generadas durante la operación con el tiempo pueden llegar a desgastar componentes mecánicos como anillos de sujeción o los terminales de los devanados.

Todo esto puede traer como consecuencia una resistencia interna en el transformador que puede llegar a causar un rendimiento deficiente y fallas más graves por sobrecalentamiento.

**Cortocircuitos internos:**

Estos se presentan cuando ocurre un contacto (conexión) indeseado entre los devanados como causa de pérdida o roturas de aislamiento, o por defectos en la estructura. Este tipo de falla es sumamente destructiva, ya que genera corrientes de gran magnitud que causan calentamiento excesivo y puede llegar a generar arcos eléctricos, Este tipo de fallas puede ocasionar daños irreparables en el transformador.

Las causas más comunes de estas fallas son:

- Fallas en el aislamiento.
- Fugas de aceite.
- Errores de diseño de fábrica.

**Fallas en el sistema de protección:**

El sistema de protección está compuesto por relés y fusibles que detectan y aíslan una falla, con el propósito de salvaguardar la integridad del transformador, como por ejemplo el relé bucholz o el relé de presión súbita, que suelen ser operados por fallas internas. Un fallo en el sistema de protección puede ocasionar que el transformador opere en condiciones de falla, sometiéndose a condiciones extremas que pueden ser perjudiciales para el transformador y el sistema.

## 2.2 Pruebas Convencionales en Transformadores de Potencia

### 2.2.1 Pruebas Eléctricas Estándar

Estas incluyen un conjunto de procedimientos que nos permiten verificar el comportamiento eléctrico del transformador en condiciones de operación. Son de suma importancia para asegurarse de que el transformador cumple con especificaciones y normas nacionales e internacionales. Entre las pruebas más comunes tenemos:

- **Prueba de relación de transformación:** Verifica la relación de voltaje entre el devanado primario y secundario, garantizando que el transformador tenga la capacidad de transformar la energía a un valor de tensión deseado.
- **Prueba de aislamiento:** se basa en aplicar una tensión elevada de prueba para verificar que el aislamiento del transformador resista condiciones operativas sin sufrir un deterioro significativo.
- **Prueba de resistencia de devanados:** mide la resistencia eléctrica de los devanados, lo que nos puede permitir detectar problemas como cortocircuitos parciales o conexiones defectuosas.
- **Prueba de corriente de excitación:** permite medir la corriente que circula a través del transformador cuando está conectado a una fuente de tensión, lo que nos permite evaluar de forma efectiva si existen defectos internos.

### 2.2.2 Pruebas Físico-Químicas

Estas pruebas permiten evaluar el estado del aceite y sus propiedades, las cuales aseguran que el transformador opere de forma correcta y eficiente, lo que permite prever fallas y monitorear su envejecimiento.

- **Análisis de gases disueltos (DGA):** A través de esta prueba se monitorean los gases disueltos en el aceite, lo que puede indicar la presencia de descargas parciales o altas temperaturas al interior del transformador.

- **Prueba de acidez y contenido de agua:** La acidez del aceite es un indicador del estado de su propiedad aislante. El contenido de agua disminuye la capacidad del aceite como medio aislante y como refrigerante.
- **Prueba de viscosidad y densidad:** nos permite evaluar la capacidad del aceite para fluir y su eficiencia como medio refrigerante, lo que puede reflejar problemas de circulación o filtración.

## 2.3 Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA)

### 2.3.1 Fundamentos Teóricos

Como se ha mencionado anteriormente, la prueba SFRA permite detectar fallas internas en el transformador, como desplazamientos de devanados, cortocircuitos entre espiras, deformaciones mecánicas, fallas en aislamiento, malas conexiones a tierra, etc. Lo positivo de esta prueba, es su carácter no invasivo, permitiendo realizar una evaluación de la condición interna del transformador sin necesidad de realizar un desensamblé complicado y costoso.

La prueba SFRA consiste en la inyección de una señal de bajo voltaje de 0.10 a 10 Vpp, a diferentes frecuencias, realizando un barrido que va desde los 20 Hz a 2 MHz. Conforme va incrementando la frecuencia, toman importancia las capacitancias e inductancias distribuidas internamente en el transformador, capacitancias entre espiras, capacitancias entre devanados, inductancias de magnetización, inductancias de fuga, etc. Las interacciones energéticas de estos elementos, tienen como respuesta una serie de resonancias y anti resonancias que forman parte de la respuesta en frecuencia del equipo, y que es una huella dactilar propia del transformador, y que depende en gran manera del diseño propio del transformador. Por eso su utilidad, ya que el análisis de SFRA se realiza comparando respuestas en frecuencia del equipo, típicamente se utiliza como referencia las mediciones tomadas en fabrica. Pero en ausencia de esta también se puede utilizar la respuesta de una unidad gemela, o realizar una comparación entre fases.

En el análisis de la respuesta en frecuencia, es necesario identificar rangos de frecuencia asociados a determinado componente activo interno del transformador. Ya que cada componente tiene una influencia directa en diferentes rangos de frecuencia. Cabe señalar, que no existen rangos universales, ya que como se mencionó anteriormente, la respuesta en frecuencia depende del diseño del transformador y pueden existir diferencias entre los límites establecidos para la influencia de cierto componente. Utilizar como regla universal un determinado rango de frecuencias y asociarlas a ciertos componentes puede dar como resultado interpretaciones erróneas. Es por eso que en el technical brochure 812 de CIGRE, se hacen sugerencias de rangos de frecuencia que pueden funcionar como una regla general aceptable para muchas unidades.

**Figura 4.** Respuesta en frecuencia típica de un transformador mostrando resonancias y antirresonancias características en el rango de frecuencias de análisis SFRA. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020)



### Núcleo:

Al realizar un análisis en la traza típica de la respuesta en frecuencia de un transformador, podemos identificar en la región de bajas frecuencias un mínimo local (A), este mínimo local corresponde a la impedancia máxima del devanado bajo prueba. Para identificar los elementos que conforman L y C en este rango de frecuencias es necesario recordar que a bajas frecuencias y en circuito abierto, la

energía magnética es almacenada en el núcleo magnético, por lo que  $L$  corresponde a la inductancia de magnetización, es decir; a la capacidad de la corriente de crear un flujo magnético en el núcleo.

Esta capacidad, está determinada en gran manera por las condiciones del núcleo, así como por cualquier condición de circuito cerrado, como un cortocircuito entre espiras que tendrá un comportamiento de carga inductiva.

Así mismo, en este rango de bajas frecuencias, la energía eléctrica que corresponde a  $C$ , se encuentra almacenada en los segmentos de aislamientos con una capacitancia de gran magnitud o entre nodos del circuito, este diseño tiene el propósito de obtener una gran diferencia de potencial electrostático. Estos incluyen diversas rutas capacitivas a tierra, formando una red capacitiva acoplada al devanado bajo prueba.

#### **Interacción de devanados:**

El siguiente punto de interés es el punto B, donde nos interesan nuevamente comprender los elementos que conforman  $L$  y  $C$  en este rango de frecuencias. En el punto B lo que observamos es la impedancia mínima y para determinar los elementos que conforman  $L$  y  $C$  es necesario tener en consideración que el efecto de las corrientes parasitas ira en incremento en función del aumento de frecuencia. El flujo magnético a medida que se incremente la frecuencia, tendrá una tendencia a fugarse fuera del núcleo, debido a la fuerza desmagnetizante generada por las corrientes parasitas originadas entre las laminaciones del núcleo. En síntesis, parte de ese flujo se escapa entre el espacio entre devanados y dentro de los devanados. Lo que significa que la energía magnética en este rango de frecuencias se encuentra almacenada tanto en el núcleo como en el canal de fuga, por lo tanto,  $L$  será una representación de la combinación de la inductancia de magnetización y la inductancia de fuga. Así mismo la energía eléctrica para este rango de frecuencias estará confinada a la capacitancia existente en el espacio entre devanados. En resumen, este rango de frecuencias nos permite analizar el comportamiento de la interacción entre devanados.

### Estructura de los devanados:

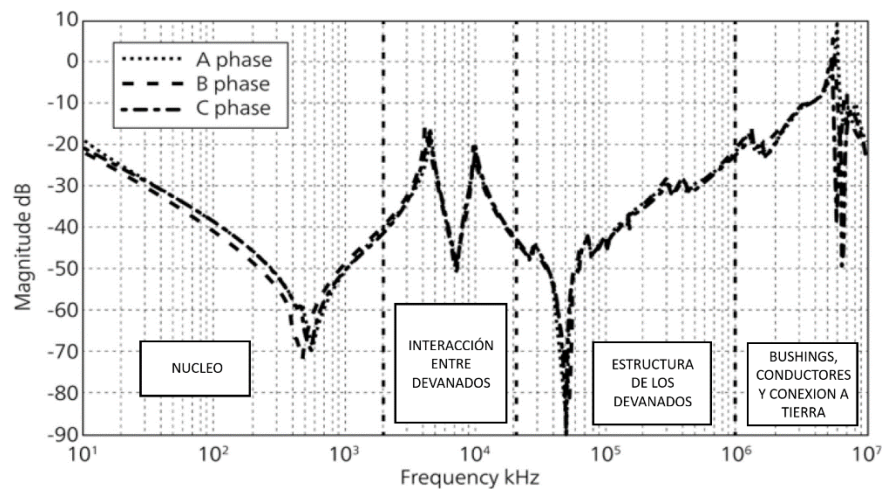
Conforme sigue aumentando la frecuencia, se presentan una gran cantidad de puntos extremos locales, cuyo patrón dependerá del diseño del bobinado, y no es general para todo tipo de bobinado. Este patrón depende de la relación entre capacitancias en serie y derivación presentes en el bobinado. Una de las resonancias naturales propias del bobinado se presenta en el punto C, donde la energía eléctrica almacenada en el aislamiento entre espiras y entre capas se intercambia con la energía magnética almacenada en el campo eléctrico asociado al flujo de fuga que circula a través de las espiras.

### Bushings, conductores y conexión a tierra:

En las frecuencias más altas, la respuesta en frecuencia esta caracterizada por el estado de los bushing, de los conductores y la conexión a tierra del equipo.

**Figura 5.** Curva típica de prueba SFRA.

*Adaptado de Feasibility study on the detection of turn-to-turn fault severity in the transformer winding by frequency response analysis and numerical indices (Samimi, Faiz, & Ghasemi Parchini, 2023).*

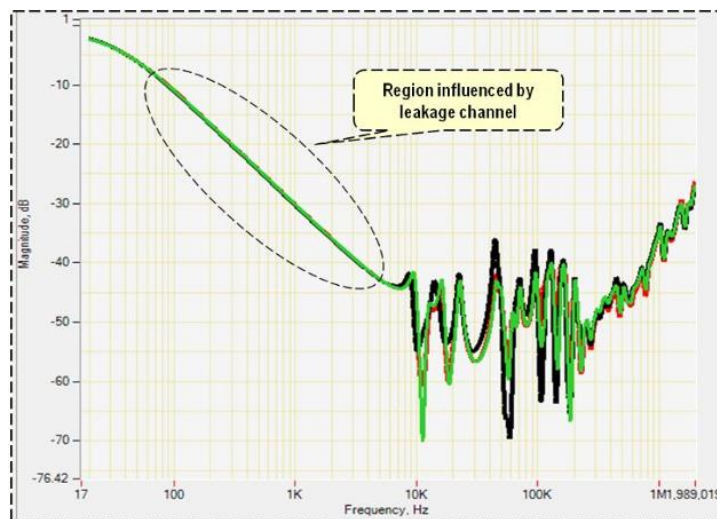


### Canal de fuga:

Cortocircuitar el devanado secundario, es un procedimiento practico y recomendable para restringir, a bajas frecuencias al efecto del espacio que existe entre y dentro de los devanados, a lo que comúnmente se le conoce como el canal de fuga. En esta

condición, el flujo magnético acoplado al devanado bajo excitación, recorre una trayectoria que abarca tanto segmentos del núcleo como del canal de fuga en serie, ya que la reluctancia del canal de fuga es significativamente mayor que la del núcleo, las variaciones en el canal de fuga se tienden a dominar la trayectoria del flujo y, por ende, determinan el comportamiento de la impedancia en el rango de bajas frecuencias. También es necesario tomar en cuenta que la geometría del canal de fuga es prácticamente la misma en las 3 fases, esto significa que a la hora de realizar la comparación entre trazas, se puede realizar una comparación entre trazas de diferentes devanados, a fin de detectar deformaciones.

**Figura 6.** Curva típica de prueba SFRA con secundario cortocircuitado, se muestra la región influenciada por el canal de fuga (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020)



### **2.3.2 Fundamentos del análisis de respuesta en frecuencia de un transformador mediante el modelado de circuitos.**

Un transformador puede representarse mediante una red de circuitos equivalente compuesta por inductancias y capacitancias ( $L$  y  $C$  respectivamente), estos parámetros dependen directamente de la geometría de sus devanados y su diseño constructivo. Los arrollamientos de una misma fase se encuentran acoplados magnéticamente, lo que se refleja en la presencia de inductancias propias y mutuas. A su vez, además de las capacitancias en serie asociadas a los devanados y las capacitancias de derivación a tierra, existen acoplamientos electrostáticos entre devanados adyacentes, que generan capacitancias Inter bobinas. Las pérdidas resistivas, a altas frecuencias suelen despreciarse en este modelo, ya que su aporte principal a la respuesta en frecuencia es amortiguar las resonancias sin modificar de manera significativa las características esenciales de las curvas de respuesta en frecuencia.

De esta manera, la relación directa entre la configuración geométrica de los devanados, los parámetros eléctricos equivalentes y las respuestas en frecuencia medidas en los terminales del transformador resultan fundamentales para el análisis. El principio diagnóstico que sustenta la técnica SFRA se basa en que cualquier desplazamiento mecánico o deformación de los devanados altera los componentes eléctricos equivalentes del modelo, provocando variaciones en la posición o la magnitud de las frecuencias de resonancia observadas en las curvas.

Para facilitar la comprensión, es necesario abordar el análisis a partir de modelos simplificados de circuitos electromagnéticos. Por ejemplo, se inicia con el análisis de un devanado en núcleo de aire con geometría uniforme y, posteriormente, se incorporan gradualmente los efectos del núcleo y de la interacción con otros devanados en un transformador monofásico. Cabe señalar que en estos modelos se consideran devanados de estructura uniforme, sin incluir configuraciones más complejas como los devanados de disco con aislamiento graduado o los devanados

compuestos por múltiples bobinas, como los de toma. Del mismo modo, no se tratarán en este nivel de modelado aspectos asociados a los terminales, tales como configuraciones específicas de conexión o los efectos de las boquillas de AT.

**Ejemplo de respuesta en frecuencia típica de un devanado con núcleo de aire (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020):**

La forma más sencilla de representar un devanado de transformador a altas frecuencias es mediante un modelo de red en escalera LC de n etapas, como se ilustra en la Figura 7. En este enfoque, se asume que el devanado posee una estructura uniforme, es decir, que utiliza el mismo tipo de conductor, el mismo número de espiras por disco y un aislamiento no graduado para todos los discos que lo componen. El acoplamiento inductivo mutuo entre los elementos del modelo se considera a través de la inductancia L.

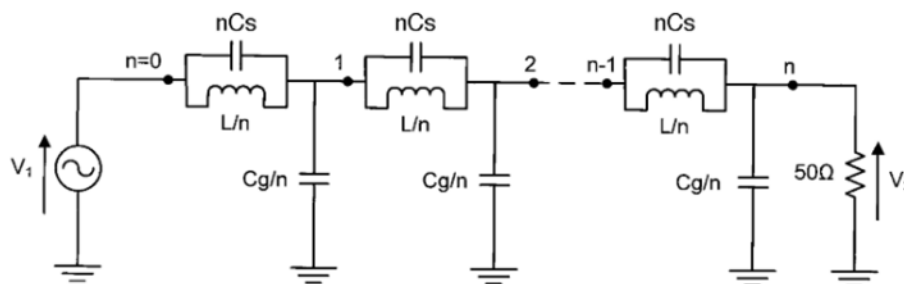
Un parámetro común en el diseño de devanados es el **coeficiente de espacio ( $\alpha$ )**, introducido a partir de la necesidad de superar ensayos de impulsos atmosféricos y de controlar la distribución no lineal del voltaje a lo largo del devanado. Este coeficiente se define como:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} \quad (2)$$

Dependiendo de la configuración empleada —ya sea un devanado helicoidal simple, de discos planos, con blindajes intermedios, de discos intercalados, helicoidal doble o incluso de múltiples capas—, los devanados suelen clasificarse en dos categorías según su coeficiente de espacio  $\alpha$ :

- **Alta capacitancia serie del devanado**, como ocurre en los devanados de discos intercalados.
- **Baja capacitancia serie del devanado**, característica de los devanados de disco plano o helicoidal simple.

**Figura 7.** Red de escalera LC de elementos concentrados de  $n$  etapas de un devanado de núcleo de aire único. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020)



Donde:

$L$  : Inductancia total.

$C_s$  : Capacitancia en serie total del devanado.

$C_g$  : Capacitancia shunt a tierra total del devanado.

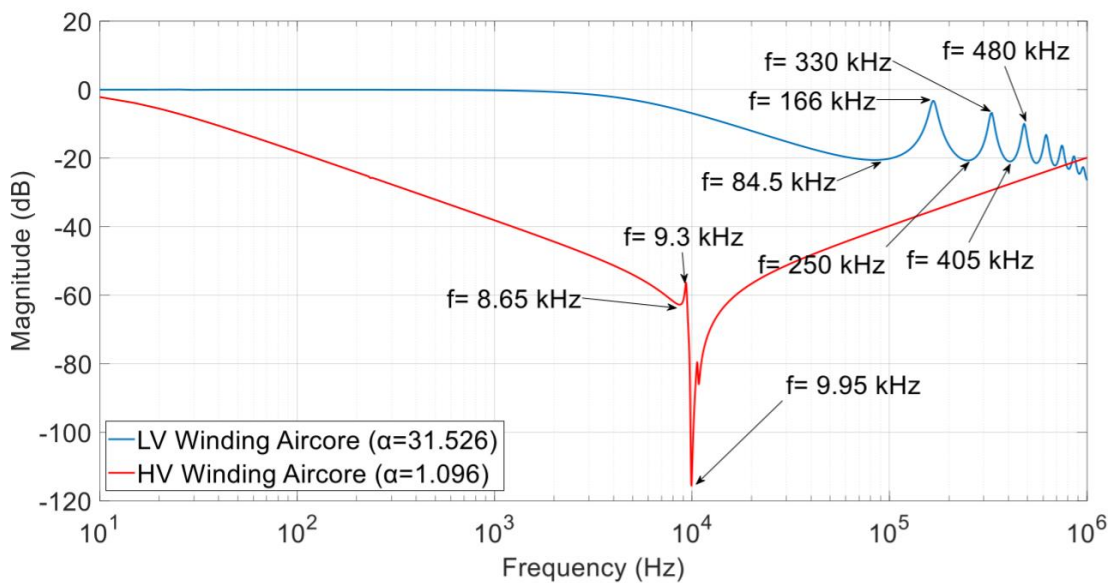
La Figura 6 compara las trazas de respuesta en frecuencia obtenidas mediante modelos de circuito equivalente para dos configuraciones de devanados con características constructivas muy distintas. El primero está asociado a un devanado de baja tensión de 13 kV con 74 espiras en disposición helicoidal simple. En este caso, el coeficiente de espacio ( $\alpha$ ) alcanza un valor de aproximadamente 30, lo que refleja una influencia muy importante de la capacitancia a tierra sobre el comportamiento eléctrico del bobinado.

El segundo ejemplo se centra en un devanado de alta tensión de 144 kV, conformado por 140 discos con disposición intercalada. Su coeficiente de espacio es menor a 2, reflejando que la capacitancia serie tiene un peso mucho mayor en la distribución de esfuerzos eléctricos. Desde el punto de vista de los parámetros concentrados, el devanado de baja tensión puede representarse con una inductancia de  $L = 1.581mH$ , una capacitancia serie de  $C_s = 5.67pF$  y una capacitancia de derivación a tierra de  $C_g = 5640pF$ . Caso contrario, el devanado de alta tensión presenta una inductancia de  $L = 0.638H$ , con  $C_s = 401pF$  y  $C_g = 482pF$ .

La diferencia entre ambos nos demuestra cómo la geometría del devanado tiene una influencia directa en las propiedades resonantes del transformador. Mientras que en el devanado helicoidal simple la baja capacitancia serie nos lleva a tener presente un mayor número de resonancias dominadas por el acoplamiento a tierra, en el devanado de discos intercalados la mayor capacitancia serie facilita una distribución de voltajes más homogénea, reduciendo la concentración de esfuerzos dieléctricos.

En términos prácticos, estas características se traducen en respuestas en frecuencia claramente diferenciadas: los devanados de baja tensión suelen presentar resonancias más pronunciadas en las bandas de baja y media frecuencia, mientras que los de alta tensión, debido a la complejidad de su estructura capacitiva, muestran un espectro más rico en resonancias a frecuencias elevadas. Este tipo de comparación resulta de utilidad en la técnica SFRA, pues permite interpretar cómo las variaciones geométricas y de diseño tienen una relación directa en la huella característica de cada transformador.

**Figura 8.** Comparación de respuestas SFRA entre devanados de baja tensión (LV) y alta tensión (HV) mostrando frecuencias de resonancia características identificadas. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020)



En el caso de un devanado con un coeficiente de espacio elevado ( $\alpha$ ), la respuesta en frecuencia se caracteriza por la presencia de múltiples resonancias, acompañadas de

seudo-antirresonancias de tipo “U” que aparecen entre resonancias adyacentes. Este patrón refleja la fuerte influencia de la capacitancia a tierra en el comportamiento eléctrico. Por el contrario, cuando el devanado presenta un coeficiente de espacio reducido ( $\alpha$ ), la respuesta se distingue por una antirresonancia crítica muy marcada, tras la cual la amplitud de la curva tiende a aumentar de forma progresiva y más uniforme, con pocas resonancias adicionales o incluso sin ellas.

A partir de la formulación matemática del modelo de red en escalera de  $n$  etapas, basada en elementos concentrados  $L$  y  $C$ , se han derivado expresiones que permiten calcular las frecuencias asociadas a las seudo-antirresonancias, las resonancias y la antirresonancia crítica (CIGRE TB 812 WG A2.53, 2020). Es necesario aclarar que dichas ecuaciones son válidas únicamente para el caso simplificado de un devanado de núcleo de aire con estructura uniforme, como el considerado en este análisis. En un transformador real, donde intervienen múltiples devanados, el núcleo magnético y acoplamientos mucho más complejos, estos cálculos dejan de ser aplicables de manera directa ya que el circuito por el cual se modela el transformador, resulta mucho más complejo.

Es posible utilizar los parámetros eléctricos presentados anteriormente para los devanados de baja y alta tensión y aplicar las ecuaciones mencionadas, comparando sus resultados con las frecuencias señaladas en la Figura 8. Este tipo de práctica no solo permite validar la coherencia del modelo simplificado, sino también comprender cómo las propiedades geométricas y eléctricas básicas influyen en la respuesta en frecuencia de los devanados, aun cuando en la realidad los transformadores presentan un comportamiento más sofisticado. Para la seudo-antirresonancia tenemos la siguiente expresión (CIGRE TB 812 WG A2.53, 2020):

:

$$f_{0k} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_S}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4\alpha^2}{((2k-1)\pi)^2}}} \text{ para } k = 1, 2, 3, \dots (n-1) \quad (3)$$

Una pseudo-anti-resonancia se define como el mínimo local que aparece entre dos resonancias adyacentes. En este punto, la amplitud de la respuesta en frecuencia presenta una curvatura característica cóncava, sin llegar a una caída abrupta hacia valores negativos en dB como en el caso de una antirresonancia convencional. Por esta razón, el espectro de amplitud de la respuesta en frecuencia exhibe alrededor de la pseudo-antirresonancia la llamada forma en “U”.

Las frecuencias correspondientes a las resonancias, denotadas como  $f_k$ , pueden determinarse a partir de expresiones matemáticas que relacionan los parámetros eléctricos del modelo equivalente en escalera con el orden de cada modo resonante. Estas fórmulas constituyen una herramienta útil para aproximar el comportamiento dinámico de los devanados en configuraciones simplificadas, aunque, como se ha señalado previamente, no reflejan en su totalidad la complejidad electromagnética de un transformador real.

Las frecuencias de resonancia pueden ser calculadas a partir de (CIGRE TB 812 WG A2.53, 2020):

$$f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_S}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4\alpha^2}{((2k-1)\pi)^2}}} \quad (4)$$

En una respuesta en frecuencia, **una resonancia** se identifica como el **máximo local de amplitud** (picos y valles en la curva). Por esa razón, a las frecuencias en que ocurren estos picos también se les suele llamar **frecuencias naturales del devanado**, porque reflejan los modos propios de oscilación del sistema eléctrico equivalente.

En cuanto a la **antirresonancia crítica** de una **red en escalera de n etapas** (el modelo LC concentrado del devanado), su **frecuencia  $f_c$**  se obtiene **a partir de** (CIGRE TB 812 WG A2.53, 2020):

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \quad (5)$$

Dicho de otro modo: tomando el circuito equivalente (con sus L, Cs y Cg definidos para el devanado y su geometría) y resolviendo su función de transferencia,  $f_c$  aparece como **el punto de cancelación más pronunciada** (la caída más fuerte de amplitud) entre los modos resonantes.

- En los **modelos simplificados** de un **devanado uniforme con “núcleo de aire”**,  $f_c$  coincide con la antirresonancia global que separa el primer conjunto de resonancias del ascenso posterior de la curva.
- En un **transformador real** (con núcleo magnético, múltiples acoplamientos y conexiones), el valor de  $f_c$  ya **no se calcula con una fórmula cerrada universal**: se **estima** aplicando el mismo procedimiento (resolver la función de transferencia del modelo equivalente adoptado) o se **determina experimentalmente** en la curva medida, como la **mínima de amplitud más marcada** entre grupos de resonancias.

En una curva de respuesta en frecuencia, la **antirresonancia crítica** se manifiesta como una caída abrupta de la amplitud hasta valores negativos significativos en dB. Por este motivo se le denomina también **antirresonancia “normal”**, ya que representa un comportamiento característico y bien definido del devanado. Se le califica como **“crítica”** porque corresponde a la **frecuencia más alta en la cual aún se cumple la condición de resonancia en paralelo** dentro del modelo de red equivalente. A partir de ese punto, la impedancia de cada rama en paralelo —formada por L/n y nCs— pasa a comportarse de manera predominantemente capacitiva, lo que

ocasiona que la amplitud de la respuesta siga una tendencia creciente con la frecuencia. Matemáticamente, este crecimiento se aproxima por la expresión:

$$20\log_{10}|A| = 20\log_{10}\left(\frac{2\pi * 50\sqrt{C_g C_s}}{e^\alpha - e^{-\alpha}} f\right) \quad (6)$$

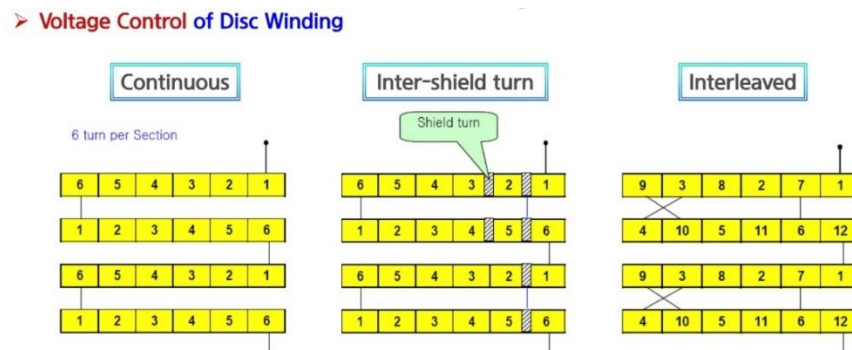
De esta forma, se observa que el **coeficiente de espacio ( $\alpha$ )** ejerce un efecto determinante sobre la forma global de la respuesta en frecuencia. Cuando  $\alpha$  adopta valores pequeños, los términos

$$\frac{4\alpha^2}{((2k-1)\pi)^2} \text{ y } \frac{\alpha^2}{(k\pi)^2} \quad (7)$$

presentes en las expresiones de las frecuencias resonantes  $f_k$  y pseudo-resonantes  $f_{0k}$  — resultan demasiado reducidos como para distinguir claramente dichas frecuencias de la frecuencia crítica  $f_c$ . En consecuencia, no aparecen múltiples resonancias bien definidas en la curva.

Este marco teórico explica por qué los **devanados con baja capacitancia serie** (por ejemplo, los devanados de disco plano o helicoidal simple) tienden a exhibir múltiples resonancias a lo largo del espectro. En cambio, los **devanados con elevada capacitancia serie**, como los de discos intercalados, suelen mostrar pocas resonancias o incluso ninguna, reflejando un comportamiento eléctrico más uniforme frente a la excitación en alta frecuencia.

**Figura 9.** Control de voltaje en devanado tipo disco: continuo, con vuelta de blindaje (inter-shield) e intercalado (interleaved). Fuente: Mohammed (2011), PEGuru.



Los devanados tipo disco pueden configurarse de tres formas principales: continuo, con vuelta de blindaje (inter-shield) e intercalado (interleaved). El devanado continuo es el más simple, formado por discos conectados secuencialmente, lo que facilita su fabricación pero provoca una distribución desigual del voltaje entre discos, debido a su baja capacitancia serie y alta impedancia. El devanado con vuelta de blindaje incorpora una espira de pantalla entre secciones, que mejora el acoplamiento electrostático y reduce los esfuerzos dieléctricos, alcanzando una capacitancia intermedia. Por su parte, el devanado intercalado entrelaza eléctricamente las espiras de discos adyacentes, aumentando la capacitancia serie y disminuyendo la impedancia total, lo que se traduce en una mejor respuesta ante transitorios y una distribución más uniforme del voltaje a lo largo del bobinado.

**Tabla 1.** Comparación de configuraciones de devanado tipo disco y su comportamiento eléctrico

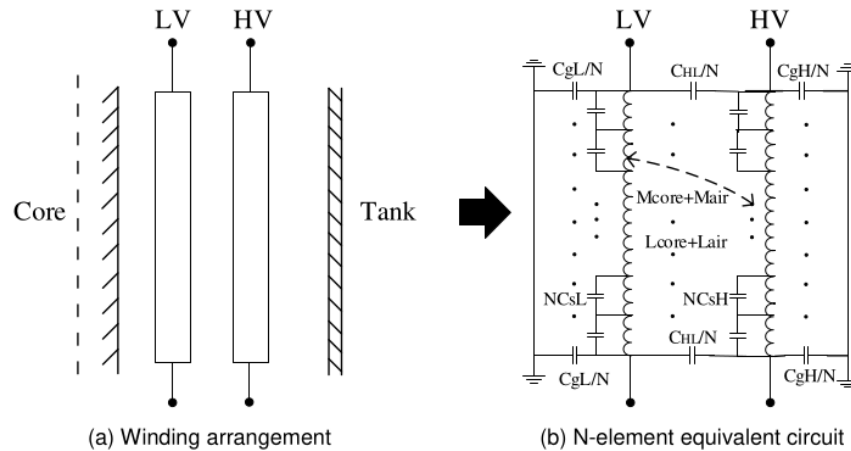
Tipo de devanado	Capacitancia serie	Impedancia resultante	Comportamiento ante transitorios
Continuo	Baja	Alta	Resonancias múltiples, mala distribución de voltaje
Inter-shield	Media	Intermedia	Mejora dieléctrica moderada
Interleaved	Alta	Baja	Mejor control de impulsos y distribución uniforme de voltaje

**Ejemplo de respuesta en frecuencia de un transformador monofásico de dos devanados:**

El siguiente paso en la comprensión de la **respuesta en frecuencia de los transformadores** consiste en analizar la **influencia del devanado no sometido a prueba** sobre las mediciones. Para ilustrarlo, suele emplearse como ejemplo un **transformador monofásico de dos devanados**. En este tipo de transformador, el devanado de baja tensión y el de alta tensión se montan sobre un núcleo con un sistema de aislamiento intermedio. La sección transversal semisintética muestra la

disposición física de los devanados, mientras que el modelo de circuito equivalente incluye tanto el **acoplamiento magnético mutuo** como las **capacitancias interdevanados** que inevitablemente surgen de la geometría constructiva.

**Figura 10.** Configuración física de devanados de transformador (a) y su representación mediante circuito equivalente de elementos distribuidos (b) para análisis SFRA. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020)



Cuando se modelan las respuestas en frecuencia de ambos devanados, se observa que el LV presenta múltiples resonancias a partir de unos 200 kHz, lo que corresponde a un comportamiento típico de devanados con baja capacitancia serie. En contraste, el HV muestra una tendencia predominantemente capacitiva en altas frecuencias, prácticamente sin resonancias visibles, lo que se debe a su mayor capacitancia serie.

En la **región de bajas frecuencias** (por debajo de algunos kHz, dominada por el núcleo magnético), se identifica un comportamiento característico: la aparición de la primera anti-resonancia tanto en el LV como en el HV. Aquí se pone de manifiesto que el tradicional coeficiente de espacio ( $\alpha$ ) de un solo devanado ya no resulta suficiente para explicar la respuesta. Esto se debe a que, aun cuando el HV no se encuentra bajo prueba, sus parámetros capacitivos e inductivos influyen directamente en la curva del LV. Dicho efecto se representa mediante un modelo de red equivalente de dos etapas, en el cual las tensiones inducidas en el devanado flotante dependen tanto de la **relación de transformación (N)** como de la distribución de potenciales en el circuito capacitivo equivalente.

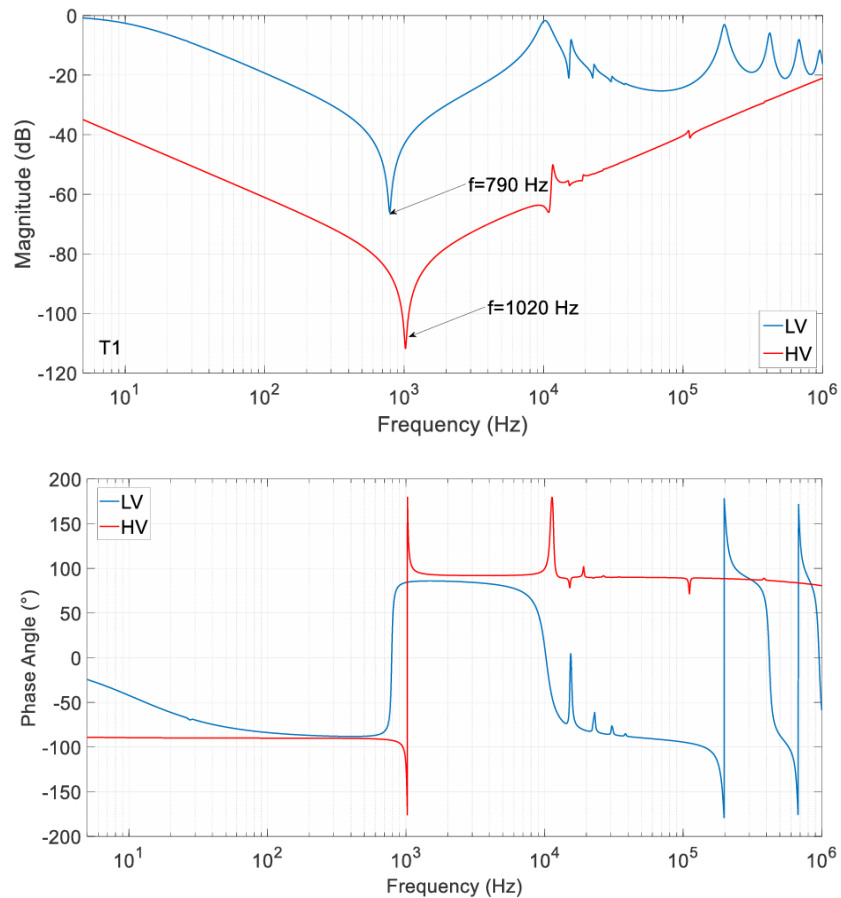
En este marco, se definen nuevas **capacitancias equivalentes**:

- La **capacitancia en derivación a tierra (Ceg)**, que depende de la interacción entre el devanado probado y el no probado.
- La **capacitancia serie equivalente (Ces)**, la cual incorpora el efecto de la relación de espiras N.

Las expresiones muestran que el factor  $N_2$  amplifica significativamente la contribución del devanado no sometido a prueba, lo que explica por qué el LV exhibe una anti-resonancia bien marcada en la zona de bajas frecuencias. En cambio, para el HV, la capacitancia serie se mantiene prácticamente inalterada antes y después de estar acoplado con el LV; solo aumenta ligeramente su capacitancia a tierra, lo cual se traduce en variaciones menores en la forma de la respuesta.

Finalmente, en la **región de frecuencias medias (alrededor de 10 kHz)**, el acoplamiento inductivo y capacitivo permite que ciertas características del HV se reflejen en la respuesta del LV. Sin embargo, la influencia en sentido inverso es menos significativa, dado que el LV posee menor número de espiras, inductancias de núcleo de aire más bajas y menor capacitancia propia. Aun así, es posible observar cómo la primera pseudo anti-resonancia del LV se transfiere parcialmente al HV, generando un leve “quiebre” en la tendencia ascendente de la curva capacitiva del devanado de alta tensión.

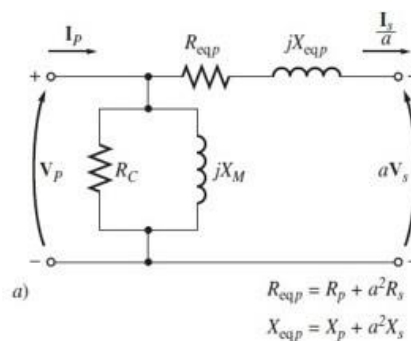
**Figura 11.** Espectros de amplitud y fase de los devanados de alta tensión (HV) y baja tensión (LV) en un transformador monofásico. Extraído de (CIGRÉ TB 812 Working Group A2.53, 2020)



**ANALISIS PARA UN TRANSFORMADOR REAL:**

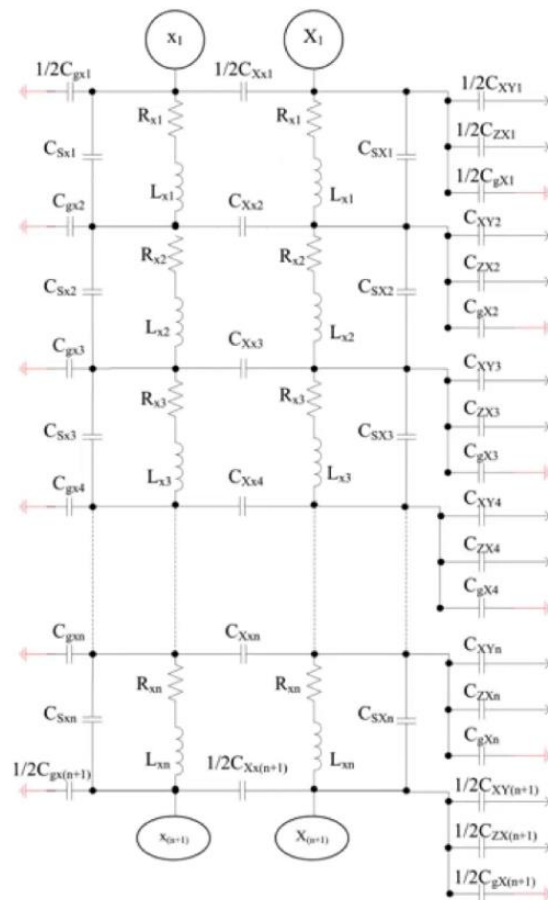
El comportamiento del transformador a bajas frecuencias, es muy simple de modelar, mediante el modelo clásico mostrado en la figura .

**Figura 12.** Circuito equivalente de un transformador monofásico. Extraído de (Chapman, 2012)



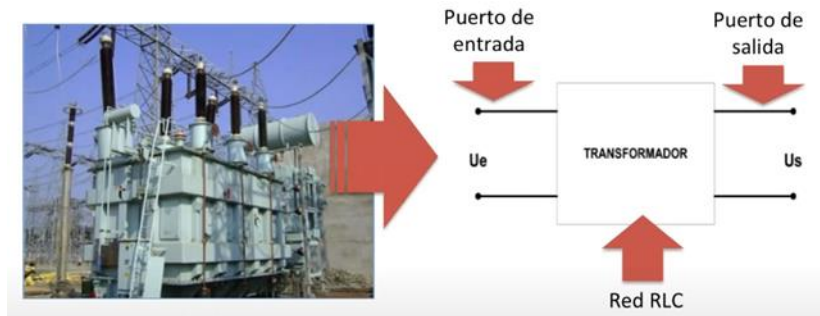
Conforme se incrementa la frecuencia, este modelo se vuelve insuficiente, ya que como se mencionó anteriormente, toman relevancia las capacitancias e inductancias distribuidas en el interior del transformador, esto resulta en que el circuito que modela al transformador real se vuelve demasiado complejo, véase ilustración 9.

**Figura 13.** Circuito de un transformador a altas frecuencias (Megger, *Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA.* 2016).



Debido a la complejidad del circuito equivalente de un transformador a altas frecuencias, para entender los fundamentos de la prueba SFRA, se opta por modelar el transformador mediante la teoría de circuitos de cuadripolos. En ese sentido, trataremos al transformador como una caja de dos puertos, uno de entrada y uno de salida.

**Figura 14.** Modelo de cuadripolos de un transformador (Megger, *Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA*. 2016).



Para abordar el transformador mediante la teoría de cuadripolos es necesario tener en cuenta que su red interna se considera compuesta únicamente por elementos pasivos lineales (resistencias, capacitancias e inductancias) y que es pasivo y bilateral, esto significa que el comportamiento del circuito es simétrico y la respuesta será equivalente si la señal es inyectada tanto en el puerto de entrada como en el de salida.

**Función de transferencia:**

Durante la prueba SFRA, se obtiene principalmente la respuesta en frecuencia al inyectar una señal de baja energía en el puerto de entrada, y midiendo su respuesta en el puerto de salida, así la razón entre la señal obtenida en su puerto de salida y el de entrada constituye la respuesta en frecuencia de interés.

**Figura 15.** El transformador como cuadripolo.



Se obtiene la función de transferencia:

$$\hat{T} = \frac{\hat{U}_e}{\hat{U}_s} \quad (8)$$

El módulo de la función de transferencia:

$$|T_{(w)}| = \left| \frac{U_{e(\omega)}}{U_{s(\omega)}} \right| \quad (9)$$

Fase de la función de transferencia:

$$\varphi T_{(w)} = \frac{\varphi U_{e(\omega)}}{\varphi U_{s(\omega)}} \quad \varphi T_{(w)} = \arctan \left( \frac{U_{e(\omega)}}{U_{s(\omega)}} \right) \quad (10)$$

Para obtener una mejor resolución en el eje y, modificamos la escala del módulo de la función de transferencia a una escala logarítmica:

$$|T_{(w)}| = 20 \log \left( \left| \frac{U_{e(\omega)}}{U_{s(\omega)}} \right| \right) = -20 \log \left( \left| \frac{U_{s(\omega)}}{U_{e(\omega)}} \right| \right) \quad (11)$$

Como se mencionó previamente y siguiendo con la teoría de cuadripolos, el transformador en su interior está compuesto por un circuito RLC, por lo que la tensión de entrada la podemos escribir en función de la impedancia:

$$\dot{U}_s = \dot{Z}_s \dot{I}_s \quad (12)$$

$$\dot{Z}_s = R_s + jX_s \quad (13)$$

$$\dot{Z}_s = R_s + j \left( \omega L + \frac{1}{\omega C} \right) \quad (14)$$

De las ecuaciones anteriormente detalladas, tenemos que:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega = \sqrt{LC} \quad (15)$$

En esta condición, la reactancia inductiva se compensa con la reactancia capacitiva, lo cual significa que en esta condición se tiene una frecuencia de resonancia. Esto se ve reflejado en la respuesta en frecuencia como picos y valles.

$$\omega L > \frac{1}{\omega C} \quad (16)$$

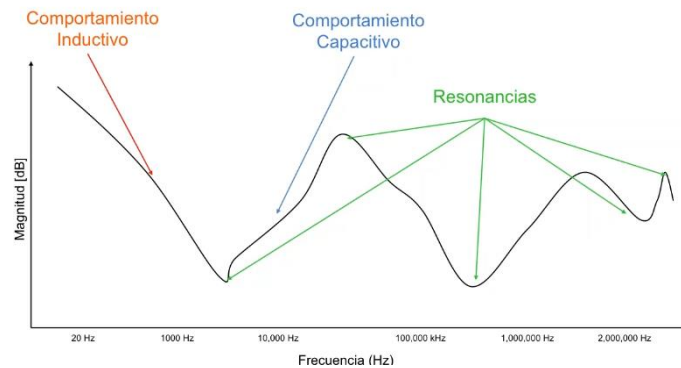
Cuando el producto de la frecuencia por la inductancia es mayor que el inverso de la frecuencia por la capacitancia, tendremos un comportamiento inductivo en la respuesta en frecuencia.

$$\omega L < \frac{1}{\omega C} \quad (17)$$

Caso contrario, cuando el producto de la frecuencia por la inductancia es menor que el inverso de la frecuencia por la inductancia tendremos un comportamiento capacitivo.

Para comprender estos criterios, veamos la siguiente figura:

**Figura 16.** Grafica típica de la magnitud de la respuesta en frecuencia obtenida en pruebas SFRA (Megger, *Análisis de la Condición Mecánica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA.* 2016).

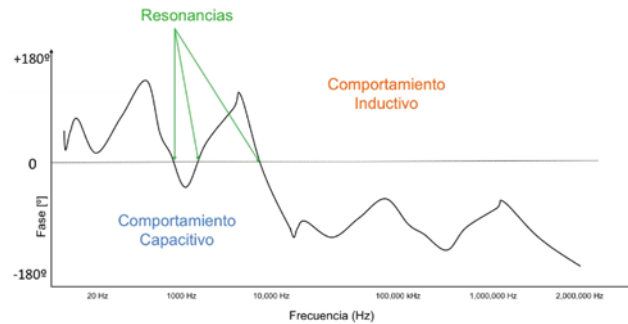


En la gráfica, podemos identificar los tres tipos de comportamientos mencionados anteriormente.

- Pendiente negativa: comportamiento inductivo.
- Pendiente positiva: comportamiento capacitivo.
- Valles: resonancias, reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva.

En el estudio SFRA también obtenemos una gráfica correspondiente a la fase en función de la frecuencia, en la cual también se tienen criterios para determinar si existen las tres características antes mencionadas:

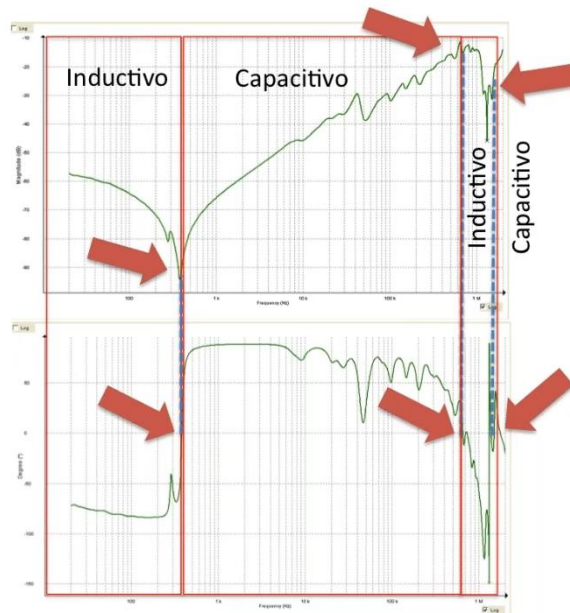
**Figura 17.** Gráfica de la fase de respuesta de frecuencia (Megger, *Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA*. 2016).



En este caso podemos caracterizar la gráfica de las siguientes formas:

- Fase < 0° : comportamiento capacitivo.
- Fase > 0° : comportamiento inductivo.
- Fase = 0° : resonancias.

**Figura 18.** Comportamiento grafico de la respuesta de frecuencia (Megger, *Análisis de la Condición Mécanica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA*. 2016).



Cualquier deformación interna en el transformador, se verá reflejada en cambios en su comportamiento en comparación a la huella de referencia.

### **2.3.3 Modelos Eléctricos y Electrónicos**

El modelado del transformador para FRA se aborda mediante distintos enfoques. Los modelos blancos (white-box) se fundamentan en información detallada del diseño y leyes físicas. El modelo más difundido es la red de parámetros concentrados en tipo escalera, se subdivide el devanado en secciones discretas, cada una equipada con inductancias serie y de magnetización y capacitancias serie y a tierra calculadas a partir de las dimensiones geométricas del mismo. Además, se emplean modelos distribuidos, en esta cada espira es tratada como una pequeña línea de transmisión y modelos por elementos finitos tridimensionales (FEM), donde se simula la geometría completa del transformador en un software especializado.

Estos modelos blancos pueden reproducir con una alta precisión la respuesta en frecuencia, si se dispone de los datos de construcción, pero exigen un gran esfuerzo de modelado y cálculo. También se tienen los modelos negros (black-box) que se construyen únicamente a partir de los datos obtenidos en la medición, consiste en que se propone un circuito equivalente (red RLC) cuyos parámetros son ajustados por algoritmos automáticos hasta que la respuesta simulada coincida con la firma FRA observada. Este método logra emular el comportamiento medido sin aportar información sobre la geometría o voltajes internos. Entre ambos extremos tenemos los modelos grises (grey-box) que combinan la estructura física de un modelo blanco con la estimación de parámetros por mediciones, en este modelo se utiliza la misma topología de circuitos basado en leyes físicas, pero se obtienen sus valores ajustados experimentalmente sin conocimiento del diseño interno. En todos los casos mencionados, la modelización del núcleo magnético es crítica, la variación de la permeabilidad y las pérdidas en altas frecuencias modifican el acoplamiento entre espiras y capas del bobinado, por lo que los modelos avanzados incluyen estos efectos para reproducir de forma correcta la respuesta en frecuencia del transformador.

### 2.3.4 Principios del Barrido de Frecuencia (SFRA)

La técnica FRA se implementa normalmente mediante el barrido de frecuencia o SFRA. En esta prueba se conecta un generador de señal (o analizador de redes) con el cual se va a inyectar, sobre el devanado una tensión senoidal de baja amplitud, típicamente 10 Vpp, cuyo valor de frecuencia se varía de forma continua. A su vez, se mide la tensión (o corriente) en otro punto del devanado o en un devanado secundario correspondiente. El cociente de señal de salida sobre señal de entrada, expresado en decibelios, se grafica en función de la frecuencia. También se registra la fase relativa. Por lo general el rango de medida va de unos 20 Hz hasta 2 MHz, como recomienda la norma IEC 60076-18. Para hacer énfasis en los acoplamientos inductivos o capacitivos se emplean diferentes configuraciones de conexión, como, por ejemplo, se realizan pruebas con el devanado secundario abierto o en cortocircuito, según las necesidades. En transformadores trifásicos equivale a medir en cada bobina principal en combinación con sus secundarios, y viceversa, siguiendo los diferentes esquemas de los estándares IEC/IEEE.

El principio del SFRA, o más bien su fin es el análisis comparativo. Para esto es de suma importancia tener una huella de referencia, idealmente la curva FRA de la misma unidad en buen estado (o de otra fase idéntica con equivalencia de diseño), después de un evento crítico, como alguna falla franca o el transporte del equipo, o bien un plan de mantenimiento, se repite la medición y se superpone con la huella de fábrica, o previa al evento. Cualquier desviación apreciable (desplazamientos de picos, cambios de amplitud, nuevas resonancias o la desaparición de otras) puede indicar una alteración interna del devanado o del núcleo. En la práctica, para mejorar la repetibilidad se sigue una conexión estándar con cuidado en la puesta a tierra y se controla la posición del telar de derivación (tap changer), ya que éstos también afectan la respuesta en altas frecuencias. De esta forma, el barrido SFRA al ser un ensayo de muy baja tensión puede repetirse sin ningún tipo de riesgo y en cualquier instante de

la vida útil del transformador, proporcionando un diagnóstico complementario y altamente sensible con respecto a los ensayos convencionales.

### **2.3.5 Interpretación de Resultados SFRA**

La interpretación de los resultados FRA se basa en la comparación cuantitativa del trazo medido contra la referencia. Cuando ambos coinciden (sin diferencias significativas) se asume que el transformador no sufre daño interno. En cambio, desviaciones particulares señalan tipos específicos de falla. Por ejemplo, un desplazamiento axial del bobinado suele aumentar la inductancia de fuga en ciertas secciones, lo que desplaza las resonancias asociadas a frecuencias medias-bajas. Un corrimiento de picos a frecuencias más bajas puede indicar un acortamiento de vueltas (mayor inductancia), mientras que atenuaciones en altas frecuencias podrían sugerir cortocircuitos entre capas o defectos capacitivos en el arrollamiento. La deformación radial de espiras típicamente afecta resonancias de banda media, y las irregularidades en el núcleo magnético se reflejan principalmente en la respuesta de muy baja frecuencia. En general, el análisis del espectro se divide en bandas (baja, media, alta frecuencia) correlacionadas con la estructura interna: la banda baja está dominada por el núcleo, la banda media por el acoplamiento de fase a fase, y el alta por la geometría del devanado. De esta forma, al estudiar cada región se infiere dónde pudo originarse la falla.

La comparación de firmas FRA puede llegar a indicar la ubicación y tipo de falla (p. ej. desplazamiento axial de devanado de alta tensión, corto entre espiras del bobinado de baja, defectos en el cepillo del selector de derivaciones, etc.). Sin embargo, esta interpretación exige experiencia: actualmente no existe un criterio universal normalizado, por lo que suelen aplicarse métodos estadísticos o índices cuantitativos para evaluar la desviación. Algunos trabajos proponen índices numéricos basados en la comparación de la forma de las curvas en diferentes bandas, pero aún se considera un desafío de investigación. En todo caso, la FRA ha demostrado poder detectar una variedad cada vez mayor de defectos internos, aportando una visión complementaria a los ensayos tradicionales. En última instancia,

un análisis cuidadoso de los trazos FRA —preferiblemente por personal especializado o con apoyo de algoritmos inteligentes— permite diagnosticar desplazamientos de bobinados, deformaciones del núcleo y otros daños estructurales sin necesidad de desmontar el transformador, adelantando la acción de mantenimiento ante fallas potenciales que otros métodos no revelarían.

## **2.4 NORMALIZACIÓN DE LA PRUEBA SFRA**

### **2.4.1 IEC 60076-18 (Ed. I, Julio 2012)**

La norma IEC 60076-18:2012, titulada *Power Transformers – Part 18: Measurement of Frequency Response*, es el documento de referencia internacional que regula la ejecución del ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia (SFRA) en transformadores de potencia. Este estándar, emitido por el comité técnico IEC TC 14, define las metodologías, configuraciones de conexión y criterios de interpretación necesarios para garantizar mediciones repetibles y confiables.

El SFRA es un método de diagnóstico eléctrico que permite detectar daños mecánicos o desplazamientos internos sin necesidad de abrir el transformador. A diferencia de las pruebas eléctricas convencionales —como resistencia de devanados o relación de transformación—, este método analiza la respuesta del sistema frente a una señal de voltaje de baja magnitud y frecuencia variable, típicamente entre 20 Hz y 2 MHz, lo que permite identificar alteraciones estructurales en los devanados, el núcleo o el aislamiento.

Objetivos de la norma

La IEC 60076-18 busca:

- Estandarizar los procedimientos de medición para asegurar la repetibilidad entre distintos operadores o laboratorios.
- Definir configuraciones de conexión universales para cada tipo de diagnóstico.

- Especificar las condiciones de prueba que garanticen la validez de los resultados.
- Establecer criterios comparativos de interpretación en lugar de valores absolutos, fomentando la comparación entre fases, unidades gemelas o registros históricos.

### **Procedimiento estandarizado de medición**

La norma establece un proceso estructurado para la realización de la prueba SFRA, compuesto por cinco fases principales:

#### **1. Preparación del transformador**

Antes de iniciar el ensayo, el transformador debe encontrarse completamente desenergizado y conectado a tierra. Se deben desconectar las puestas a tierra auxiliares, los cables de control y cualquier circuito que pueda crear trayectorias paralelas de corriente. Es importante registrar el estado del equipo (en aceite, sin aceite, en servicio o fuera de servicio) y garantizar la accesibilidad a todos los terminales requeridos.

#### **2. Configuraciones de prueba**

La IEC 60076-18 describe tres configuraciones base:

- **Terminal a tierra (End-to-Earth)**
- **Entre terminales de un mismo devanado (End-to-End)**
- **Entre devanados distintos (Transfer Function).**

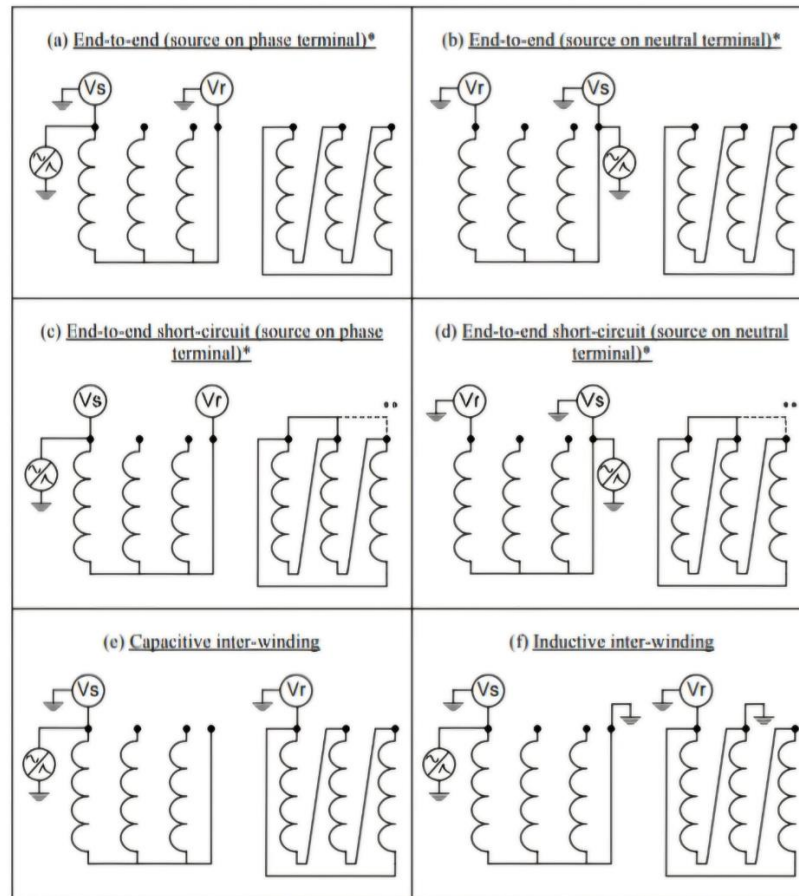
Sin embargo, en la práctica de campo —y siguiendo las recomendaciones derivadas de la norma— estas configuraciones se subdividen en **cuatro variantes operativas**, que permiten realizar un diagnóstico más detallado:

**Tabla 2.** Configuraciones de medición utilizadas en la prueba de Respuesta en Frecuencia (SFRA)

Configuración	Descripción técnica	Aplicación principal
<b>End-to-End (Circuito Abierto)</b>	Se inyecta la señal entre los extremos del mismo devanado, dejando los demás devanados abiertos.	Permite detectar desplazamientos axiales, pandeo o torsión de devanados.
<b>End-to-End (Corto Circuito)</b>	Similar a la anterior, pero con los devanados opuestos cortocircuitados para aumentar la sensibilidad.	Diagnóstico de cortocircuitos espira-a-espira y deformaciones localizadas.
<b>Interdevanado Capacitivo</b>	Se aplica señal entre un terminal del devanado de alta tensión y otro del devanado de baja tensión, con el resto de terminales aterrizados.	Analiza el acoplamiento capacitivo y el estado del aislamiento entre devanados.
<b>Interdevanado Inductivo</b>	Variante enfocada en frecuencias bajas, con excitación y medición entre devanados acoplados magnéticamente.	Permite evaluar desplazamientos relativos entre bobinas o pérdida de sujeción.

Estas cuatro configuraciones son equivalentes a las descritas en la norma bajo los términos *end-to-end*, *transfer function* y *ground reference*, pero adaptadas a los procedimientos operativos más utilizados por los fabricantes y laboratorios de prueba.

**Figura 19.** Configuraciones básicas de conexión para la prueba SFRA. Extraído de (CIGRÉ Working Group A2.26, 2008).



Las configuraciones representadas muestran las variantes más comunes del método End-to-End, donde se inyecta la señal entre los extremos de un mismo devanado. Estas configuraciones permiten detectar deformaciones mecánicas tales como desplazamientos axiales, pandeo o cortocircuitos espira a espira.

El estándar técnico recomienda realizar la medición tanto con el terminal de fase como con el terminal neutro excitado, y bajo condiciones de circuito abierto o cortocircuito, dependiendo del diagnóstico deseado. (CIGRÉ Working Group A2.26, 2008).

Las configuraciones interdevanado se aplican entre los devanados de alta y baja tensión para evaluar el acoplamiento electromagnético. (CIGRÉ Working Group A2.26, 2008).

- En el modo capacitivo, la señal aplicada analiza el estado del aislamiento entre devanados.
- En el modo inductivo, se examina la influencia del flujo magnético acoplado, útil para identificar desplazamientos relativos o pérdida de sujeción mecánica.

#### **2.4.2 Norma DL/T 911**

Durante los años 90's china experimento un gran crecimiento en su demanda energética, lo que llevo a amplio a grandes expansiones de la red eléctrica. Lo que trajo consigo grandes desafíos, la demanda de transformadores se incrementó en gran manera. Las pruebas tradicionales resultaban insuficientes para monitorear las condiciones completas de un transformador, sobre todo a nivel interno. Frente este desafío, las empresas empezaron a adoptar la prueba SFRA, pero surgieron ciertos problemas debido a que no había una norma nacional que regulara este procedimiento, entre ellos:

Inconsistencia en la aplicabilidad de la prueba dado que unos fabricantes o propietarios aplicaban diferentes rangos de frecuencia, así mismo unos utilizaban barrido logarítmico, otros exponencial.

No existía un criterio definido para la comparación entre curvas, lo que llevaba que unos realizaran la comparación a ojo, u a algoritmos propios.

La interpretación dependía demasiado del ingeniero, lo que no garantizaba su fiel repetibilidad.

En respuesta a estos desafíos el Ministerio de Energía de China, en conjunto con los comités técnicos de normalización eléctrica. redactaron en el año 2004 la norma DL/T 911. Esta norma se convirtió en el marco unificado para la ejecución de la prueba SFRA, la cual cubre:

- Procedimientos de prueba: preparación, conexión, configuración del barrido.
- Rango de frecuencias normalizado (20 Hz – 2 MHz típicamente).
- Requisitos de exactitud de amplitud y fase.

- Criterios de diagnóstico cuantitativo: correlación cruzada, desviaciones espectrales, comparación entre fases y respecto a la curva de referencia.
- Formato de almacenamiento de los datos (para que sean compatibles entre laboratorios y fabricantes).

**Tabla 3.** *Análisis de Problemas Previos y Soluciones Proporcionadas por la Norma DL/T 911*

<b>Problema previo</b>	<b>Solución que aporta DL/T 911</b>
Falta de método confiable para evaluar integridad mecánica del devanado	Estandariza el uso de SFRA para todos los transformadores de media y alta tensión
Resultados inconsistentes entre fabricantes	Define parámetros mínimos del instrumento y forma de presentación de resultados
Interpretación subjetiva y dependiente del operador	Obliga a usar métricas objetivas (coeficiente de correlación, desvío espectral, comparación fase a fase)
Transformadores que fallaban súbitamente sin señales previas	Permite detectar desplazamientos internos incipientes y retirarlos del servicio antes del colapso
Falta de trazabilidad histórica de condición mecánica	Requiere guardar la “huella mecánica” de fábrica para comparaciones futuras

Uno de los grandes aportes de esta norma, es su algoritmo para analizar los resultados de manera cuantitativa mediante el método de correlación, el cual permite calcular el factor relativo en 3 regiones de frecuencia, lo que permite tener un análisis numérico que refleje el grado de deformación presente en un devanado, esto evita tomar decisiones en base a una mera observación, lo cual puede resultar inexacto.

Algoritmo de análisis DL/T 911:

Para comprender el funcionamiento del algoritmo de análisis, es necesario entender como ya se mencionó anteriormente que se basa en la comparación entre curvas de respuesta en frecuencia de un mismo transformador.

**a) Varianzas:**

Sea  $N$  el numero de puntos de puntos de frecuencia dentro de la banda evaluada y  $X(k), y(k)$  las dos curvas a ser comparadas, la traza de referencia y la traza actual.

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ Y(k) - \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad (18)$$

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ X(k) - \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad (19)$$

Donde:

$\frac{1}{N} \sum X(k), \frac{1}{N} \sum Y(k)$  : Promedios (media) de cada traza en analisis.

$N$  : Numero de puntos de frecuencia dentro de la banda evaluada.

$X(k), y(k)$  : Las dos trazas a ser comparadas, la de referencia y la mas reciente.

$D_x, D_y$  : Son las varianzas de las curvas en esa banda de frecuencias.

Estas ecuaciones nos permiten cuantificar la estructura y ondulación característica de cada traza, esto se traduce en que, curvas con más picos y valles producto de resonancias y antirresonancias tendrán una varianza mayor. En síntesis, las varianzas capturan la energía de variación de cada huella en la banda considerada.

**b) Covarianza:**

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \cdot \left[ Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad (20)$$

Esta ecuación evalúa de forma paralela el cambio punto a punto de las dos trazas, si un pico o valle en la traza X coincide con otro pico o valle en la traza Y, la covarianza es grande y positiva. Si no hay similitud, la covarianza tiende a cero.

**c) Métrica  $LR_{xy}$ :**

$$LR_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (21)$$

Durante la comparación de las trazas X Y, lo que buscamos averiguar es su similitud, es decir, Si la curva X crece, ¿también lo hace la curva Y? Y cuando decrece, ¿también lo hace la curva Y?. Ante esta incógnita, se da la necesidad de integrar la métrica  $LR_{xy}$  la cual evalúa la correlación normalizada entre ambas trazas, su valor está en el rango  $[-1,1]$  donde cuanto más cercano a 1 es su valor, mayor semejanza existe entre ambas trazas para determinada banda de frecuencias.

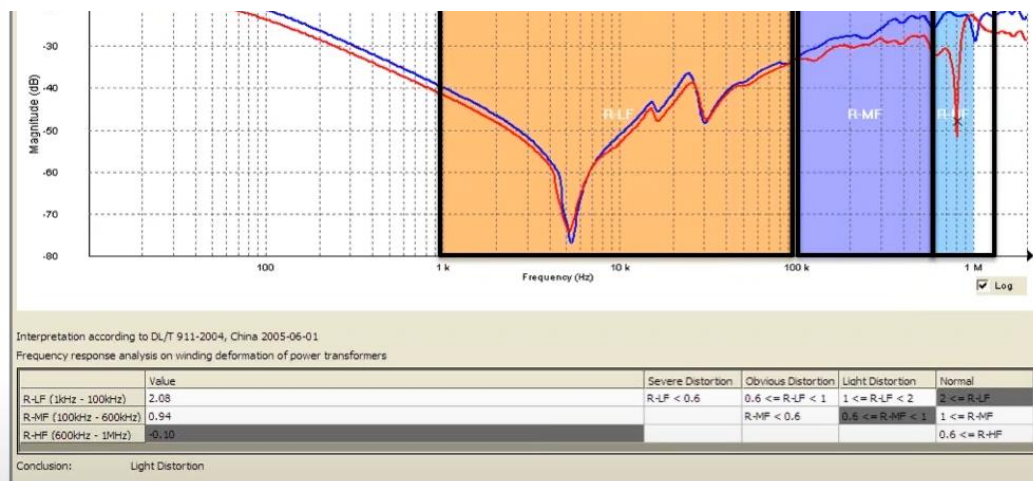
#### d) Conversión logarítmica:

$$R_{xy} = \begin{cases} 10, & \text{si } 1 - LR_{xy} < 10^{-10} \\ -\log_{10}(1 - LR_{xy}), & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (22)$$

La conversión a una escala logarítmica permite expresar pequeñas diferencias de correlación con mayor legibilidad.

Los valores de  $R_{xy}$  se agrupan según el rango de frecuencia para formar los indicadores RLF (1–100 kHz), RMF (100–600 kHz) y RHF (600 kHz–1 MHz).

**Figura 20.** Segmentación por bandas de frecuencia para análisis. Extraído de (Megger, *Análisis de la Condición Mecánica de Transformadores de Potencia Mitos y Verdades del Ensayo de SFRA*. 2016).



El criterio entonces establece que:

$R_{LF} < 0.6$  : Deformación severa.

$1.0 > R_{LF} \geq 0.6$  o  $R_{MF} < 0.6$  : Deformación obvia.

$2.0 > R_{LF} \geq 1.0$  o  $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$  : Deformación suave.

$R_{LF} \geq 2.0, R_{MF} \geq 1.0$  y  $R_{HF} \geq 0.6$ : Normal

Algoritmo de análisis NCEPRI (Normalized Cross-Power Ratio Index)

Pese a no estar descrito en la norma DL/T 911, fue desarrollado por el North China Electric Power Research Institute, con el fin de superar una deficiencia en el algoritmo definido en la norma antes mencionada, la cual tiene como limitante su baja sensibilidad a pequeñas diferencias locales. El principio de este algoritmo es medir la diferencia relativa de energía espectral ponderada.

**a) Cálculo del índice NCPRI:**

$$E_{12} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_{1i} - F_{2i})^2}}{N} \quad (23)$$

Donde  $F_{1i}$  y  $F_{2i}$  son las magnitudes en dB de las dos curvas en comparación a una misma frecuencia y N el numero de punto medidos.

Este criterio establece bandas de frecuencia por devanado de la siguiente forma:

- HV: [10 – 515][kHz]
- LV: [10 – 600][kHz]
- TV (Terciario): [10 – 700][kHz]

**c) Interpretación en dB:**

- $E_{12} < 3.5$  : Sin deformacion.
- $3.5 \leq E_{12} < 7.0$  : Deformacion leve.
- $E_{12} > 7.0$  : Deformación severa.

### 2.4.3 Otras Normativas Relevantes

Además de las normas IEC 60076-18 y DL/T 911-2004, existen otros documentos técnicos y guías internacionales que complementan el marco normativo del análisis de respuesta en frecuencia (SFRA). Estas referencias fortalecen la confiabilidad,

repetibilidad y trazabilidad de los resultados obtenidos en transformadores de potencia, especialmente en entornos industriales y de alta tensión.

### **IEEE Std C57.149-2013**

La **IEEE Std C57.149-2013 – Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers** constituye la principal referencia técnica en el ámbito americano. Este documento establece criterios de comparación entre curvas de respuesta, recomendaciones sobre instrumentación, procedimientos de calibración y pautas para la interpretación cualitativa y cuantitativa de resultados. A diferencia de la norma IEC, el estándar IEEE hace énfasis en la **correlación de resultados entre fabricantes y laboratorios independientes**, fomentando la creación de **bases de datos históricas** que permitan identificar patrones de falla específicos (IEEE Power & Energy Society, 2013).

### **CIGRÉ Technical Brochure 342 y WG A2.26 y Technical Brochure 812 WG A2.53**

El **Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ)**, a través del **Working Group A2.26**, publicó en 2008 la **Technical Brochure 342**, donde se compilan experiencias de campo y estudios comparativos entre transformadores dañados y en buen estado. Este documento sirvió de base para la estandarización posterior de la IEC 60076-18, proporcionando los **primeros criterios prácticos de interpretación** de curvas SFRA (CIGRÉ, 2008). Posteriormente, el grupo **CIGRÉ A2.53 (2018)** amplió el marco de diagnóstico, incorporando el análisis de **bushings, acoplamientos capacitivos y gestión de datos históricos**, consolidando así un enfoque integral de monitoreo de condición (CIGRÉ WG A2.53, 2018).

### **Normativas y guías complementarias de fabricantes**

Empresas fabricantes de equipos de medición, como **OMICRON Electronics** y **Megger Group**, han desarrollado sus propios manuales técnicos y recomendaciones

basadas en las normas IEC e IEEE. Por ejemplo, el **manual del FRANEO 800 (OMICRON, 2022)** detalla procedimientos de conexión, calibración y compensación de cables de medición para garantizar la linealidad del barrido de frecuencia. De manera similar, la **serie FRAX de Megger (Megger Group, 2020)** incluye directrices sobre el manejo de interferencias, comparación entre curvas y control de calidad de los resultados. Aunque no constituyen normas formales, estos documentos son ampliamente aceptados como **referencias de buenas prácticas** en laboratorios de ensayo y empresas de mantenimiento eléctrico (Omicron Electronics GmbH, 2019; Megger Group, 2020).

### **Normas nacionales y regionales**

En el ámbito latinoamericano, algunos organismos reguladores y empresas eléctricas han comenzado a incorporar la SFRA dentro de sus **protocolos de pruebas de aceptación y mantenimiento predictivo**. En El Salvador, la **Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET)** incluye lineamientos sobre ensayos eléctricos en su *Norma Técnica de Seguridad y Calidad del Servicio Eléctrico* (SIGET, 2019), aunque aún no contempla de forma explícita la SFRA, lo cual abre oportunidades para su futura normalización a nivel nacional.

## **CAPÍTULO 3: SITUACIÓN ACTUAL DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN EL SALVADOR**

### **3.1 Marco Regulatorio del Sector Eléctrico Salvadoreño**

El sector eléctrico salvadoreño opera bajo un marco regulatorio establecido por la Ley General de Electricidad (LGE) y su Reglamento (Asamblea Legislativa de El Salvador 1996;1997) (Asamblea Legislativa de El Salvador 1996;1997 Tomo 342), así como por las Normas Técnicas emitidas por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET). Estas disposiciones buscan asegurar un suministro eléctrico eficiente, continuo y de calidad, estableciendo condiciones técnicas y jurídicas para los agentes del mercado, incluyendo las empresas de generación, transmisión, distribución y comercialización, cuyas operaciones dependen de equipos estratégicos como los transformadores de potencia [SIGET]. Dentro de la estructura del sistema eléctrico nacional, cada etapa cuenta con actores regulados:

- En la generación, participan generadores térmicos, hidroeléctricos y geotérmicos, regulados bajo normas que exigen el cumplimiento de fechas de inicio de operación, calidad de suministro y confiabilidad del equipamiento (Asamblea Legislativa de El Salvador 1996;1997) (SIGET).
- En la transmisión, la empresa responsable de operar y mantener la red de transmisión nacional debe garantizar la disponibilidad de subestaciones y transformadores de alta potencia (Asamblea Legislativa de El Salvador 1996;1997 Tomo 342) (SIGET).
- En la distribución, las empresas concesionarias están obligadas a llevar la energía al usuario final cumpliendo los estándares de tensión, frecuencia y continuidad establecidos por (SIGET).

Estos actores están sujetos a regulaciones técnicas y legales que obligan al cumplimiento de estándares de calidad, eficiencia operativa y seguridad de los activos eléctricos. Los transformadores de potencia son considerados elementos críticos de la infraestructura del sistema, ya que permiten la transformación de niveles de tensión necesarios para la transmisión y distribución de la energía. Su correcto

funcionamiento es indispensable para la estabilidad de la red, y cualquier falla puede generar pérdidas económicas, interrupciones del servicio y riesgos para la seguridad de las instalaciones (SIGET).

En este sentido, el Reglamento de la Ley General de Electricidad, en su Artículo 39, establece que SIGET puede declarar la pérdida de concesión a empresas generadoras en caso de incumplimiento de los plazos para el inicio de operación, particularmente en proyectos hidroeléctricos y geotérmicos (Asamblea Legislativa de El Salvador 1996;1997 Tomo 342)(SIGET). A menudo, las causas de estos incumplimientos están relacionadas con demoras en la instalación de transformadores de potencia, debido a problemas logísticos, daños durante el transporte o defectos de fabricación (SIGET).

Los transformadores de potencia, aunque superen pruebas convencionales como la relación de transformación, resistencia de aislamiento o pruebas dieléctricas, pueden presentar fallas internas no detectables por estos métodos. Fallas como rotación de devanados, desplazamientos axiales, deformaciones por impactos o defectos de ensamblaje, pueden permanecer ocultas. Es aquí donde técnicas especializadas como la prueba SFRA resultan fundamentales para detectar cambios mecánicos internos que afectan el desempeño del transformador, aunque este conserve su aspecto externo intacto y aparente funcionalidad.

En el contexto salvadoreño, aún existen vacíos en la implementación obligatoria de pruebas avanzadas como SFRA en procesos de recepción, instalación o garantía de equipos importados. Sin embargo, el marco normativo vigente abre espacios para que, mediante la interpretación técnica y documental de las normas, se pueda respaldar el rechazo o la devolución de equipos defectuosos. La normativa técnica de SIGET, especialmente las NT-01 y NT-03, establece requisitos mínimos para calidad del servicio y calidad de tensión, lo que puede relacionarse con la necesidad de asegurar que los transformadores instalados cumplan con los parámetros operativos sin generar distorsiones o desequilibrios en la red.

Cabe señalar que un transformador dañado puede no sólo incumplir con los niveles de servicio exigidos, sino también afectar directamente el desarrollo económico de una zona industrial, proyecto habitacional o planta generadora. Por ello, la regulación no se limita únicamente a las condiciones operativas, sino también contempla sanciones, pérdida de concesiones o suspensión de permisos ante el incumplimiento de responsabilidades contractuales, técnicas y regulatorias.

Así, el presente ítem busca fundamentar que la operación y gestión de transformadores de potencia en El Salvador se encuentra regida por un cuerpo legal robusto, que, si bien no detalla pruebas específicas como SFRA, sí establece obligaciones técnicas que pueden y deben ser respaldadas con herramientas de diagnóstico avanzadas. Esto garantiza que el usuario final reciba un equipo en óptimas condiciones, que cumpla con las exigencias del sistema y que, en caso contrario, se cuente con los argumentos técnicos y legales suficientes para proceder a su reclamo, reposición o rechazo.

Este marco está compuesto por leyes, reglamentos y normas técnicas que establecen las condiciones para la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, así como para la operación y mantenimiento de los equipos involucrados, entre ellos los transformadores de potencia.

### **3.1.1 Ley General de Electricidad**

La Ley General de Electricidad (LGE), promulgada en 1996, es la principal normativa que regula las actividades del sector eléctrico en El Salvador. Esta ley establece las bases para la organización y funcionamiento del mercado eléctrico, promoviendo la competencia y la eficiencia en la prestación del servicio.

En su Artículo 1, la LGE define su ámbito de aplicación:

"La presente Ley norma las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. Sus disposiciones son aplicables a todas las entidades que desarrollen las actividades mencionadas, sean éstas de naturaleza pública, mixta o privada, independientemente de su grado de autonomía y régimen de constitución."

La LGE también establece las condiciones para la concesión de licencias, los derechos y obligaciones de los agentes del mercado, y los mecanismos de supervisión y sanción por parte de la autoridad reguladora.

### **3.1.2 Reglamento de la Ley General de Electricidad**

El Reglamento de la Ley General de Electricidad desarrolla los procedimientos necesarios para el cumplimiento de lo dispuesto en la LGE. Este reglamento detalla los requisitos técnicos y administrativos que deben cumplir los operadores del sector eléctrico.

En relación con los transformadores de potencia, el reglamento establece que la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET) es responsable de emitir las normas técnicas que regulan la calidad, seguridad y eficiencia de los equipos eléctricos.

Además, el reglamento contempla sanciones para los operadores que incumplan con las disposiciones establecidas, incluyendo la posibilidad de revocar concesiones en casos de incumplimiento grave.

### **3.1.3 Normas Técnicas Emitidas por SIGET**

La SIGET ha desarrollado una serie de Normas Técnicas (NT) que establecen los criterios y requisitos mínimos para la operación segura y eficiente del sistema eléctrico. Estas normas son de cumplimiento obligatorio para todos los agentes del sector.

Algunas de las normas relevantes en el contexto de los transformadores de potencia incluyen:

- NT-01: Norma de Calidad del Servicio de Transmisión y Distribución  
Establece los niveles mínimos de calidad que deben cumplir los servicios de transmisión y distribución de energía eléctrica, incluyendo parámetros como continuidad, tensión y frecuencia.
- NT-03: Requisitos Mínimos de Calidad de Tensión

Define los límites permisibles de variaciones de tensión en el sistema eléctrico, asegurando que los equipos conectados, como los transformadores, operen dentro de condiciones seguras y eficientes.

- NT-10 y NT-11: Coordinación de Protecciones y Requisitos de Seguridad. Estas normas establecen los criterios para la coordinación de protecciones eléctricas y los requisitos de seguridad en las instalaciones eléctricas, aspectos fundamentales para la operación de transformadores de potencia.

El cumplimiento de estas normas es esencial para garantizar la integridad y confiabilidad de los transformadores de potencia en el sistema eléctrico salvadoreño.

### **3.1.4 Rol de la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET)**

La SIGET es la entidad encargada de supervisar y regular las actividades del sector eléctrico en El Salvador. Sus funciones incluyen:

- Emitir normas técnicas y reglamentos que aseguren la calidad y seguridad del servicio eléctrico.
- Otorgar y supervisar las concesiones para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.
- Vigilar el cumplimiento de las disposiciones legales y técnicas por parte de los operadores del sector.
- Aplicar sanciones en caso de incumplimientos, incluyendo la revocación de concesiones.

La SIGET juega un papel crucial en la implementación y supervisión del marco regulatorio, asegurando que los transformadores de potencia y demás componentes del sistema eléctrico operen conforme a los estándares establecidos.

### **3.2 Procesos de Adquisición e Importación de Transformadores**

El presente estudio técnico busca reforzar las bases para la incorporación obligatoria de la prueba de respuesta en frecuencia (SFRA, por sus siglas en inglés) en transformadores de potencia de 1 MVA instalados en subestaciones eléctricas de El Salvador. Aunque en principio el esfuerzo se orienta al fortalecimiento de los procesos de adquisición e importación de estos equipos, el objetivo último es beneficiar directamente al consumidor final a través de una mayor confiabilidad en el suministro eléctrico. Dado que el cliente directo de un transformador es una empresa generadora, transmisora o distribuidora actores esenciales del sistema, el país tiene la responsabilidad de establecer exigencias técnicas mínimas que aseguren el óptimo estado del activo desde su fabricación hasta su instalación.

El cumplimiento riguroso de estándares internacionales en logística, transporte y pruebas de recepción puede representar una inversión inicial superior. Sin embargo, esta estrategia permite consolidar un marco de calidad más robusto, que promueve el desarrollo del sector eléctrico nacional en términos de confiabilidad operativa y trazabilidad técnica. En este contexto, se considera clave institucionalizar prácticas como la aplicación del ensayo SFRA antes de la puesta en servicio y tras cualquier movimiento significativo del equipo, ya que estos desplazamientos pueden generar daños estructurales no detectables por métodos convencionales.

Asimismo, esta propuesta busca fortalecer el rol regulador de la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET). A la SIGET le corresponde no solo asegurar que los nuevos activos ingresen al sistema bajo condiciones óptimas, sino también establecer criterios técnicos de seguimiento ante eventos operativos. Por ejemplo, en situaciones donde un transformador previamente instalado en una subestación de una empresa distribuidora deba ser trasladado a otra ubicación por razones técnicas, económicas o de emergencia, resulta indispensable validar su integridad antes y después del traslado. En tal sentido, la prueba SFRA permitiría establecer una línea base del comportamiento eléctrico del equipo antes de su movimiento, y luego verificar si existieron desplazamientos o deformaciones internas

en el núcleo o devanados durante la logística. Esta trazabilidad técnica fortalece la transparencia en la toma de decisiones operativas y habilita a la autoridad reguladora para auditar correctamente la calidad de la infraestructura eléctrica en operación.

La implementación de estas pruebas bajo un enfoque normativo también protege a los adquirientes frente a posibles reclamaciones contractuales, ya que la identificación de daños durante la entrega o después de un traslado permite una acción inmediata basada en resultados objetivos. Esta visión proactiva, en línea con estándares como el IEEE STD C57.125-2015, no solo aporta valor técnico al operador, sino que fortalece la gestión de activos a lo largo de su ciclo de vida.

A partir de lo anterior, se detalla a continuación el análisis de los modelos contractuales más comunes en procesos de adquisición de transformadores, así como las consideraciones logísticas y normativas que acompañan su importación.

### **3.2.1 Modelos de Contratación**

En El Salvador, la adquisición de transformadores se realiza principalmente por empresas distribuidoras, transmisoras o generadoras, mediante procesos licitatorios o compras directas. Los modelos contractuales más comunes son:

- Solo suministro (Supply Only): El proveedor entrega el equipo según las especificaciones del cliente, sin incluir transporte ni instalación. La garantía cubre defectos de fabricación únicamente. Según el PMI (2021, p. 523), este modelo corresponde a un contrato de suministro simple, donde el comprador asume la mayoría de los riesgos logísticos y técnicos (Project Management Institute 2021, 7th ed.).
- Diseño y suministro (Design and Supply): Incluye la ingeniería básica o de detalle proporcionada por el proveedor, pero el transporte, instalación, pruebas y puesta en marcha son responsabilidad del cliente. Este tipo de contrato se asemeja a los contratos de ingeniería parcial descritos en la guía del PMI (2021, p. 524) (Project Management Institute 2021, 7th ed.).

- Suministro e instalación (Supply and Installation): El proveedor entrega y asegura el montaje mecánico correcto del equipo, aunque la puesta en marcha puede ser responsabilidad del comprador. Este modelo combina elementos de un contrato de suministro con actividades de instalación, definido en normas de adquisiciones industriales (Turner, 2016, Cap. 7) (Turner, R. (2016). Handbook of Project-based Management (4th ed)).
- Llave en mano (Turnkey): El proveedor es responsable del proyecto completo: diseño, fabricación, logística, instalación y puesta en servicio. Garantiza mayor calidad y menor riesgo para el cliente, permitiendo un control integral de cronograma, alcance y costos (PMI, 2021, p. 525) (Project Management Institute 2021, 7th ed.).
- EPC (Engineering, Procurement and Construction): Similar a la llave en mano, pero con mayor involucramiento del cliente en la etapa de ingeniería. Es ampliamente utilizado en proyectos de generación, transmisión y subestaciones, y corresponde a la definición de contrato EPC del PMI (2021, p. 526) (Project Management Institute 2021, 7th ed.).
- Contrato marco (Framework Agreement): Permite adjudicar múltiples equipos o servicios bajo los mismos términos a lo largo del tiempo, ofreciendo economías de escala y estandarización técnica. Según Turner (2016, Cap. 5), este tipo de contrato es común en adquisiciones repetitivas o de largo plazo (Turner, R. (2016). Handbook of Project-based Management (4th ed)).

Desde la perspectiva de gestión de proyectos, los modelos EPC y llave en mano permiten una mejor gestión de riesgos, cronograma y control de calidad, mientras que modelos como “solo suministro” o “suministro e instalación” reducen la complejidad contractual, pero transfieren gran parte del riesgo técnico y logístico al comprador, lo que debe evaluarse cuidadosamente (Project Management Institute 2021, 7th ed.).(Turner, R. (2016). Handbook of Project-based Management (4th ed)).

El transporte e importación de transformadores de potencia es una fase crítica en la cual se pueden originar fallas mecánicas o estructurales que no son visibles externamente. Este riesgo puede mitigarse con pruebas como la SFRA al momento

de la recepción, lo cual permite detectar rotaciones del núcleo, desplazamientos de devanados o pérdidas de integridad estructural del equipo.

La logística incluye los siguientes elementos clave:

- Coordinación con empresas especializadas en transporte pesado (terrestre y marítimo), utilizando plataformas tipo cama baja o contenedores abiertos (flat-rack).
- Emisión de documentos como packing list, facturas comerciales, guías de embarque y certificados de origen.
- Coordinación con agentes aduanales y cumplimiento de los procedimientos establecidos por la Dirección General de Aduanas y el Ministerio de Hacienda.

La norma internacional IEC 60076-22-7 establece requisitos específicos para el transporte, almacenamiento e instalación de transformadores de potencia, recomendando condiciones de sujeción, límites de aceleración, inclinación y manipulación del equipo (IEC, 2017). Asimismo, la norma IEEE Std C57.125-2015 detalla prácticas recomendadas para evaluar mecánicamente los transformadores tras eventos de impacto o traslados, siendo el SFRA uno de los métodos principales para detectar daños internos no visibles (IEEE, 2015).

En El Salvador, aunque no existe una norma nacional específica sobre transporte de transformadores, estas referencias internacionales sirven como base técnica para elaborar términos de referencia y garantizar el cumplimiento de condiciones de entrega. Además, muchas empresas distribuidoras están adoptando lineamientos internos basados en estas normas para elevar los estándares técnicos de recepción de equipos.

Finalmente, cuando el transporte es responsabilidad del proveedor (como en contratos llave en mano), los riesgos se transfieren a este último, lo cual brinda mayor respaldo al comprador. Cuando es el cliente quien lo gestiona, se vuelve fundamental contratar

seguros de transporte, empresas certificadas y aplicar pruebas de aceptación que incluyan el SFRA, para justificar rechazos o reclamar garantías.

### 3.3 Procedimientos Actuales de Puesta en Servicio

La puesta en servicio de transformadores de potencia en subestaciones es una etapa crítica que garantiza la transición segura y eficiente del equipo desde su instalación hasta su operación en condiciones reales. En el contexto salvadoreño, especialmente en proyectos ejecutados bajo la modalidad "llave en mano", como el desarrollado por HITACHI en la subestación ATEOS para DELSUR, se siguen procedimientos estandarizados que aseguran la calidad y confiabilidad del sistema.

*Figura 21. Transformador de potencia ABB instalado en campo, durante labores de conexonado.*



### 3.3.1 Descripción del transformador bajo estudio

Figura 22. Placa de características del transformador trifásico ABB inmerso en éster vegetal.



En la Figura 22 se presenta la **placa de características** del transformador trifásico de potencia **ABB**, el cual constituye el equipo principal sobre el que se realiza la aplicación de la **prueba de Respuesta en Frecuencia (SFRA)**. Este transformador fue **fabricado en mayo de 2024** en la planta ABB ubicada en **Blumenau, Brasil**, y se encuentra **inmerso en éster vegetal** como fluido dieléctrico, lo que representa una alternativa ecológica frente al aceite mineral tradicional debido a su **biodegradabilidad y alto punto de inflamación**.

El equipo cuenta con una **potencia nominal de 10/14 MVA**, una **frecuencia de operación de 60 Hz** y una **tensión primaria de 46 kV  $\pm 1.0\%$**  con conexión en **delta ( $\Delta$ )**. El devanado secundario opera a **13.2 o 23 kV** con conexión **estrella (Y)**, lo cual permite su adaptación a diferentes niveles de distribución. Está diseñado conforme a la **norma ANSI/IEEE C57**, y utiliza un **sistema de enfriamiento ONAN/ONAF** con **radiadores y ventiladores** controlados por temperatura.

En cuanto a su comportamiento eléctrico, la **impedancia de secuencia positiva** es de **6.28 %**, valor que influye directamente en la regulación de tensión y las corrientes de cortocircuito. Los **niveles de aislamiento** establecidos son de **200 kV** para impulso atmosférico y **150 kV** para onda industrial, garantizando la seguridad dieléctrica ante sobretensiones. Además, el transformador posee un **cambiador de derivaciones bajo carga (OLTC)**, que permite ajustar la tensión de salida de forma automática, compensando variaciones en el sistema eléctrico.

Entre los datos constructivos más relevantes destacan un **peso total aproximado de 23,690 kg**, una **altura de 4.67 m** y un **tanque presurizado con nitrógeno**, cuya función es evitar la humedad y la oxidación interna del fluido dieléctrico. Esta característica es particularmente importante durante el transporte y almacenamiento, ya que previene la degradación del aislamiento y posibles desplazamientos mecánicos internos, los cuales pueden ser detectados mediante la prueba SFRA.

### **3.3.2 Fase Previa: Verificación Mecánica y Condiciones del Equipo**

Antes de la energización, se realiza una inspección física exhaustiva del transformador (**Ver Anexo B**), que incluye:

- Verificación estructural: Inspección del tanque, radiadores, bujes y accesorios para detectar posibles daños durante el transporte o instalación.
- Presión de nitrógeno: Comprobación de la presión interna para asegurar la integridad del aislamiento.
- Medición del punto de rocío: Evaluación de la humedad interna para prevenir fallas dieléctricas.

- Tratamiento de vacío: Eliminación de gases y humedad del sistema de aislamiento.
- Ensamblaje final: Instalación de componentes como bujes, radiadores, relés y tuberías.
- Llenado con aceite dieléctrico: Introducción de aceite tratado y filtrado para garantizar propiedades aislantes óptimas.

Estas actividades aseguran que el transformador esté en condiciones óptimas para soportar tensiones y cargas operativas.

### 3.3.3 Ensayos Eléctricos y Pruebas Funcionales

Posteriormente, se llevan a cabo pruebas eléctricas para validar el comportamiento del transformador (**Ver Anexo B**):

- Análisis de Respuesta en Frecuencia (SFRA): Detecta desplazamientos internos del núcleo o devanados, esenciales después del transporte o movimientos del equipo.
- Relación de Transformación (TTR): Verifica que la relación de voltajes entre primario y secundario cumpla con las especificaciones.
- Pruebas de aislamiento (Megado): Evalúan la resistencia del aislamiento entre devanados y hacia tierra.
- Resistencia óhmica de devanados: Mide la resistencia eléctrica de los devanados para detectar posibles anomalías.
- Pruebas de protecciones y controladores: Validan el funcionamiento de relés, anunciadores y sistemas de control.

Estas pruebas son fundamentales para asegurar la integridad eléctrica y funcional del transformador antes de su puesta en operación.

### **3.3.4 Integración y Comunicación**

Simultáneamente, se realizan actividades de integración con sistemas SCADA y automatización:

- Conexionado de señales: Integración de señales del transformador y transformadores de corriente (TCs) con la Unidad Terminal Remota (RTU).
- Verificación de funcionalidad: Pruebas de anunciadores y mímicos en gabinetes de control.
- Programación de comunicación: Configuración de protocolos de comunicación y pruebas de respuesta en la sala de control.

Estas actividades garantizan el monitoreo y control remoto eficiente de la subestación.

### **3.3.5 Validación Final y Energización**

Una vez completadas las pruebas y verificaciones, se realiza una inspección final conjunta con representantes del contratista, áreas de subestaciones, protecciones, SCADA y planificación. Se comprueba:

- Correspondencia de señales: Confirmación de que las señales transmitidas corresponden correctamente con las esperadas.
- Estado de protecciones: Verificación de la configuración y funcionamiento de los sistemas de protección.
- Condiciones de seguridad: Aseguramiento de que todas las condiciones son seguras para la energización.

La energización se coordina con el Centro de Control, asegurando que las cargas estén preparadas y los sistemas de protección activados

## **3.4 Estadísticas de Fallas en Transformadores**

Los transformadores de potencia son componentes esenciales en la infraestructura eléctrica, y su falla puede tener consecuencias significativas. Analizar las estadísticas de fallas permite identificar patrones y áreas de mejora en la operación y mantenimiento de estos equipos.

### 3.4.1 Situación en El Salvador

En El Salvador, aunque no existe una base de datos pública consolidada sobre fallas en transformadores, las empresas distribuidoras mantienen registros internos. Las fallas más comunes incluyen:

- Fallas mecánicas internas: Desplazamientos de devanados debido a transporte inadecuado o maniobras incorrectas.
- Humedad en el aislamiento: Ingreso de humedad por procesos de secado o filtrado deficientes.
- Fugas de aceite: Pérdida de propiedades dieléctricas y térmicas del aceite aislante.
- Fallas en componentes auxiliares: Mal funcionamiento de relés Buchholz, indicadores de nivel o sensores de temperatura.
- Descargas parciales: Colapsos dieléctricos por contaminación o envejecimiento del aislamiento.

Estas fallas se clasifican en:

- 1) Fallas tempranas: Ocurren durante la instalación o en el primer año de operación, generalmente por defectos de fabricación o errores en el montaje.
- 2) Fallas en operación: Se presentan después del primer año, comúnmente por envejecimiento, mantenimiento deficiente o condiciones operativas extremas.

**Figura 23.** Punto de izaje del tanque del transformador ABB, donde se observan marcas de fricción y oxidación superficial, indicativas de esfuerzos mecánicos durante el transporte o instalación.

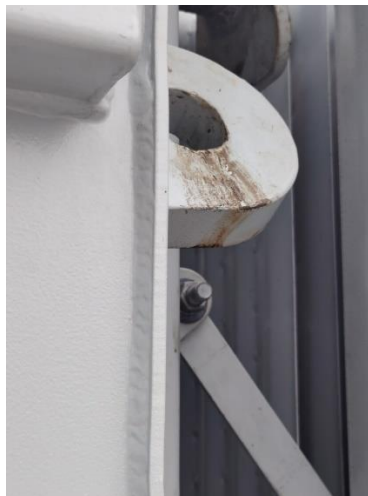


Durante la inspección física previa a la aplicación de la prueba SFRA, se observaron los puntos de izaje localizados en la parte superior del tanque del transformador. En la Figura 23 se muestra uno de estos puntos, utilizado para el levantamiento y posicionamiento del equipo durante su transporte e instalación.

Se evidencia presencia de desgaste superficial y marcas de fricción metálica en la superficie del alojamiento del gancho de izaje, además de rastros de óxido en la zona inferior. Este tipo de condición puede indicar que, durante el proceso de carga, descarga o montaje, el esfuerzo aplicado no fue completamente axial, generando tensiones mecánicas desbalanceadas sobre la estructura del tanque.

Tales esfuerzos pueden transmitirse internamente hacia el núcleo y los devanados, provocando ligeros desplazamientos o deformaciones que no siempre son visibles externamente, pero que sí alteran la respuesta en frecuencia medida por la técnica SFRA. Por esta razón, la inspección visual es un paso previo fundamental para interpretar adecuadamente los resultados de la prueba, ya que ayuda a correlacionar cambios en las curvas de respuesta con posibles daños mecánicos producidos durante el transporte o manipulación del transformador.

***Figura 24.** Detalle del punto de izaje lateral del transformador ABB, donde se observa corrosión superficial y desgaste por fricción, posibles indicadores de esfuerzos mecánicos no controlados durante el izaje o traslado del equipo.*



En la figura 19, se muestra una vista lateral de otro punto de izaje del transformador. Se aprecia oxidación superficial y desgaste mecánico en el borde interior del orificio de izaje, producto del contacto directo con elementos metálicos durante las maniobras de carga y descarga. Este tipo de deterioro, aunque aparentemente menor, es relevante desde el punto de vista mecánico y dieléctrico, ya que puede ser indicio de fuerzas de tracción no uniformes aplicadas al tanque del transformador.

La exposición de áreas metálicas sin pintura o con corrosión incipiente también puede favorecer la contaminación del fluido dieléctrico si el tanque pierde hermeticidad, además de comprometer la alineación estructural interna. Estas observaciones refuerzan la necesidad de realizar la prueba SFRA para determinar si los devanados o el núcleo sufrieron desplazamientos relativos durante el transporte o montaje.

***Figura 25.**Evidencia de oxidación circular en la base del transformador ABB, posiblemente originada por fricción o microdeslizamientos durante el izaje o transporte del equipo.*



En la Figura 2 se presenta una vista cercana de la base metálica del transformador, donde se observan marcas semicirculares de oxidación en la superficie de apoyo. Este patrón de corrosión indica fricción repetida o microdeslizamientos entre superficies metálicas durante el izaje o traslado del equipo, lo cual sugiere que los esfuerzos

mecánicos no fueron completamente distribuidos a través de los soportes estructurales.

La presencia de óxido y residuos de fricción en estas zonas puede ser consecuencia de movimientos durante la carga o descarga, vibraciones en el transporte o una deficiente protección anticorrosiva. Estas condiciones incrementan el riesgo de desalineación del núcleo magnético o de los devanados, lo que puede alterar la respuesta electromecánica interna del transformador y manifestarse posteriormente como variaciones anómalas en las curvas SFRA.

Como parte de la inspección física preliminar al ensayo de Respuesta en Frecuencia (SFRA), se examinaron los **puntos de izaje** del transformador ABB, los cuales permiten su levantamiento y transporte. En la **Figura 2** se observa el **punto de izaje superior**, claramente identificado por el símbolo de cadena pintado en la superficie del tanque. Este elemento es crítico para la integridad mecánica del transformador, ya que debe soportar el peso total del equipo durante las maniobras de carga y posicionamiento.

Durante la inspección visual se verificó que el tanque se encontraba **presurizado con nitrógeno**, según la etiqueta de advertencia, lo cual garantiza la **protección del aislamiento líquido (éster vegetal)** frente a la humedad ambiental. Sin embargo, se observaron **pequeñas marcas de impacto y desgaste** en la zona del gancho, lo que sugiere que en algún momento pudo haberse aplicado **una fuerza lateral o no axial** al momento del izaje. Este tipo de situación puede generar **tensiones residuales internas**, capaces de alterar la alineación del núcleo y los devanados, afectando así la respuesta electromecánica medida por la prueba SFRA.

**Figura 26.** Punto de izaje superior del tanque del transformador ABB, identificado con el símbolo de cadena. Se observa el rótulo de presurización con nitrógeno y leves marcas de desgaste en la superficie metálica.



### 3.4.2 Referencias Internacionales: SAIDI y SAIFI

Los indicadores SAIDI (System Average Interruption Duration Index) y SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) son métricas clave para evaluar la confiabilidad del suministro eléctrico.

- SAIDI: Representa la duración promedio de interrupciones por cliente en un año.
- SAIFI: Indica la frecuencia promedio de interrupciones por cliente en un año.

En Arabia Saudita, la Autoridad Reguladora de Electricidad y Cogeneración (ECRA) estableció objetivos a corto plazo para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico, proponiendo alcanzar un SAIDI de 150 minutos y un SAIFI de 2 interrupciones por cliente al año.

Estos objetivos reflejan un compromiso con la mejora continua de la calidad del servicio eléctrico, mediante iniciativas como el Programa Nacional de Mejora de la Red (NRIP), que busca reducir las interrupciones mediante la modernización de infraestructuras y la implementación de tecnologías avanzadas.

### 3.4.3 Aplicación Local y Mejores Prácticas

La implementación de indicadores como SAIDI y SAIFI en El Salvador permitiría:

- Monitoreo efectivo: Evaluar la confiabilidad del suministro eléctrico y detectar áreas críticas.
- Toma de decisiones informada: Priorizar inversiones en mantenimiento y modernización de infraestructuras.
- Comparación internacional: Medir el desempeño del sistema eléctrico salvadoreño frente a estándares internacionales.

Adoptar estas métricas contribuiría a mejorar la calidad del servicio y la satisfacción del cliente, alineándose con las mejores prácticas globales en gestión de redes eléctricas.

## 3.5 Costos Asociados a Transformadores

### 3.5.1 Costos de Adquisición

El costo total de un transformador de potencia y sus servicios complementarios puede dividirse en cuatro componentes principales: **adquisición, transporte e instalación, pruebas y puesta en marcha, y mantenimiento predictivo.** Estos elementos varían según la capacidad nominal, nivel de tensión, ubicación del sitio de instalación y requerimientos técnicos específicos de la empresa distribuidora.

El costo de adquisición corresponde al valor del equipo principal (el transformador) junto con los servicios básicos asociados a su instalación inicial. A partir de los presupuestos analizados, se obtuvieron las siguientes referencias económicas actuales para el contexto salvadoreño:

**Tabla 4.** Costos de adquisición referenciales de transformadores de potencia y servicios asociados en El Salvador.

Concepto	Empresa proveedora	Descripción / Servicio	Costo estimado (USD)
Ensayo de respuesta en frecuencia (SFRA)	Grupo Saytec S.A. de C.V. (Testing)	Prueba de diagnóstico de condición mecánica del transformador	<b>\$1,000.00</b> Subestaciones V2 BIZ-2025-2664
Ensayos eléctricos (Relación de transformación, resistencia óhmica y de aislamiento)	Grupo Saytec S.A. de C.V. (Testing)	Evaluación integral de transformadores de potencia	<b>\$900.00</b> (sin IVA) Subestaciones V2 Deals Servicio...
Reemplazo e instalación de transformador 1 MVA (SE Ateos)	SSAI Ingenieros	Suministro e instalación de transformador, diseño de protecciones y pruebas finales	≈ <b>\$45,000.00</b> (estimado sin IVA) SSAI INGENIEROS REEMPLAZO DE TR...
Reemplazo e instalación de transformador 7.5 MVA (46–23 kV)	SSAI Ingenieros	Proyecto completo “llave en mano”, incluye pruebas SFRA, instalación y puesta en servicio	≈ <b>\$1,200,000.00</b> (estimado sin IVA) SSAI INGENIEROS REEMPLAZO DE TR...

### Análisis

Los presupuestos proporcionados por Testing (Grupo Saytec) y SSAI Ingenieros muestran que los costos de adquisición pueden variar en función de:

Capacidad del transformador: los costos aumentan de forma exponencial conforme la potencia nominal crece (de 1 MVA a 7.5 MVA, el costo aumenta casi 27 veces).

Nivel de tensión: transformadores de mayor tensión requieren aislamiento más robusto y equipos complementarios (interruptores, relés diferenciales, RTU).

Normativas aplicadas: las empresas locales operan bajo estándares internacionales como IEEE C57.149-2013, IEC 60076-18, y la normativa SIGET (2019), lo que garantiza trazabilidad y calidad.

Costos adicionales: transporte, instalación, pruebas y seguros (aproximadamente un 15–20% del valor del equipo principal).

En términos generales, el precio de adquisición de un transformador nuevo de potencia en El Salvador oscila entre \$30,000 y \$800,000, según la capacidad y nivel de tensión. Estos valores son coherentes con cotizaciones regionales publicadas por fabricantes como Siemens y ABB para equipos de similares características.

### **3.5.2 Costos de Transporte e Instalación**

En muchos casos, los costos de transporte e instalación están incluidos de forma implícita dentro del precio del transformador cuando la adquisición se realiza bajo una modalidad integral (llave en mano o DDP). No obstante, si el cliente asume estas tareas por su cuenta, es importante considerar de forma detallada los siguientes elementos:

- Transporte terrestre y marítimo, incluyendo permisos especiales por sobredimensión o sobrepeso.
- Desaduanaje y manejo logístico portuario.
- Grúas de alta capacidad para descarga y posicionamiento del transformador.
- Personal técnico especializado para el montaje mecánico en sitio.
- Suministro de materiales auxiliares (aceite, herramientas, conexiones temporales).
- Tratamientos de vacío y filtrado de aceite, si no son provistos por el fabricante.

Estos costos pueden representar un porcentaje significativo del presupuesto total si no se incluyen desde el inicio en el contrato de suministro.

### **3.5.3 Costos de Pruebas Convencionales**

Las pruebas de comisionamiento que deben realizarse en sitio antes de la energización del transformador tienen un costo estimado que puede rondar los \$4,000 USD, dependiendo del alcance, tipo de transformador y protocolos requeridos. Estas pruebas incluyen:

- SFRA (Análisis de respuesta en frecuencia)
- TTR (Relación de transformación)
- Megado (resistencia de aislamiento entre devanados y a tierra)
- Resistencia óhmica de devanados
- Pruebas funcionales de relés y protecciones
- Verificación de controladores, mímicos y señalización
- Ensayos en frío de comunicación con sistemas SCADA

Este conjunto de pruebas es obligatorio para certificar la integridad eléctrica y operativa del transformador previo a su puesta en servicio.

#### **3.5.4 Costos por Fallas y Reemplazo**

Aunque menos frecuentes, las fallas en transformadores de potencia representan uno de los escenarios más costosos para una empresa distribuidora o industrial. En caso de daño mayor o necesidad de reemplazo:

- El costo puede oscilar entre 10% y 30% del valor del transformador, solo en términos de reparación, logística y mano de obra.
- A esto se suman los costos de oportunidad: interrupciones del servicio, pérdida de producción, uso de equipos temporales y personal adicional.
- En muchas ocasiones, el verdadero impacto no es el reemplazo del equipo en sí, sino la pérdida de utilidad y el tiempo de desuso, que pueden elevar el perjuicio económico a cientos de miles de dólares o más, dependiendo del sector y la criticidad de la carga.

Por ello, asegurar la calidad en las etapas de adquisición, instalación y pruebas reduce significativamente el riesgo financiero a largo plazo.

## CAPÍTULO 4: APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PRUEBA SFRA

### 4.1 Equipos Utilizados para Pruebas SFRA

*Figura 27. Analizador de barrido de frecuencia Omicron FRANEO 800.*



El FRANEO 800 es un equipo especializado para realizar pruebas de análisis de barrido en frecuencia. Es un equipo portátil y compacto que permite monitorear las condiciones internas, tanto mecánicas como eléctricas de un transformador, un gran paso en la detección y la prevención de fallas, ya que evita un proceso más tedioso y arriesgado para monitorear fallas internas.

Su principio de funcionamiento consiste en generar una señal de bajo voltaje que se puede ajustar desde 0.1 V a 10 V pico-pico, a múltiples frecuencias, típicamente barriendo desde los 20 Hz a los 2 MHz. La señal se inyecta en un extremo del devanado, y se mide la respuesta de voltaje en el otro extremo. Efectuando una comparación entre la señal de entrada y la señal de salida, a fin de definir una función de transferencia del equipo en estudio en un rango de frecuencias como se mencionó anteriormente, esto nos permite. Dado que la medición se efectúa en el dominio de la frecuencia, no es necesario realizar transformaciones adicionales. Cada transformador tiene su huella de fábrica, que depende directamente de sus características de diseño interno, que se ven reflejadas en un conjunto de inductancias y capacitancias.

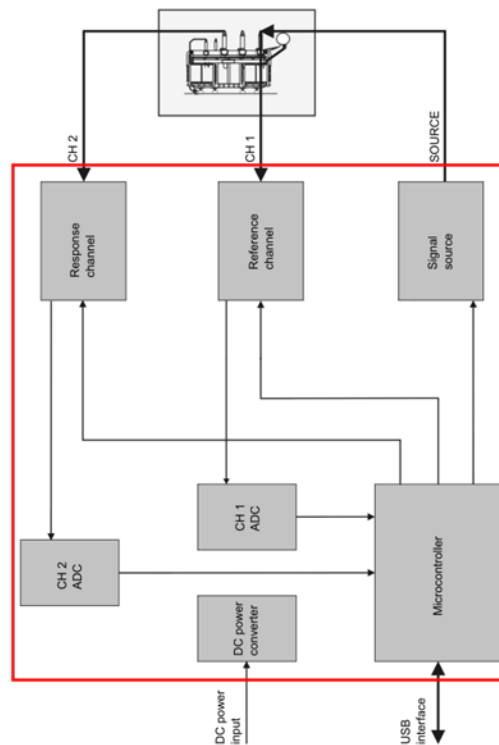
## Arquitectura electrónica interna:

**El FRANEO 800 emplea una arquitectura de analizador vectorial de dos puertos con:**

- **Generador de barrido** sinusoidal con **impedancia de salida de 50  $\Omega$**  y control digital de amplitud/frecuencia.
- **Módulos de acoplamiento y filtrado** para minimizar interferencias y asegurar referencia equipotencial.
- **Canales de medición** (referencia y respuesta) de **alta sensibilidad** y gran **rango dinámico (>150 dB)**, que permiten medir con precisión incluso señales muy atenuadas.
- **Procesamiento digital y control** a través de **Primary Test Manager (PTM)**, que automatiza la secuencia de barrido, la adquisición y el graficado en magnitud (dB) y fase, incorporando chequeos de calidad como **Ground Loop Check** para validar las puestas a tierra antes de medir (OMICRON, 2019; OMICRON, s. f.).

Esta arquitectura; generación, acoplamiento, medición y procesamiento maximiza la **repetibilidad** y la **exactitud**, al tiempo que cumple los requisitos de instrumentación y método definidos por **IEC 60076-18** y la **guía IEEE C57.149** para la ejecución e interpretación del ensayo SFRA (IEC, 2012; IEEE, 2024).

**Figura 28.** Diagrama de bloques del sistema de medición SFRA mostrando la configuración de equipos y conexiones para la adquisición de datos de respuesta en frecuencia.



**Ventajas técnicas del FRANEO 800 frente a otros analizadores SFRA:**

**Tabla 5.** Comparación de características técnicas del analizador FRANEO 800 frente a otros equipos SFRA.

Característica técnica	FRANEO 800 (OMICRON)	Otros analizadores (Megger FRAX, Doble M5400)	Ventaja práctica
<b>Rango dinámico</b>	>150 dB	Menor (típ. 100–120 dB)	Permite detectar variaciones muy sutiles, incluyendo resonancias atenuadas.
<b>Algoritmo de barrido</b>	Adaptativo: mayor densidad de puntos en zonas críticas	Lineal uniforme, más lento	Pruebas más rápidas y con mayor resolución donde se necesita.
<b>Salida de señal</b>	Variable, hasta 10 Vpp	Generalmente fija ( $\leq 10$ Vpp)	Posibilidad de igualar condiciones históricas o

			compensar ruido ambiental.
<b>Chequeo de bucle de tierra (Ground Loop Check)</b>	Integrado, bloquea la prueba si la puesta a tierra es incorrecta	Usualmente ausente	Aumenta la confiabilidad y seguridad de la medición.
<b>Portabilidad y robustez</b>	Compacto, con batería integrada y carcasa resistente	Equipos más grandes, requieren alimentación externa	Mayor facilidad de uso en campo.
<b>Accesorios de conexión</b>	Pinzas y trenzas diseñadas para minimizar ruido y variaciones	Conexiones convencionales, más sensibles al ruido	Repetibilidad más alta, especialmente en altas frecuencias.
<b>Cumplimiento normativo</b>	IEC 60076-18 e IEEE C57.149 (últimas ediciones), alineado con CIGRÉ 812	Puede no cubrir todas las recomendaciones recientes	Total conformidad con normas y guías internacionales.

#### 4.1.1 Normas y Guías Aplicables

El ensayo SFRA realizado con el FRANEO 800 se llevó a cabo bajo el marco de las principales normas y guías internacionales, lo que asegura que tanto el equipo como el procedimiento cumplen con criterios técnicos estandarizados y reproducibles:

- **IEC60076-18:2012**

Esta norma regula la medición de la respuesta en frecuencia en transformadores. Define los métodos de conexión, el rango de barrido de frecuencia y los requisitos mínimos del instrumento de medición. Así mismo, hace énfasis en la necesidad de disponer de referencias de comparación confiables, como las huellas de fábrica y define configuraciones

estandarizadas, como las mediciones end-to-end en abierto, en cortocircuito y entre devanados.

- **IEEE-C57.149-2012**

Guía que complementa la IEC en cuanto a configuraciones y criterios de ensayo, con ligeras variaciones en conexiones recomendadas. Establece también los parámetros de desempeño que debe cumplir el instrumento en términos de rango dinámico, resolución y número de puntos por década para asegurar la calidad del ensayo.

- **CIGRÉ Technical Brochure 342 (2008)**

Esta guía fue pionera ya que consolidó las primeras recomendaciones de buenas prácticas en SFRA, sirviendo de base para la elaboración de la norma IEC 60076-18.

- **CIGRÉ Technical Brochure 812 (2020):**

Esta guía es la actualización más reciente que amplía la interpretación de resultados y ofrece ejemplos prácticos de fallas reales detectadas mediante la prueba de SFRA. Recalca la importancia de tener a disposición curvas históricas o de referencia como base de comparación y proporciona guías detalladas sobre la sensibilidad de la técnica frente a los diferentes tipos de defectos que puede detectar.

El FRANEO 800 está certificado para cumplir con las normas IEC 60076-18 e IEEE C57.149, y su aplicación en este trabajo se resaltan también en las recomendaciones de CIGRÉ, para garantizar que las pruebas a realizar sean técnicamente válidas, comparables y ajustadas a las mejores prácticas internacionales.

Configuraciones típicas de la prueba SFRA:

**Tabla 6.** Configuraciones de conexión utilizadas en la prueba SFRA y sus objetivos principales

Configuración	Descripción	Objetivo principal
<b>End-to-End (abierto)</b>	Señal aplicada entre terminal de fase y neutro/opuesto, con devanado opuesto en abierto.	Obtener la respuesta global de transferencia en condición de vacío.
<b>End-to-End (corto)</b>	Señal aplicada con el devanado opuesto en cortocircuito.	Resaltar la respuesta de cortocircuito y detectar cambios en inductancias de fuga.
<b>Entre devanados</b>	Señal aplicada entre un devanado (ej. AT) y otro devanado (ej. BT) con el resto aterrizado.	Evaluar acoplamientos entre devanados, detectar desplazamientos relativos.
<b>Fase a fase</b>	Señal aplicada entre dos terminales de fase de un mismo devanado.	Identificar asimetrías mecánicas entre fases y fallas diferenciales.
<b>Fase a tierra</b>	Señal aplicada entre un terminal de fase y tierra, con el resto aterrizado.	Analizar capacitancias a tierra, posibles defectos en bushings o aislamiento a masa.

## 4.2 Casos de Estudio

### 4.2.1 Transformador ABB Subestación Ateos Del SUR

Configuración de Prueba:

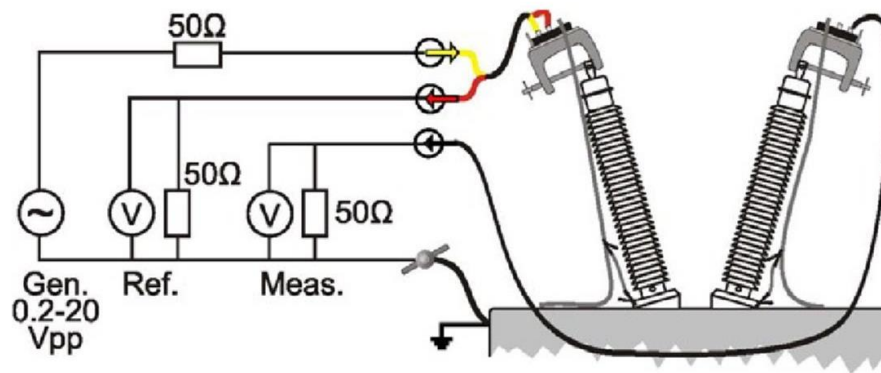
En los informes *Puesta en Marcha TP ABB – Pruebas Eléctricas, ... – Escaneo Dinámico* y *... – SFRA/OLTC* se detalla la configuración utilizada para obtener las curvas SFRA del transformador.

Para este transformador se utilizó la configuración **“End to End” abierta**: es decir, la señal se inyecta desde los terminales de alta tensión con el devanado de baja tensión en circuito abierto, y viceversa, desde baja tensión con alta en abierto. Cada fase se midió de forma individual, conectando el FRANEO 800 entre un terminal de fase y

el neutro (o terminal opuesto) del devanado bajo prueba, mientras los demás devanados se encontraban **desconectados y aterrizados** según lo recomendado por la IEC, con el objetivo de minimizar las interferencias.

**Figura 29.** Esquema de conexión para prueba SFRA en transformador monofásico mostrando generador, referencias de  $50\Omega$  y puntos de medición en los devanados.

*Extraído de (Islam, Khan, & Hoque, 2011)*



Adicionalmente, se efectuaron **mediciones complementarias en cortocircuito**, aplicando la señal desde los terminales de alta tensión con el devanado de baja tensión cortocircuitado. Esta configuración hace énfasis en la **respuesta de cortocircuito y las inductancias de fuga**, esta configuración ofrece información que no se obtiene en condición de vacío.

Para este transformador de dos devanados por fase se obtuvieron **nueve curvas SFRA on-site**:

- Tres curvas de las fases medidas desde AT en vacío.
- Tres curvas desde AT con BT en corto.
- Tres curvas desde BT en vacío.

Esta batería de pruebas abarca completamente las recomendaciones de las normas IEC 60076-18 e IEEE C57.149.

Con respecto al **cambiador de tomas bajo carga (OLTC)**, durante la prueba SFRA se fijó en la **posición nominal** (tap de operación), garantizando consistencia con futuras comparaciones, ya que la posición de tap influye en las inductancias y puede modificar la curva. Como complemento, en el informe *Escaneo Dinámico OLTC* también se registró una prueba independiente (DRM, *Dynamic Resistance Measurement*) donde se operó el OLTC a través de sus posiciones. Esta prueba permitió verificar la continuidad y los tiempos de conmutación, detectando eventuales micro interrupciones o resistencias de transición anormales. La combinación de ambas pruebas aportó información importante: la DRM comprobó el desempeño mecánico-eléctrico del OLTC, y la SFRA que las operaciones de tap no causaron variaciones inesperadas en las curvas.

En la aplicación de las pruebas se tomaron en cuenta también aspectos prácticos que garantizan calidad y repetibilidad:

- Uso de cables coaxiales cortos para reducir interferencias.
- Aplicación de trenzas de tierra en cada conexión para asegurar un buen retorno de señal.
- Verificación de continuidad de tierra mediante la función integrada del FRANEO (Ground Loop Check).
- Barrido de frecuencia desde **20 Hz hasta 2 MHz**, densificando puntos hasta **10 MHz** en pruebas específicas según el informe.

Los datos obtenidos en los informes, muestran que las **curvas trifásicas iniciales** se encontraban **bien alineadas entre sí en la mayor parte del espectro de frecuencia**, con leves diferencias a bajas frecuencias que se pueden atribuir a la influencia normal del núcleo, en particular entre la fase central y las fases externas. Estas curvas de puesta en marcha se conservarán como **referencia base** para comparaciones futuras durante la vida útil del transformador.

#### **Pruebas convencionales:**

Durante la puesta en marcha del transformador, también se le hicieron otras pruebas convencionales además de la prueba SFRA, con el fin de obtener un perfil lo más

completo posible de la condición del transformador. Los resultados obtenidos en cada prueba se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 7.** Resultados e interpretación de pruebas eléctricas convencionales en el transformador de potencia.

Prueba realizada	Resultados obtenidos	Interpretación
Resistencia de devanados	Órdenes de <b>mΩ en AT</b> y <b>decenas de mΩ en BT</b> , con desequilibrios del <2%	Equilibrio trifásico correcto, dentro de tolerancia.
Relación de transformación (TTR)	Diferencia de <0.2% respecto al valor nominal en todos los taps	Precisión aceptable, confirma exactitud de los devanados.
Tensión aplicada e inducida	Cumplidas sin anomalías reportadas.	Buen aislamiento entre devanados.
Factor de disipación dieléctrica ( $\tan \delta$ )	Valores bajos, ~0.4 – 0.5% a 10 kV y 20 °C.	Buen estado del aislamiento sólido y líquido.
Corriente de excitación	Valores normales y consistentes entre fases.	Núcleo en buen estado, sin caminos de fuga.
Escaneo dinámico OLTC (DRM)	Conmutaciones uniformes, sin micro interrupciones ni resistencias de transición anormales.	OLTC operativo en condiciones normales.

Resultados obtenidos en la prueba SFRA:

**Curvas de fabrica:**

En la etapa de aceptación en fábrica se obtuvieron las primeras curvas SFRA del transformador. Estas curvas son la huella original del equipo, son la referencia principal para futuras mediciones.

En la región de bajas frecuencias (hasta 2 kHz) se observó una pendiente inductiva ascendente la cual es característica de transformadores en buen estado. En el rango medio (2–100 kHz) observamos la primera resonancia asociada con la inductancia de

magnetización y la capacitancia a tierra, observándose una buena correspondencia entre fases. Por último, a altas frecuencias (por encima de 100 kHz hasta 2 MHz) las curvas de las tres fases se mantuvieron alineadas, confirmando uniformidad en las capacitancias interespiras e interdevanado.

Estas mediciones confirmaron que el transformador salió de fábrica en condiciones eléctricas y mecánicas saludables, sin evidencias de desplazamientos o deformaciones internas.

### **Curvas obtenidas en campo en Subestación Ateos del Sur:**

En campo se repitieron las pruebas siguiendo la misma configuración de conexión que en fábrica. Con el objetivo de comprobar que durante el traslado el equipo no haya sufrido daños internos en los devanados o el núcleo.

Al comparar las curvas obtenidas en campo con las de fábrica se observó una coincidencia estrecha en todo el espectro. La única diferencia apreciable fue una ligera mayor amplitud en la fase B a bajas frecuencias, fenómeno que se observó en las mediciones de fábrica y que es atribuido a la simetría del núcleo. En las frecuencias medias y altas, las tres fases se mantuvieron bien alineadas, descartando movimientos diferenciales entre los devanados.

En resumen, las curvas de campo fueron validadas como la **huella oficial de referencia en servicio**, a partir de la cual se harán las comparaciones futuras durante la vida operativa del transformador.

### **Interpretación general:**

La coherencia existente entre las curvas de fábrica y las de campo nos demuestra que el transformador no sufrió daños durante transporte ni el montaje, y que aún conserva su integridad mecánica y eléctrica. El comportamiento que se observó en los diferentes rangos de frecuencia como la pendiente inductiva en baja o las resonancias alineadas en media y consistencia capacitiva en alta, nos confirma una condición mecánica saludable.

### **Evaluación cuantitativa (DL/T 911-2004 y método NCEPRI):**

Además de la comparación visual de las curvas de fábrica y de campo, se aplicaron criterios cuantitativos para objetivar la similitud entre mediciones. Conforme al estándar chino **DL/T 911-2004**, el barrido se divide en tres bandas y se calculan índices de discrepancia por banda:

- **RLF (Low-Frequency Ratio):** cuantifica la **diferencia entre curvas en baja frecuencia** (típicamente hasta  $\sim 2$  kHz). Es sensible a fenómenos ligados al **núcleo y a la magnetización** (p. ej., variaciones de la pendiente inductiva).
- **RMF (Mid-Frequency Ratio):** mide la **diferencia en la banda media** ( $\approx 2$ –100 kHz), donde dominan la **inductancia de fuga y el acoplamiento entre devanados**; es útil para detectar **desplazamientos axiales** o cambios geométricos globales.
- **RHF (High-Frequency Ratio):** evalúa la **diferencia en alta frecuencia** ( $>100$  kHz hasta el MHz), más influida por **capacitancias locales, conexiones, bushings y cables de salida**; ayuda a evidenciar anomalías localizadas en terminales o accesorios.

Como verificación global, se aplicó además el **método del *China Electric Power Research Institute (NCEPRI)***, que calcula un **índice E de similitud global** sobre todo el barrido: **valores bajos implican alta concordancia** entre la curva de campo y la de referencia. La combinación de DL/T 911-2004 (por bandas) y NCEPRI (global) **complementa el análisis gráfico**, aportando un dictamen objetivo sobre la condición del devanado cuando las curvas coinciden dentro de la repetibilidad esperada (IEC 60076-18; CIGRÉ TB 812).

#### **4.2.2 Transformadores en Operación**

Se efectuaron barridos de frecuencia en los devanados de alta y baja tensión del transformador, tanto en configuraciones fase-fase como fase-tierra. Cada medición fue comparada con valores normativos para determinar el estado estructural. Las pruebas se realizaron en condiciones controladas, garantizando la repetibilidad del ensayo SFRA.

**Tabla 8. Registro del plan de mediciones SFRA**

Trazos de prueba										
Nombre	Toma	Ref.	Resp.	Cortocircuitado	Conectado a tierra	Terc.	GLC1	GLC2	Tiempo	Comentario
● 1: H1 H3	máx	A	C	Ninguna	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:39 p. m.	✓
● 2: H2 H1	máx	B	A	Ninguna	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:44 p. m.	✓
● 3: H3 H2	máx	C	B	Ninguna	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:47 p. m.	✓
● 4: X1 X0	máx	a1	n1	Ninguna	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:53 p. m.	✓
● 5: X2 X0	máx	b1	n1	Ninguna	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:54 p. m.	✓
● 6: X3 X0	máx	c1	n1	Ninguna	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:59 p. m.	✓
● 7: H1 H3	máx	A	C	a1-b1-c1	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:40 p. m.	✓
● 8: H2 H1	máx	B	A	a1-b1-c1	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:42 p. m.	✓
● 9: H3 H2	máx	C	B	a1-b1-c1	Ninguna	cerrada	Ω	Ω	10:48 p. m.	✓

La tabla es un **registro del plan de mediciones SFRA**, donde se documentan las conexiones específicas realizadas en cada trazo (o configuración de prueba). Cada fila es **una medición individual** hecha entre dos terminales del transformador, siguiendo un protocolo definido (normalmente IEEE C57.149 o CIGRE TB 812).

### Significado de cada columna de la tabla 4

**Tabla 9. Significado de cada columna de la tabla 4.**

Columna	Significado
<b>Nombre</b>	Identificador del trazo o medición. Ejemplo: “1: H1 H3” significa que la medición se hizo entre las terminales H1 y H3.
<b>Toma</b>	Indica la posición del conmutador de derivaciones ( <i>tap changer</i> ) durante la medición. “máx” indica que estaba en la posición de máxima tensión nominal.
<b>Ref.</b>	Terminal de referencia del instrumento SFRA (por ejemplo, A, B, o C en el lado de alta tensión).
<b>Resp.</b>	Terminal de respuesta o conexión de retorno (por ejemplo, C o n1, dependiendo del lado).
<b>Cortocircuitado</b>	Indica si alguna fase o devanado fue intencionalmente cortocircuitado durante la medición (para aislar la respuesta de una fase específica).
<b>Conectado a tierra</b>	Señala si algún punto (neutro o fase) fue puesto a tierra durante la medición.
<b>Terc.</b>	Define si el devanado terciario (si lo hay) está abierto o cerrado; en este caso, “cerrada” significa que está conectado en bucle cerrado.

<b>GLC1 / GLC2 (Ω)</b>	Son las mediciones de impedancia de conexión (Ground Loop Check). “Ω” indica que las conexiones fueron correctas (sin bucles de tierra parásitos).
<b>Tiempo</b>	Hora exacta en que se realizó la medición. Permite comprobar la secuencia temporal y correlacionarla con los trazos registrados.
<b>Comentario</b>	Suele marcar el estado de la prueba. El símbolo verde <input checked="" type="checkbox"/> indica que la medición fue satisfactoria (sin errores de conexión ni interferencias).

### Interpretación general

Esta tabla confirma que se realizaron **nueve mediciones SFRA válidas**, abarcando:

- Las fases de **alta tensión (H1, H2, H3)** en distintas combinaciones, y
- Las de **baja tensión (X1, X2, X3)**, además de pruebas con neutros (n1).

Los horarios y los estados “cerrada” indican que todas las pruebas fueron realizadas de forma correcta y completa, sin interrupciones ni fallas eléctricas.

Así también muestra **cómo se configuró el barrido de frecuencias** durante el ensayo SFRA del transformador, ver Tabla 6.

El método SFRA consiste en aplicar una señal eléctrica de amplitud constante, pero **variando la frecuencia**, para obtener la respuesta del devanado a lo largo del espectro (de 20 Hz a 2 MHz en este caso).

Cada rango define **una banda de análisis** con distinta resolución y tipo de barrido.

**Tabla 10.** Configuración de los rangos de frecuencia para el ensayo SFRA.

#### Rangos de frecuencia personalizados

Desde la frecuencia	Hacia la frecuencia	Número de puntos	Modo de barrido
20.00 Hz	100.0 Hz	50	Lineal
100.0 Hz	1.000 kHz	210	Logarítmico
1.000 kHz	10.00 kHz	210	Logarítmico
10.00 kHz	100.0 kHz	210	Logarítmico
100.0 kHz	1.000 MHz	210	Logarítmico
1.000 MHz	2.000 MHz	110	Logarítmico

*Tabla 11. Significado de cada columna de la Tabla 6*

<b>Columna</b>	<b>Significado</b>
<b>Desde la frecuencia</b>	Frecuencia inicial de la banda de análisis.
<b>Hacia la frecuencia</b>	Frecuencia final de esa banda.
<b>Número de puntos</b>	Cantidad de mediciones tomadas dentro de ese rango. Más puntos significan mayor resolución en el gráfico.
<b>Modo de barrido</b>	Indica si la variación de frecuencia fue <b>lineal</b> (pasos iguales en Hz) o <b>logarítmica</b> (pasos que aumentan exponencialmente).

#### Interpretación de los valores

- a) El barrido comenzó a **20 Hz** y se extendió hasta **2 MHz**, cubriendo **seis rangos** de frecuencia.
- b) El **primer rango (20 Hz – 100 Hz)** fue lineal, porque a frecuencias bajas es importante tener alta resolución para detectar posibles deformaciones o desplazamientos magnéticos.
- c) Los demás rangos fueron **logarítmicos**, lo que permite analizar con mayor eficiencia el comportamiento resonante y capacitivo en los devanados.
- d) En total se obtuvieron **1,000 puntos de medición aproximados**, garantizando una curva SFRA continua y detallada.

#### Importancia técnica

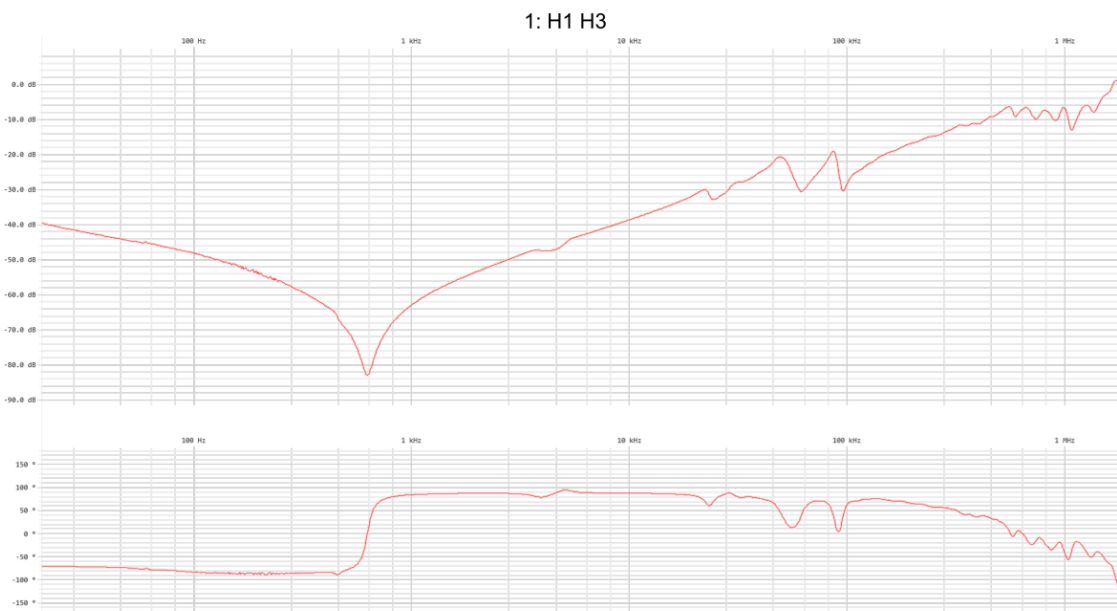
Este nivel de detalle es crucial porque:

Define la **precisión del análisis**, permite comparar mediciones futuras con la misma resolución, y asegura que los resultados sean **reproducibles** bajo condiciones equivalentes.

## 4.2.3 Resultados y análisis de pruebas a transformadores

### 4.2.3.1 Curva SFRA H1–H3

**Figura 30.** Curva SFRA H1–H3



**Tipo de conexión:** Medición entre las fases H1 y H3 del devanado de Alta Tensión. Ver Anexo C2.

**Propósito:** Evaluar el **acoplamiento electromagnético entre fases** y detectar deformaciones diferenciales, desplazamientos del núcleo o asimetrías en el devanado HV.

Comportamiento observado

En el gráfico superior (magnitud, en dB) se aprecia una **atenuación pronunciada** alrededor de los **100 Hz a 1 kHz**, seguida de un incremento progresivo en la respuesta hasta el rango de **1 MHz**. Esto indica un **comportamiento inductivo dominante** a bajas frecuencias, típico de un devanado en buen estado.

La **resonancia profunda** ( $\sim -90$  dB) sugiere la presencia de una **frecuencia de resonancia natural** del conjunto núcleo–devanado.

En frecuencias medias (10 kHz – 100 kHz), la curva mantiene una respuesta continua, sin caídas abruptas, lo que sugiere ausencia de deformaciones radiales severas.

A frecuencias altas (100 kHz – 1 MHz), la presencia de picos de menor amplitud refleja la respuesta capacitiva del aislamiento y los acoplamientos entre devanados.

### Interpretación según CIGRE TB 812

El patrón corresponde a una **curva estable y simétrica entre fases**, lo que indica **alineación axial adecuada y ausencia de desplazamientos mecánicos** significativos en el devanado de alta tensión.

No se evidencian señales de pandeo ni cortos espira a espira.

### Diagnóstico preliminar:

Estado electromecánico aceptable del devanado de alta tensión (HV).

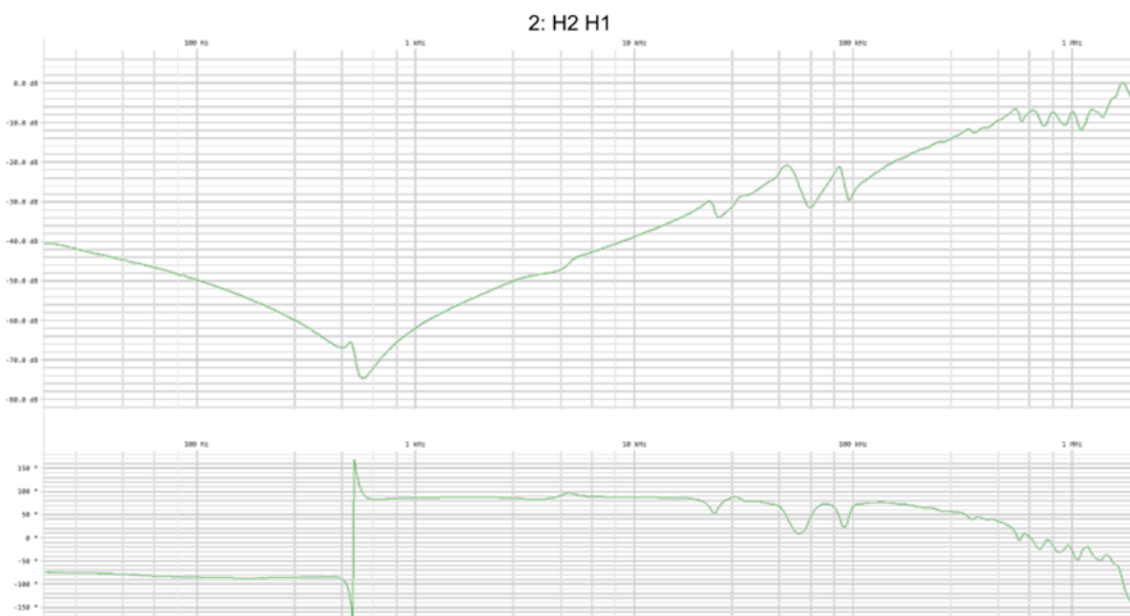
No se detectan indicios de falla axial o radial.

*Tabla 12. Ficha de especificación medición entre las fases H1 y H3 del devanado de Alta Tensión*

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia (magnitud y fase)
<b>Configuración de conexión</b>	H1–H3
<b>Devanado bajo prueba</b>	Alta Tensión (HV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal (sin cortocircuito)
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	Baja (20 Hz–2 kHz), Media (2 kHz–200 kHz), Alta (200 kHz–2 MHz)
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Curva normal (sin desplazamiento axial ni pandeo radial)
<b>Observaciones técnicas</b>	Atenuación profunda en baja frecuencia (~–90 dB), curva estable, resonancias regulares, sin distorsiones apreciables.

#### 4.2.3.2 Curva SFRA H2–H1

**Figura 31.** Curva SFRA H2–H1



**Tipo de conexión:** Medición entre las fases **H2** y **H1** del devanado de Alta Tensión.  
Ver anexo C2.

**Propósito:** Analizar el **acoplamiento entre fases adyacentes** y evaluar posibles diferencias respecto a la fase H3 para determinar la **simetría electromecánica** del devanado de HV.

#### **Comportamiento observado**

En la magnitud (gráfico superior) se observa una **atenuación de aproximadamente -80 dB** entre **100 Hz** y **1 kHz**, seguida de un ascenso progresivo hacia frecuencias altas.

La forma general de la curva es similar a la de la configuración H1–H3, lo cual **indica uniformidad estructural** entre fases.

La **resonancia principal** en torno a 1 kHz–10 kHz muestra una ligera irregularidad en el fondo de valle, lo cual podría reflejar **una mínima diferencia de acoplamiento o asimetría de inductancia** entre las fases H1 y H2.

En el gráfico de fase (parte inferior), el comportamiento se mantiene estable en la mayor parte del espectro, con una **transición brusca a 1 kHz**, coherente con un transformador en condiciones normales.

### **Interpretación según CIGRE TB 812**

El patrón coincide con un estado electromecánico estable, donde el acoplamiento entre las fases H1 y H2 no presenta indicios de deformaciones axiales ni radiales. La leve diferencia en amplitud respecto a H1–H3 se considera tolerable y dentro del margen esperado para transformadores de gran potencia.

Diagnóstico preliminar:

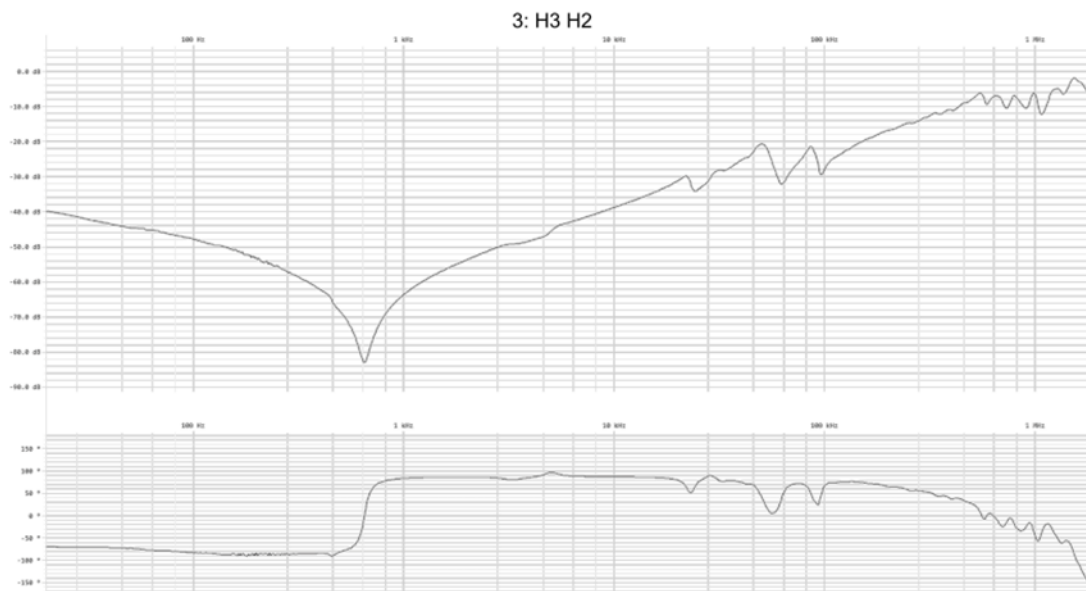
Curva estable y simétrica. El devanado HV muestra un comportamiento normal sin indicios de desplazamiento axial ni deformaciones radiales apreciables.

*Tabla 13. Ficha de especificación medición entre las fases H2 y H1 del devanado de Alta Tensión.*

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia (magnitud y fase)
<b>Configuración de conexión</b>	H2–H1
<b>Devanado bajo prueba</b>	Alta Tensión (HV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal (sin cortocircuito)
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	Baja (20 Hz–2 kHz), Media (2 kHz–200 kHz), Alta (200 kHz–2 MHz)
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Curva normal y estable (sin desplazamientos axiales ni pandeo radial)
<b>Observaciones técnicas</b>	Atenuación principal ~–80 dB, resonancia leve en 1–10 kHz, transición de fase estable, comportamiento coherente entre fases.

#### 4.2.3.3 Curva SFRA H3-H2

**Figura 32.** Curva SFRA H3–H2



**Tipo de conexión:** Medición entre las fases **H3** y **H2** del devanado de Alta Tensión (High Voltage). Ver anexo C2.

**Propósito:** Verificar la **uniformidad de respuesta** entre fases y detectar asimetrías que puedan indicar desplazamientos axiales o deformaciones radiales dentro del devanado HV.

#### **Comportamiento observado**

En el gráfico superior (magnitud), la curva presenta una **atenuación mínima cercana a -85 dB entre 100 Hz y 1 kHz**, con un ascenso continuo hasta el rango de 1 MHz. La forma general se mantiene **consistente con las configuraciones H1–H3 y H2–H1**, lo que indica una **respuesta simétrica entre las tres fases**.

Se aprecian **ligeras irregularidades** en el rango de 50 kHz–300 kHz, que pueden asociarse a efectos de acoplamiento o diferencias en el conexionado interno, sin implicar daños estructurales.

El gráfico inferior (fase) muestra una transición estable alrededor de 1 kHz y oscilaciones moderadas a altas frecuencias, características normales de la capacitancia parásita entre devanados.

### Interpretación según CIGRE TB 812

El comportamiento de la curva H3–H2 concuerda con un **estado electromecánico equilibrado**.

La similitud entre las tres combinaciones de alta tensión (H1–H3, H2–H1 y H3–H2) indica que **no existen desplazamientos axiales diferenciales ni pandeos radiales** significativos.

Se clasifica como un **patrón normal de integridad del devanado HV**.

### Diagnóstico preliminar:

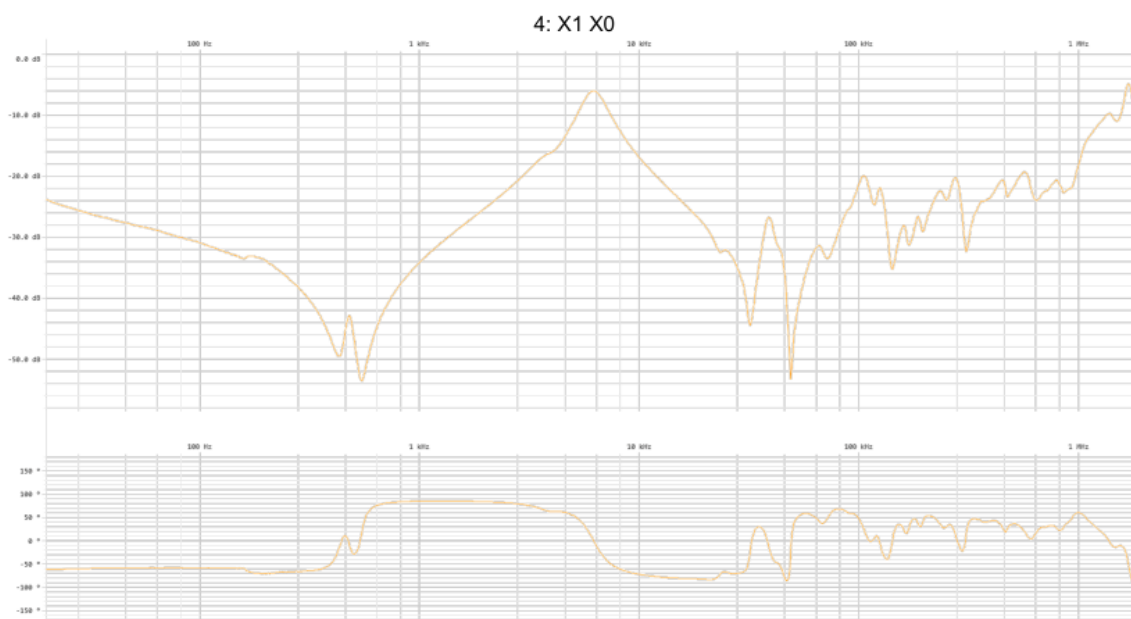
Comportamiento uniforme entre fases; sin evidencias de deformación ni desplazamiento del núcleo.

*Tabla 14. Ficha de especificación medición entre las fases H3 y H2 del devanado de Alta Tensión.*

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia (magnitud y fase)
<b>Configuración de conexión</b>	H3–H2
<b>Devanado bajo prueba</b>	Alta Tensión (HV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal (sin cortocircuito)
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	Baja (20 Hz–2 kHz), Media (2 kHz–200 kHz), Alta (200 kHz–2 MHz)
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Curva estable y simétrica entre fases
<b>Observaciones técnicas</b>	Atenuación principal ~–85 dB; leve modulación entre 50–300 kHz; resonancias regulares; fase estable en todo el espectro.

#### 4.2.3.4 Curva SFRA X1-X0

**Figura 33.** Curva SFRA X1–X0



**Tipo de conexión:** Medición entre el terminal **X1 (fase A)** y el neutro **X0** del devanado de **Baja Tensión (Low Voltage)**. Ver anexo C1.

**Propósito:** Evaluar la **integridad eléctrica y mecánica del devanado LV**, especialmente frente a posibles desplazamientos del núcleo o deformaciones provocadas por esfuerzos electromecánicos.

#### **Comportamiento observado**

- En el gráfico de magnitud, se aprecia una **atenuación inicial moderada (-60 dB)** seguida por un **pronunciado pico de resonancia positivo** alrededor de **3 kHz**, alcanzando aproximadamente **-10 dB**. Este comportamiento indica un mayor acoplamiento inductivo entre devanados y una buena continuidad del circuito magnético.
- La curva presenta **múltiples resonancias sucesivas** entre **10 kHz** y **1 MHz**, lo que sugiere una **estructura estable**, sin interrupciones eléctricas ni cortos espira a espira.

- En la gráfica de fase, la transición es **suave y continua**, con una rotación de fase coherente, reflejando estabilidad dieléctrica.

### Interpretación según CIGRE TB 812

El patrón observado coincide con el de un **devanado en buen estado mecánico**, pero con **una ligera variación en la amplitud media**, posiblemente asociada a una diferencia en la impedancia o en el acoplamiento con el devanado de alta tensión. Este tipo de resonancia elevada a media frecuencia puede deberse a **una leve asimetría de devanado o diferencias de capacitancia parásita** entre fases, sin implicar daño estructural.

### Diagnóstico preliminar:

Devanado de baja tensión (fase X1) con comportamiento electromecánico estable. No se detectan desplazamientos axiales ni cortos espira a espira; leve diferencia de acoplamiento respecto a otras fases.

*Tabla 15. Ficha de especificación medición entre el terminal X1 (fase A) y el neutro X0 del devanado de Baja Tensión (Low Voltage).*

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia (magnitud y fase)
<b>Configuración de conexión</b>	X1–X0
<b>Devanado bajo prueba</b>	Baja Tensión (LV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal (sin cortocircuito)
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	Media (2 kHz–200 kHz) y Alta (200 kHz–2 MHz)
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Curva normal con resonancia elevada (sin desplazamientos detectables)
<b>Observaciones técnicas</b>	Pico de resonancia en ~3 kHz, respuesta continua, múltiples resonancias armónicas, sin indicios de falla dieléctrica.

### Interpretación

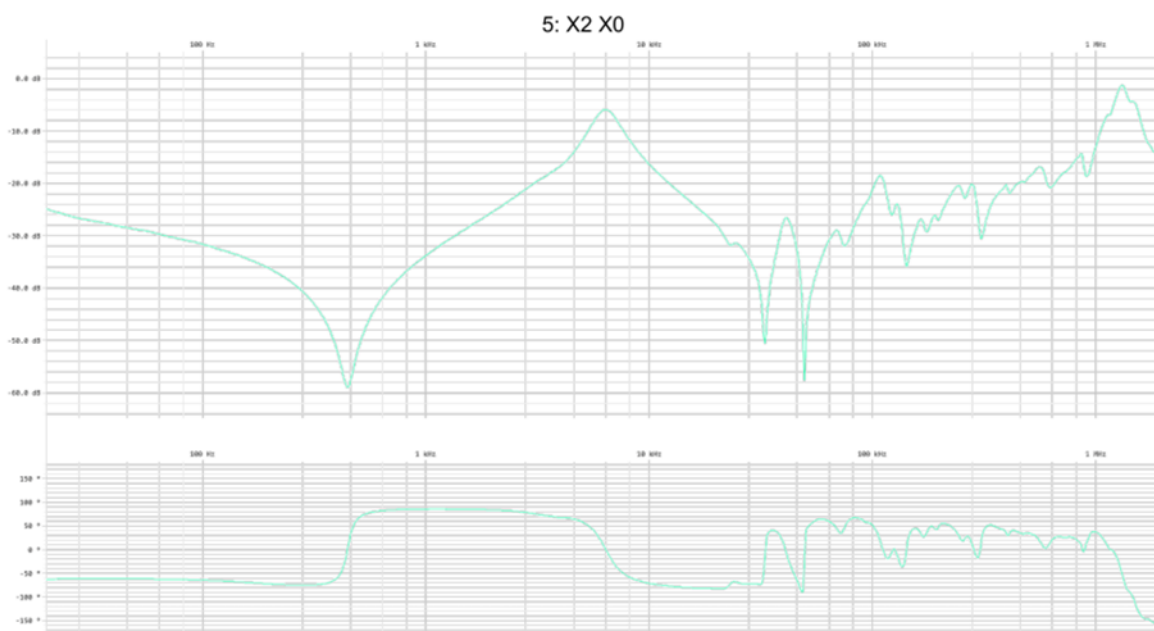
### general:

El devanado de baja tensión muestra una respuesta más reactiva que el de alta, lo cual es típico debido a la menor impedancia y proximidad al núcleo.

El comportamiento global confirma la coherencia estructural entre devanados y la ausencia de deformaciones significativas.

#### 4.2.3.5 Curva SFRA X2-X0

**Figura 34.** Curva SFRA X2-X0



**Tipo de conexión:** Medición entre el terminal **X2** (fase B) y el neutro **X0** del devanado de Baja Tensión (LV). Ver anexo C1.

**Propósito:** Evaluar la respuesta electromecánica de la segunda fase del devanado LV, verificando su coherencia con la fase X1 y descartando desplazamientos o defectos dieléctricos.

#### **Comportamiento observado**

La curva de magnitud muestra una atenuación inicial de  $-60$  dB, con un pico de resonancia pronunciado entre 3 kHz y 5 kHz, muy similar al observado en la configuración X1-X0. Esto sugiere un comportamiento uniforme entre fases, señal de un devanado equilibrado.

Se identifican resonancias múltiples entre 10 kHz y 1 MHz, con amplitudes cercanas a -20 dB, lo cual indica un acoplamiento estable y sin pérdidas apreciables.

En la gráfica de fase, se observa un comportamiento continuo y simétrico, con desplazamientos de fase progresivos y sin saltos abruptos.

### Interpretación según CIGRE TB 812

La similitud de la respuesta X2-X0 con la obtenida en X1-X0 es un indicador de uniformidad electromecánica en el devanado LV.

No se presentan signos de asimetrías ni de variaciones de impedancia significativas, lo que descarta deformaciones radiales o movimientos del núcleo.

Diagnóstico preliminar:

Devanado LV (fase X2) con comportamiento estable y simétrico.

No se evidencian desplazamientos axiales ni variaciones anómalas de acoplamiento entre fases.

**Tabla 16.** Ficha de especificación medición entre el terminal X2 (fase B) y el neutro X0 del devanado de Baja Tensión (Low Voltage).

Campo	Especificación
Variable medida	Respuesta en frecuencia (magnitud y fase)
Configuración de conexión	X2-X0
Devanado bajo prueba	Baja Tensión (LV)
Condición del equipo	Normal (sin cortocircuito)
Rango de frecuencia destacado	Media (2 kHz-200 kHz) y Alta (200 kHz-2 MHz)
Patrón CIGRE plausible	Curva normal y estable, sin indicios de deformación radial
Observaciones técnicas	Pico de resonancia en ~4 kHz, respuesta continua, múltiples resonancias armónicas coherentes entre fases, fase estable y sin distorsión abrupta.

### Resumen

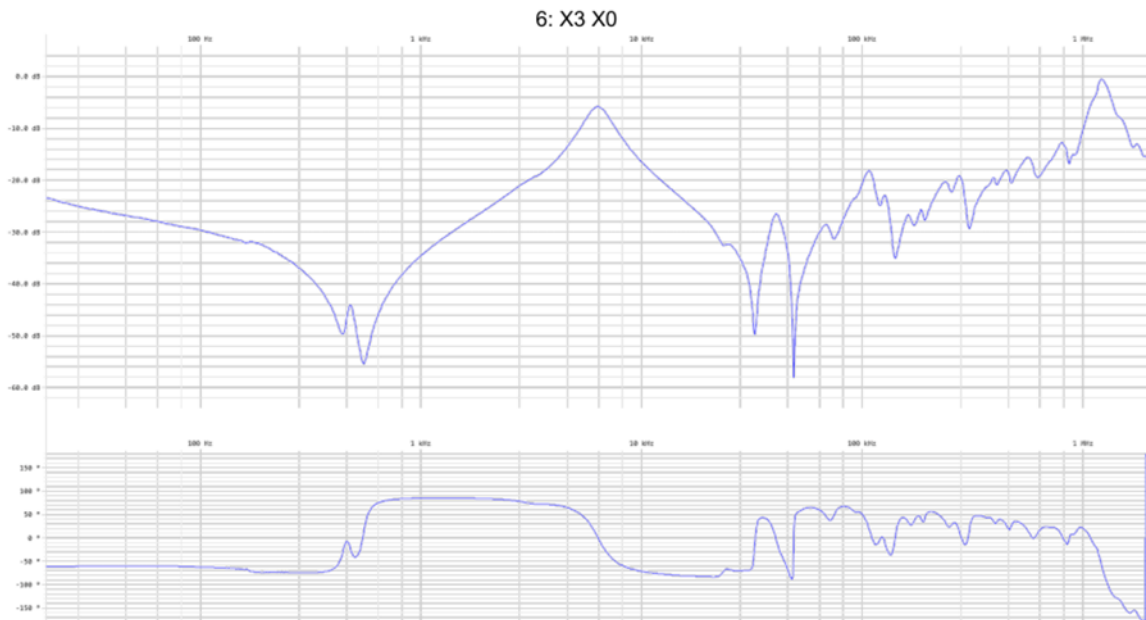
**técnico:**

La respuesta X2-X0 complementa el análisis del conjunto LV, demostrando consistencia entre fases.

La simetría de las tres fases (X1, X2 y próximamente X3) será clave para confirmar el buen estado dieléctrico y mecánico del transformador.

#### 4.2.3.6 Curva SFRA X3-X0

**Figura 35.** Curva SFRA X3-X0



**Tipo de conexión:** Medición entre el terminal **X3 (fase C)** y el neutro **X0** del devanado de Baja Tensión (LV). Ver anexo C1.

**Propósito:** Verificar el estado electromecánico de la tercera fase del devanado de baja tensión y comparar su respuesta con las fases X1 y X2 para confirmar la uniformidad del sistema trifásico.

Comportamiento observado

- En la gráfica de magnitud se aprecia un **pico de resonancia claro en torno a 3 kHz**, alcanzando cerca de **-10 dB**, exactamente igual al comportamiento de las fases X1 y X2. Esto indica un **acoplamiento magnético homogéneo** y ausencia de distorsión entre fases.

- Las **resonancias múltiples entre 10 kHz y 1 MHz** mantienen amplitudes y espaciados similares a los de las otras fases, lo que sugiere una **estructura equilibrada** sin defectos dieléctricos.
- En la gráfica de fase (parte inferior) se observan transiciones suaves, sin inversiones abruptas, lo cual confirma una respuesta dieléctrica estable.

### Interpretación según CIGRE TB 812

El patrón X3–X0 es coherente y simétrico respecto a las otras dos fases del devanado LV, lo que confirma la integridad mecánica general y el correcto acoplamiento electromagnético entre los devanados de baja tensión. No hay evidencias de desplazamientos axiales ni pandeos radiales.

Diagnóstico preliminar:

Devanado LV (fase X3) en condiciones electromecánicas normales.

No se detectan anomalías de impedancia ni alteraciones estructurales internas.

**Tabla 17.** Ficha de especificación medición entre el terminal X3 (fase C) y el neutro X0 del devanado de Baja Tensión (Low Voltage).

Campo	Especificación
Variable medida	Respuesta en frecuencia (magnitud y fase)
Configuración de conexión	X3–X0
Devanado bajo prueba	Baja Tensión (LV)
Condición del equipo	Normal (sin cortocircuito)
Rango de frecuencia destacado	Media (2 kHz – 200 kHz) y Alta (200 kHz – 2 MHz)
Patrón CIGRE plausible	Curva normal y simétrica entre fases LV
Observaciones técnicas	Pico de resonancia ~3 kHz; múltiples resonancias entre 10 kHz–1 MHz; fase continua y estable; sin distorsiones ni desviaciones entre fases.

### Devanado

**LV:**

Las tres configuraciones (X1–X0, X2–X0 y X3–X0) presentan respuestas casi idénticas, lo que confirma que el devanado LV está en perfecto equilibrio.

El conjunto exhibe alineación axial y radial correcta, sin indicios de fallas dieléctricas ni mecánicas, y cumple con los patrones normales según CIGRE TB 812.

#### **4.2.4 Transformadores con Fallas Conocidas**

En esta sección se presentarán casos documentados por CIGRE en el *Technical Brochure 812: Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)*, cada tipo de falla se describe según su naturaleza, la causa probable y el patrón típico que se produce en la respuesta en frecuencia, la comparación con la curva de referencia del equipo en buen estado y la verificación física. Esto nos permite comprender como identificar diferentes tipos de fallas mecánicas y eléctricas mediante SFRA. A continuación, se abordarán los siguientes tipos de fallas: Deformaciones radiales, desplazamientos axiales y torsión y fallas eléctricas internas como cortocircuito entre espiras, apertura en devanados, fallas en bushings y conexiones a tierra abiertas.

##### **Pandeo radial:**

Este tipo de falla se da cuando un devanado sufre pandeo radial bajo fuerzas electromagnéticas de cortocircuito, el arrollamiento cede y se deforma hacia adentro o hacia afuera plegándose. Sus causas probables son corrientes de falla extremas que generan fuerzas radiales de compresión por encima de lo que soportan los separadores y la estructura de presión, o bien puede ser consecuencia de un mal diseño con una pésima rigidez radial. También puede suceder durante el transporte si las bobinas no están debidamente sujetas. En transformadores de gran capacidad, estas deformaciones también llamadas buckling afecta a los devanados de baja tensión que suelen ser los inferiores, debido a que reciben la fuerza radial hacia el interior, o bien a los devanados terciarios en autotransformadores.

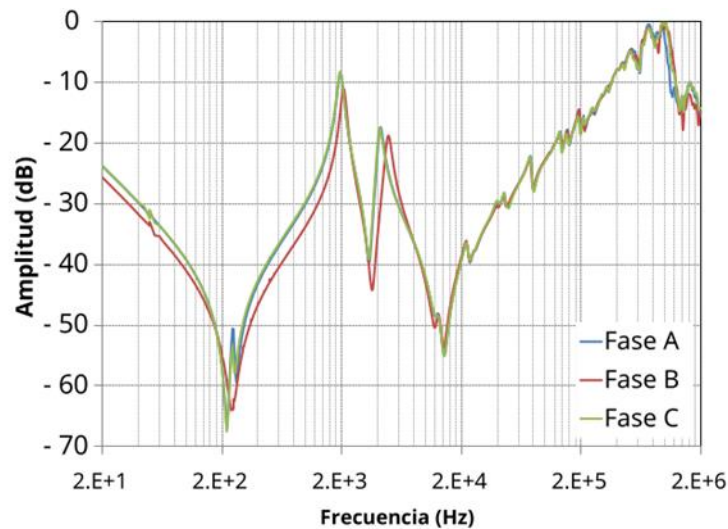
El patrón SFRA característico de este tipo de falla, suele presentarse en la banda de medias a altas frecuencias. Debido, a que las deformaciones radiales cambian la

capacitancia entre espiras y entre devanados afectando las resonancias a media frecuencias, la distribución de inductancias locales también sufren un cambio. Como ejemplo, tenemos el siguiente caso expuesto en el technical brochure 812 de CIGRE:

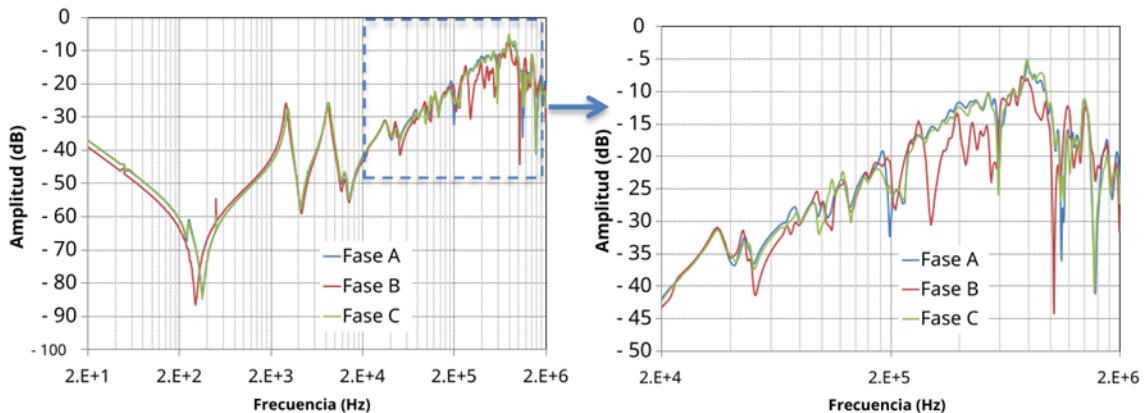
*Caso 1: Pandeo de los devanados común y terciario en transformador de 750 MVA 400/275/13 kV.*

Para este caso se realizó una comparación entre fases. Como resultado, la fase B presentó diferencia significativa respecto a las fases A y C, en el rango de frecuencias de 20 kHz a 2 MHz, en los rangos mayores a 10 kHz las fases A y C. alineaban adecuadamente sus resonancias, caso contrario la fase B que mostró atenuaciones y corrimientos distintos en ese rango medio-alto. En el rango de bajas frecuencias se observó un comportamiento natural de la disposición geométrica de las 3 fases.

**Figura 36.** *Caso 1 Mediciones de circuito abierto en devanados en serie. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)*



**Figura 37.** Caso 1 Mediciones de circuito abierto en devanados comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



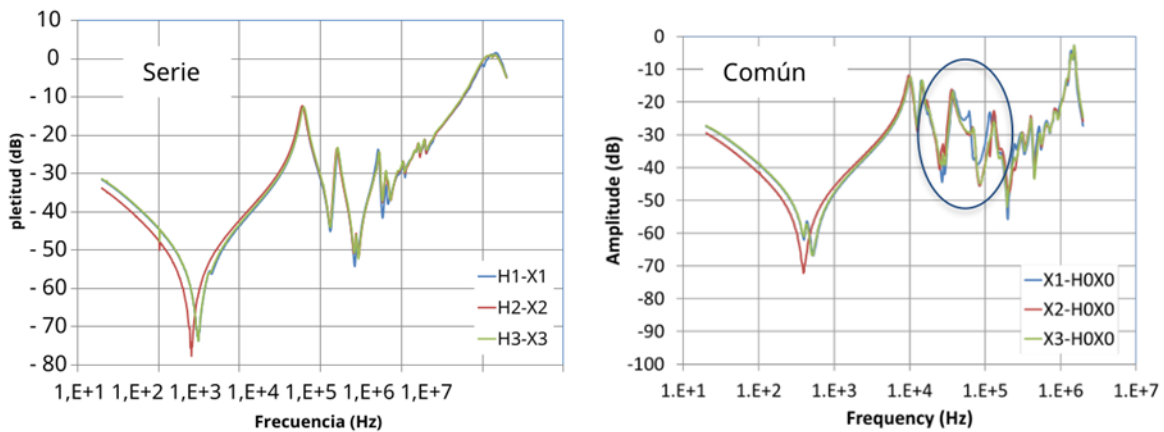
La verificación interna confirmó el diagnóstico, ya que, al destapar el equipo, se encontró abollamiento y pandeo significativo en los devanados común y terciario de la fase B, junto con daños en la estructura de prensado.

#### *Caso 2: Detección de Pandeo en el Devanado Común de un Autotransformador*

En este caso se analizó un autotransformador trifásico de 100 MVA con relación de transformación 161/69/13.8 kV, el cual había estado en operación durante muchos años antes de ser retirado para labores de mantenimiento. Como parte de los procedimientos de rutina, se le aplicaron pruebas de respuesta en frecuencia (SFRA), aunque no se contaba con registros históricos previos para esta unidad, lo cual dificultaba una comparación directa.

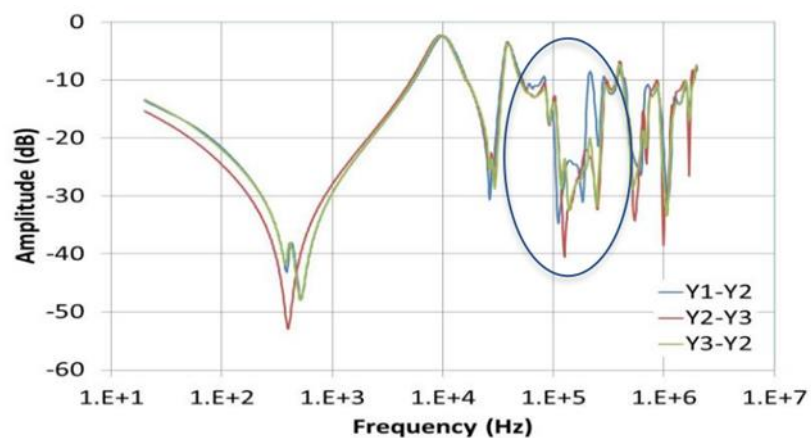
Se realizaron mediciones tanto en los devanados en serie como en los devanados comunes, todos en configuración de circuito abierto. Los resultados para los devanados en serie mostraron una coincidencia bastante precisa en las frecuencias de resonancia entre las tres fases a partir de los 10 kHz hacia arriba. Las pequeñas diferencias observadas en frecuencias menores a 1 kHz fueron atribuidas al efecto del núcleo magnético, lo cual es un comportamiento esperado en este tipo de configuraciones.

**Figura 38.** Caso 2 Mediciones de circuito abierto de devanados en serie y comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



Sin embargo, en las mediciones correspondientes a los devanados comunes se observó una desviación ligera entre las curvas de las tres fases dentro del rango de 50 a 150 kHz, lo cual encendió algunas alertas. Este tipo de desviaciones, aunque sutiles, puede indicar la presencia de irregularidades mecánicas internas. Del mismo modo, las pruebas realizadas sobre los devanados terciarios en circuito abierto reflejaron también un leve desplazamiento en las frecuencias de resonancia, esta vez entre 50 y 300 kHz.

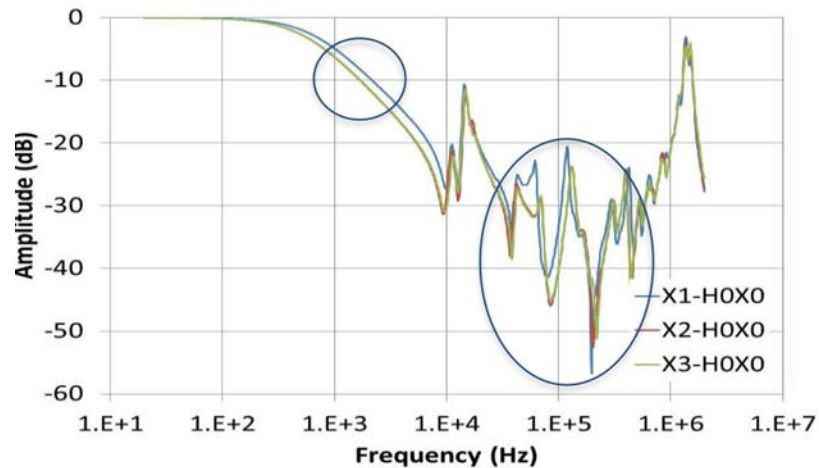
**Figura 39.** Caso 2 Mediciones de circuito abierto de devanados terciarios. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



Posteriormente, se llevó a cabo una prueba de cortocircuito en los devanados comunes, conectando en cortocircuito los devanados terciarios. Esta configuración permitió observar con mayor claridad una desviación entre las fases dentro del mismo

rango de 50 a 300 kHz. Al ampliar la visualización en el rango de baja frecuencia, se detectó una diferencia de aproximadamente 1.5 dB entre las fases, lo cual ya no se puede considerar despreciable.

**Figura 40.** Caso 2 Mediciones de cortocircuito de devanados comunes con devanados terciarios en cortocircuito. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



La magnitud de estas desviaciones, especialmente en mediciones con configuraciones de cortocircuito, llevó a los responsables técnicos a realizar otras pruebas como la de reactancia de fuga y, finalmente, una inspección interna. El resultado fue contundente: se encontró que el devanado común presentaba una deformación mecánica considerable, confirmando así la sospecha inicial detectada a través de la prueba SFRA.

Este caso demuestra con claridad el valor diagnóstico de la prueba de barrido en frecuencia, incluso en situaciones donde no existen registros históricos. Permite identificar problemas estructurales internos que, de no ser atendidos, pueden comprometer gravemente la confiabilidad del equipo.

**Figura 41.** Caso 2 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)

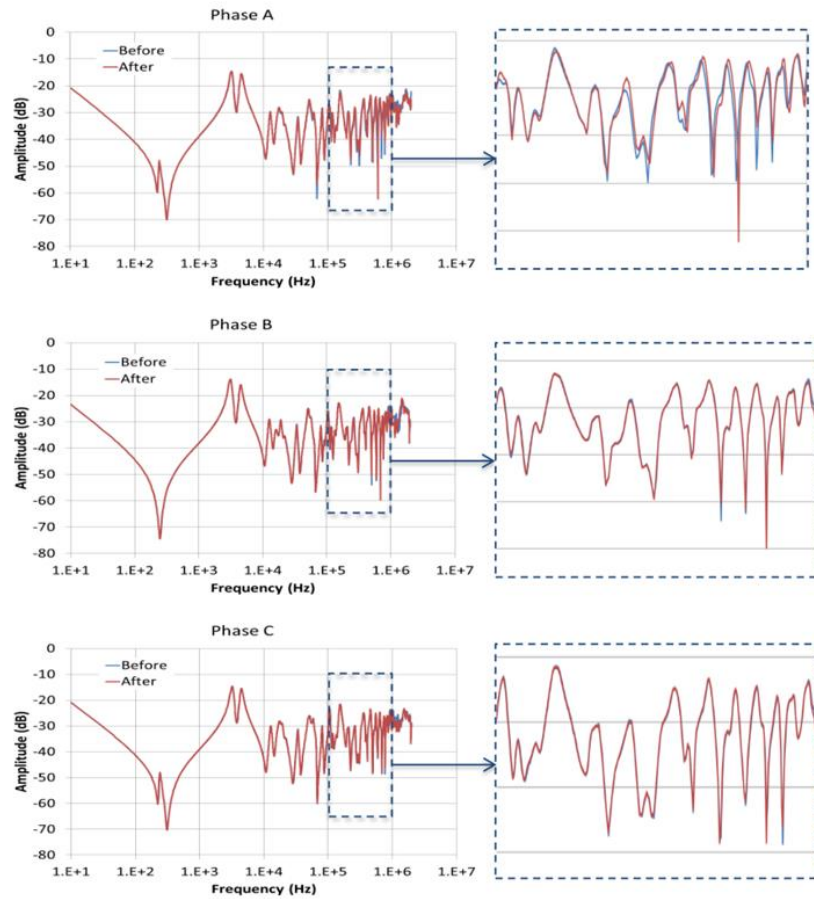


### *Caso 3: Torsión y pérdida de sujeción*

En este caso particular se contaba con registros de mediciones realizadas **antes** de que ocurriera una falla en la unidad. Se trataba de un **autotransformador trifásico de 240 MVA**, con una relación de transformación de **400/132 kV** y configuración **YNa0 (Ver Anexo C3)**. Esta condición ofrecía una oportunidad valiosa para comparar el estado del equipo antes y después del evento.

En la **Figura 42**, se presentan las mediciones de respuesta en frecuencia en configuración de circuito abierto, específicamente en los devanados comunes. A simple vista, las curvas parecen estar alineadas hasta una frecuencia de aproximadamente **2 MHz**, lo cual podría llevar a pensar que el comportamiento del transformador era aceptable. Sin embargo, al examinar con mayor detalle el intervalo de **100 kHz a 1 MHz**, se evidencia un **desplazamiento significativo en la traza correspondiente a la fase A**, mientras que las fases B y C permanecen prácticamente sin variación, bien alineadas entre sí.

**Figura 42.** Caso 3 Mediciones de circuito abierto en los devanados comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



**Figura 43.** Caso 3 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



Esta desviación sutil, pero consistente, fue considerada un indicio de anomalía estructural. Sumado a otros síntomas que el equipo presentaba, se concluyó que la falla era crítica, por lo que se decidió retirar el transformador de operación y desecharlo.

Posteriormente, tras realizar una inspección física del interior de la unidad, se identificó la causa raíz del problema: la fase A mostraba signos claros de torsión y se comprobó que había perdido su sujeción mecánica, como puede observarse en la Figura 43.

Este caso pone en evidencia cómo el análisis cuidadoso de las curvas SFRA, incluso cuando los cambios no son drásticos, puede revelar problemas mecánicos severos como torsión o pérdida de sujeción. La fase afectada exhibía una respuesta diferente en un rango clave de frecuencias, lo que resultó ser una señal precoz del daño físico, demostrando nuevamente el valor preventivo y diagnóstico de esta técnica.

#### *Caso 4: Desplazamiento axial del devanado estabilizador*

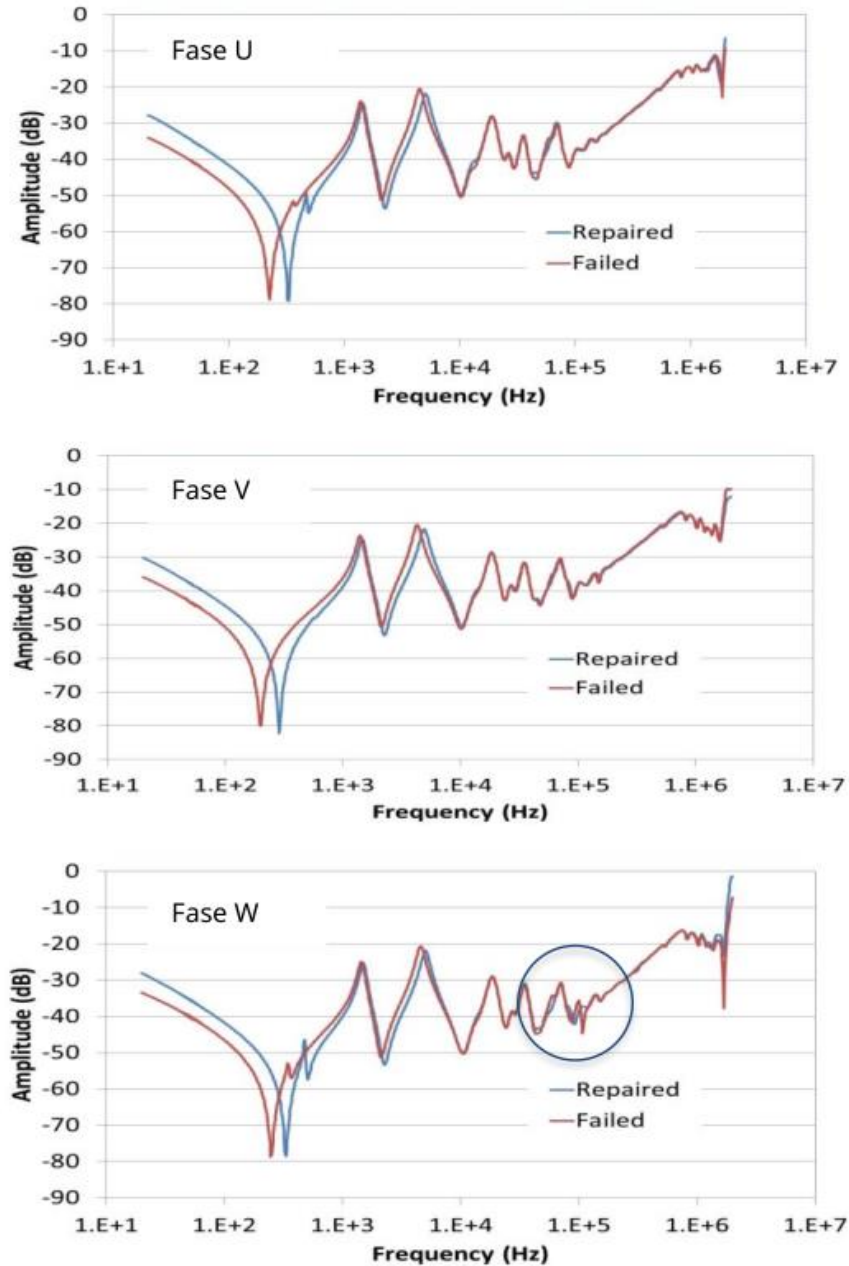
Este caso corresponde a un **autotransformador trifásico de 150 MVA**, con tensiones nominales de **220/115/10,6 kV** y configuración **YN<sub>a0</sub>+d**, el cual experimentó una **falla en servicio provocada por el impacto de un rayo**. Como resultado, la unidad fue enviada a fábrica para su inspección técnica y posterior reparación.

Durante el proceso de análisis post-falla y tras las labores de reparación, se realizaron pruebas de **respuesta en frecuencia (SFRA)** en configuración de circuito abierto. No se contaba con registros previos al evento, por lo que la evaluación se enfocó únicamente en los resultados posteriores a la falla y a la intervención técnica.

En la **Figura 44** se presentan las trazas de medición en los **devanados en serie**. En el análisis del rango de frecuencias asociado con la interacción entre devanados, se detectó una **ligera desviación en la fase W**, lo cual podría sugerir una alteración en la simetría estructural interna. Además, se observaron variaciones en las frecuencias de resonancia para las tres fases dentro del rango de **1 kHz a 10 kHz**, aunque estas

últimas se atribuyeron a las diferencias en la magnetización del núcleo luego del evento.

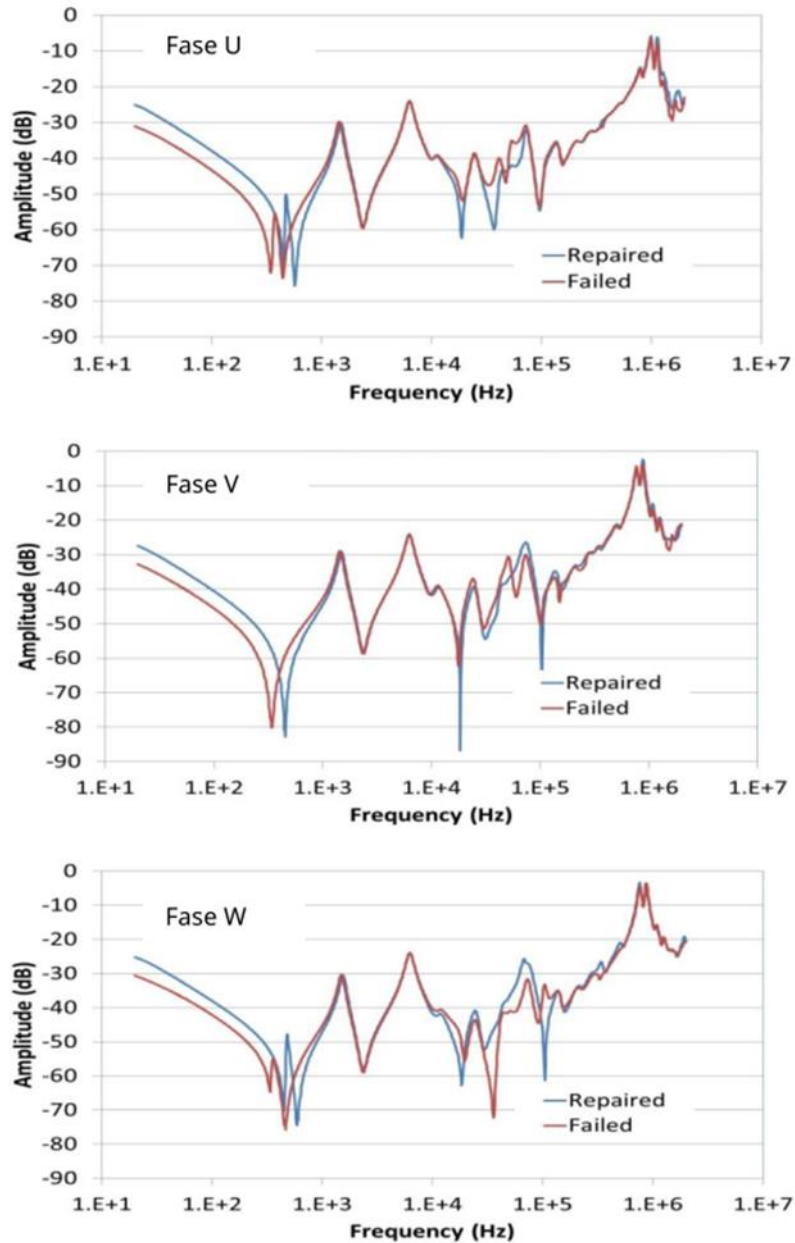
**Figura 44.** Caso 4 Mediciones de circuito abierto en los devanados en serie. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



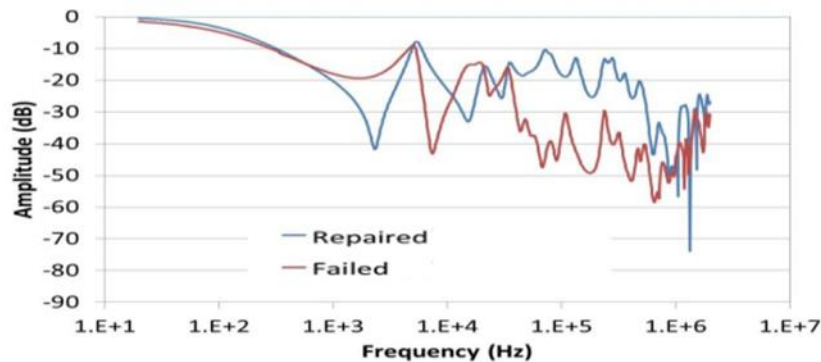
La **Figura 45** muestra las mediciones en circuito abierto para los **devanados comunes**. En este caso, las tres fases evidenciaron una **desviación clara** en el rango de frecuencia correspondiente a la interacción de los devanados. Nuevamente, las

anomalías en frecuencias bajas fueron vinculadas a la magnetización dispereja del núcleo tras la reparación.

**Figura 45.** Caso 3 Mediciones de circuito abierto en los devanados comunes. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



**Figura 46.** Caso 3 Mediciones de circuito abierto del devanado estabilizador. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)

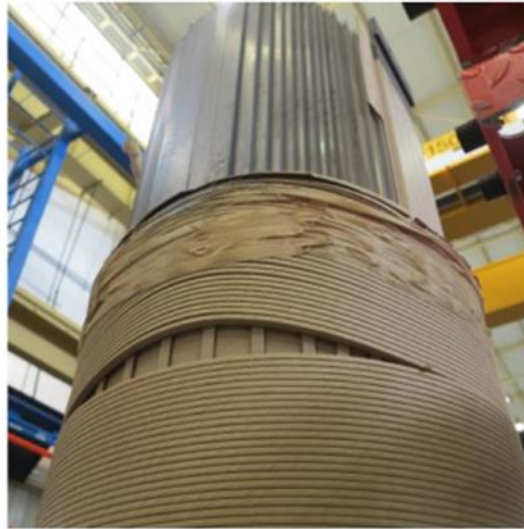


Por su parte, la **Figura 46** representa las mediciones del **devanado estabilizador**, también en configuración de circuito abierto. En estas curvas se aprecian **desviaciones significativas a lo largo de todo el espectro de frecuencias de interés**, lo que incrementó las sospechas de una posible deformación estructural localizada en este componente.

Tras desmontar la unidad e inspeccionar su interior, se confirmó que el devanado estabilizador correspondiente a la fase W presentaba un desplazamiento axial notorio, tal como se ilustra en la Figura 47.

Este caso demuestra cómo el análisis SFRA puede detectar deformaciones localizadas, como el **desplazamiento axial de un devanado**, incluso cuando no se dispone de registros previos para comparación directa. La evaluación minuciosa de las desviaciones en diferentes configuraciones de medición permitió triangular el problema y guiar la inspección física hacia la zona afectada, validando así la eficacia de esta herramienta diagnóstica en escenarios post-falla.

**Figura 47.** Caso 4 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



*Caso 5: Inclinación de conductores en el devanado de toma*

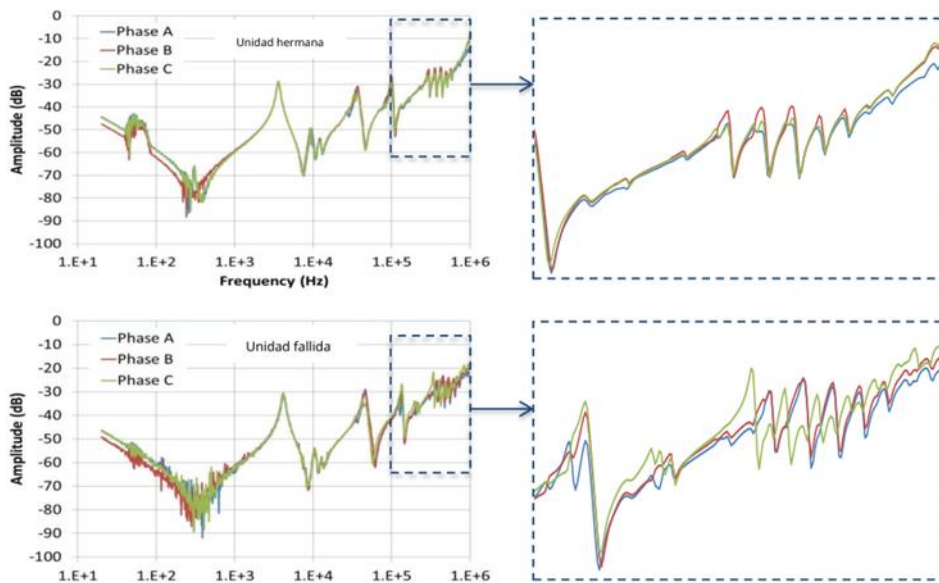
En este caso, se analizó un **transformador trifásico de 120 MVA**, con relación de transformación de **275/33 kV** y una configuración de conexión **YNd1**. La evaluación se centró en una comparación directa entre dos unidades **idénticas**: una unidad en servicio (unidad hermana) y la unidad que había presentado una falla. Cabe destacar que la unidad en buen estado fue medida **con aceite dieléctrico**, mientras que la unidad fallida se midió **sin aceite**, lo que puede influir en la respuesta medida, especialmente en los rangos de alta frecuencia.

La **Figura 48** muestra los resultados de las mediciones en circuito abierto en el lado de **alta tensión** de ambas unidades. Se puede observar una **alta coherencia entre las fases** en la unidad hermana, lo que indica una estructura interna uniforme y en buen estado. En contraste, en la unidad fallida se aprecian **desplazamientos en las frecuencias de resonancia** específicamente en la **fase C**, dentro del rango de frecuencias relacionado con la estructura del devanado. Este tipo de comportamiento es un claro indicio de una alteración mecánica o estructural en el devanado correspondiente.

Además, las desviaciones en frecuencias bajas pueden explicarse por dos factores comunes en este tipo de ensayos:

- La **presencia de ruido externo**, particularmente en el entorno cercano a la frecuencia del sistema, lo cual puede afectar la precisión de las mediciones de baja amplitud.
- La **asimetría geométrica natural del núcleo magnético**, especialmente al comparar fases ubicadas en los extremos laterales del núcleo frente a la fase central.

**Figura 48.** Mediciones de circuito abierto de alta tensión del caso 5. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



Durante la inspección interna del transformador dañado, se descubrió que el **devanado de la toma en la fase C presentaba una inclinación anormal de sus conductores**, lo que valida las irregularidades detectadas mediante el análisis de respuesta en frecuencia. Además, se identificaron **marcas de descarga disruptiva** en los cables de toma de esa misma fase, junto con **daños visibles en la placa de barrera del cambiador de tomas**, tal como se muestra en la **Figura 49**.

**Figura 49.** Caso 8 Inspección interna. Extraído de (CIGRE WG A2.53, 2020)



Este caso resalta la utilidad del análisis comparativo mediante SFRA entre unidades gemelas, incluso en condiciones de medición distintas, para identificar fallas estructurales como **inclinaciones mecánicas de conductores** y posibles efectos de arcos internos o fallos en el sistema de cambio de tomas.

## 4.3 Comparativa de Resultados

### 4.3.1 SFRA vs Pruebas Convencionales

La evaluación integral de transformadores de potencia en subestaciones eléctricas requiere métodos de diagnóstico que permitan detectar fallos tanto eléctricos como mecánicos. Tradicionalmente, las pruebas convencionales como la medición de relación de transformación, resistencia de devanados, impedancia de cortocircuito y prueba de aislamiento han sido suficientes para verificar el estado operativo general del equipo. No obstante, dichas pruebas presentan limitaciones para detectar deformaciones internas, desplazamientos axiales o radiales, pandeo de devanados o aflojamiento de estructuras internas, especialmente cuando estos defectos no han derivado aún en un fallo eléctrico manifiesto.

En contraste, la técnica SFRA ha demostrado ser altamente sensible a cambios estructurales internos. A través del barrido de un amplio rango de frecuencias, esta prueba permite obtener una firma única de cada devanado, la cual se ve alterada ante variaciones mecánicas. Por ejemplo, deformaciones en bobinados, movimiento del núcleo o deterioro de los elementos de sujeción provocan cambios específicos en las curvas de respuesta, detectables incluso en rangos de frecuencia muy particulares.

Durante la campaña de pruebas realizadas en el transformador analizado, los resultados obtenidos con técnicas convencionales no evidenciaron ninguna anomalía significativa. Las resistencias y relaciones de transformación se mantuvieron dentro de los valores esperados, y la impedancia de cortocircuito no presentó desviaciones preocupantes. Sin embargo, la prueba SFRA reveló comportamientos anómalos en la respuesta en frecuencia, como desplazamientos de resonancia entre fases y pérdida de alineamiento en frecuencias medias y altas, lo cual sugería un posible aflojamiento interno o desplazamiento de devanados.

Este contraste evidencia que **la prueba SFRA no sustituye las pruebas eléctricas convencionales**, sino que las **complementa**, especialmente en el contexto de la detección temprana de fallos mecánicos. La implementación conjunta de ambas metodologías permite una evaluación más robusta del estado del transformador, aumentando la fiabilidad del diagnóstico y reduciendo el riesgo de fallos imprevistos en servicio.

A continuación, las siguientes gráficas y las tablas asociadas corresponderán a diferentes configuraciones, una medición entre fases del devanado de Alta Tensión (HV) realizada para comparar el comportamiento entre combinaciones de fase cruzada, una de las pruebas más sensibles del método SFRA.

Las tablas inferiores presentaran los resultados cuantitativos conforme a los criterios DL/T911-2004 y NCEPRI, normas chinas frecuentemente utilizadas para la evaluación numérica de resultados SFRA.

#### 4.3.1.1 Configuración AC – BA

**Figura 50.** Curva SFRA AC–BA



**Tipo de conexión:** Medición diferencial entre fases A–C y B–A del devanado de Alta Tensión (HV).

**Propósito:** Comparar la respuesta en frecuencia entre fases cruzadas para detectar **asimetrías, desplazamientos axiales o deformaciones radiales** dentro del núcleo o los devanados.

La medición AC–BA es especialmente útil para revelar **desequilibrios relativos** entre fases que no se aprecian en pruebas individuales.

#### **Comportamiento observado**

En la **curva de magnitud** (parte superior), las respuestas de ambas combinaciones (AC y BA) se **superponen casi completamente**, con variaciones menores a  $\pm 3$  dB en todo el rango.

Esto evidencia una **alta simetría electromecánica** entre fases.

La **resonancia principal** se ubica cerca de **1 kHz**, con una atenuación aproximada de  $-80$  dB, y se mantiene la forma característica de un transformador en buen estado.

En el **rango medio (10 kHz – 100 kHz)** aparecen picos de resonancia regulares, lo que indica **uniformidad del acoplamiento**.

La **curva de fase** (inferior) muestra una transición estable sin saltos abruptos, confirmando que **no hay cambios en la inductancia relativa ni fallas en las conexiones internas**.

**Tabla 18.** Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración AC-BA

Norma	Parámetro	Valor obtenido	Interpretación
<b>DL/T911-2004</b>	RLF (Resonancia baja)	2.27	Dentro de rango normal
-	RMF (Resonancia media)	3.13	Dentro de rango normal
-	RHF (Resonancia alta)	1.00	Normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>
<b>NCEPRI</b>	E (Índice de desviación)	0.55	Devanado normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>

Ambas metodologías concluyen que el **estado del devanado es normal**, con valores que se encuentran **muy por debajo de los límites de alarma** (RLF > 6, E > 1.5 indicarían daño mecánico).

### Interpretación según CIGRE TB 812

El comportamiento AC-BA es típico de un transformador simétrico y sin fallas. La superposición de curvas y la baja desviación numérica indican ausencia de desplazamientos relativos entre devanados y una estructura axial intacta.

### Diagnóstico preliminar:

Devanado HV electromecánicamente estable.

No se detectan asimetrías entre fases A, B y C.

*Tabla 19. Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración AC-BA*

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia entre fases (magnitud y fase)
<b>Configuración de conexión</b>	AC – BA
<b>Devanado bajo prueba</b>	Alta Tensión (HV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	20 Hz – 2 MHz
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Curva superpuesta entre fases, sin desplazamiento ni pandeo radial
<b>Observaciones técnicas</b>	Resonancia $\approx$ 1 kHz; amplitud $\pm$ 3 dB; valores RLF 2.27, RMF 3.13, RHF 1.00, E 0.55; diagnóstico normal

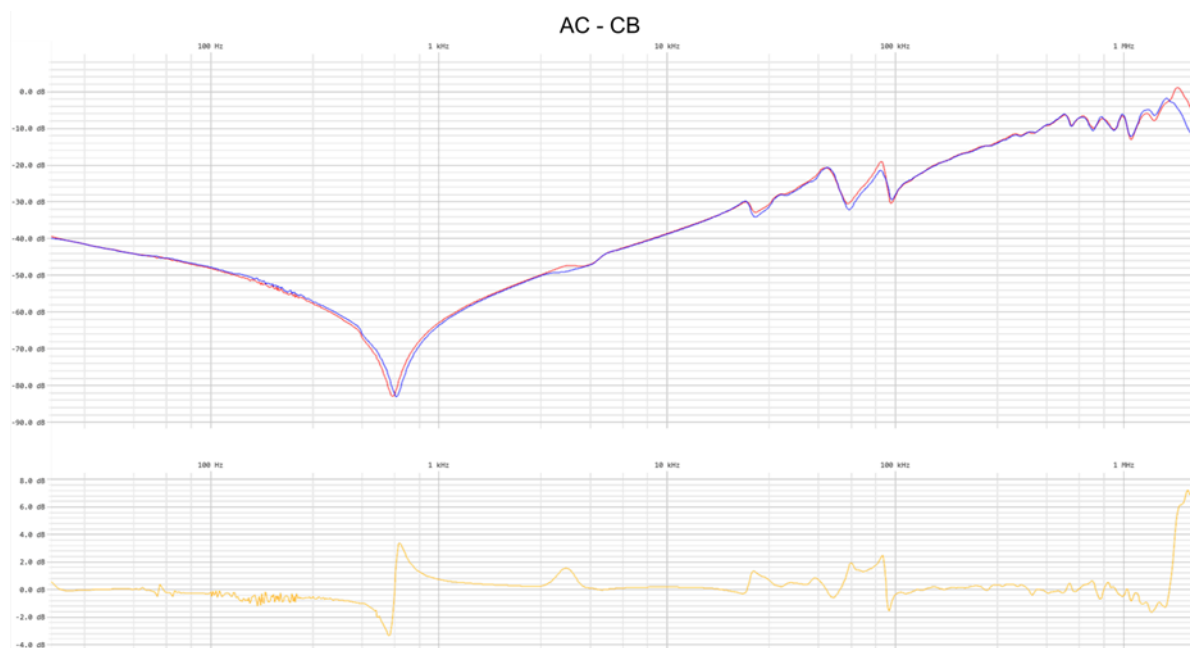
**Conclusión general (comparativa entre fases):**

El ensayo AC–BA confirma la **coherencia y estabilidad electromecánica del devanado HV**.

La consistencia de los parámetros numéricos y la concordancia con los criterios de DL/T911-2004 y NCEPRI consolidan el diagnóstico de **transformador sin daño mecánico detectable**.

#### 4.3.1.2 Configuración AC – CB

**Figura 51.** Curva SFRA AC–CB



**Tipo de conexión:** Medición diferencial entre fases A–C y C–B del devanado de Alta Tensión (HV).

**Propósito:** Verificar la **simetría electromecánica** entre las tres fases del devanado de alta tensión y detectar posibles **variaciones de impedancia o desplazamientos internos** que puedan afectar la respuesta en frecuencia.

#### **Comportamiento observado**

En la curva de magnitud (superior) se observa una superposición casi total de las respuestas AC y CB, con diferencias menores a  $\pm 2$  dB en todo el rango. Esto confirma una distribución uniforme del campo magnético y una simetría casi perfecta entre fases.

La resonancia principal se ubica cerca de 1 kHz, con una atenuación de aproximadamente  $-80$  dB.

En el rango medio (10 kHz – 100 kHz) se mantienen resonancias regulares, sin desplazamientos relativos entre las curvas.

En el gráfico de fase (inferior) se evidencia un comportamiento lineal y continuo, sin saltos abruptos ni inversiones de fase, lo que descarta desplazamientos axiales o pandeo radial.

**Tabla 20.** Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración AC-CB.

Norma	Parámetro	Valor obtenido	Interpretación
<b>DL/T911-2004</b>	RLF (Resonancia baja)	2.19	Dentro de rango normal
-	RMF (Resonancia media)	3.02	Dentro de rango normal
-	RHF (Resonancia alta)	1.46	Dentro de rango normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>
<b>NCEPRI</b>	E (Índice de desviación)	0.50	Devanado normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>

Todos los índices cuantitativos están **muy por debajo de los límites de alarma** (RLF>6 o E>1.5 indicarían daño mecánico). Esto respalda la conclusión de un **estado estructural normal y estable**.

#### **Interpretación según CIGRE TB 812**

El patrón observado corresponde a un comportamiento electromecánico equilibrado, donde las diferencias de respuesta entre combinaciones de fases son prácticamente nulas.

El transformador presenta una simetría trifásica completa, sin evidencias de deformaciones internas ni variaciones de impedancia entre fases.

#### **Diagnóstico preliminar:**

Estado del devanado HV normal y simétrico. No se detectan desplazamientos relativos entre fases ni fallas de acoplamiento.

**Tabla 21.** Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración AC-CB

Campo	Especificación
Variable medida	Respuesta en frecuencia entre fases (magnitud y fase)
Configuración de conexión	AC – CB
Devanado bajo prueba	Alta Tensión (HV)
Condición del equipo	Normal
Rango de frecuencia destacado	20 Hz – 2 MHz
Patrón CIGRE plausible	Curva superpuesta entre fases, sin desplazamiento ni pandeo radial
Observaciones técnicas	Resonancia $\approx$ 1 kHz; amplitud $\pm 2$ dB; RLF 2.19, RMF 3.02, RHF 1.46, E 0.5; evaluación normal

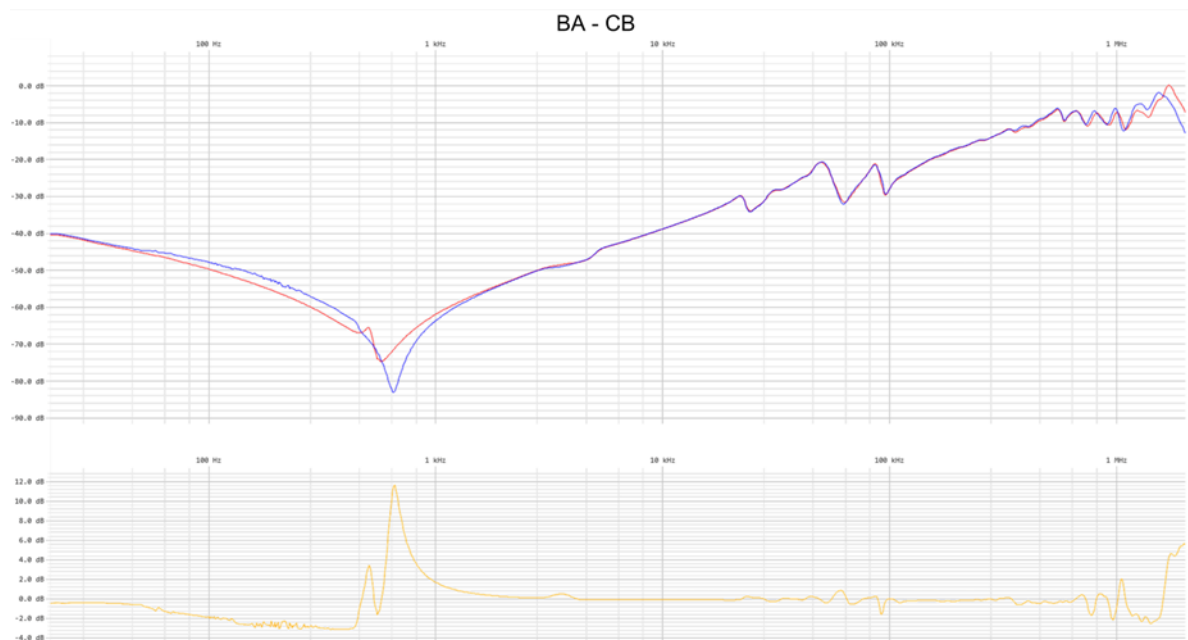
**Conclusión parcial (comparativa entre fases):**

La configuración AC–CB ratifica los resultados obtenidos en AC–BA, mostrando **uniformidad electromecánica y dieléctrica.**

El transformador conserva simetría completa y coherencia estructural conforme a las normas DL/T911-2004, NCEPRI y CIGRE TB 812.

4.3.1.3 Configuración BA – CB

**Figura 52.** Curva SFRA BA–CB



**Tipo de conexión:** Medición diferencial entre fases **B–A** y **C–B** del devanado de Alta Tensión (HV).

**Propósito:** Verificar la reproducibilidad y estabilidad de las respuestas interfases entre fases del devanado HV y confirmar la **ausencia de desviaciones significativas** respecto al ensayo previo.

### Comportamiento observado

Las curvas de magnitud (superiores) presentan una superposición casi perfecta, con desviaciones menores a  $\pm 1.5$  dB.

La resonancia principal se mantiene alrededor de 1 kHz, con una atenuación de aproximadamente  $-70$  dB.

En las frecuencias medias y altas (10 kHz–1 MHz), la distribución de picos de resonancia es idéntica, sin desplazamientos relativos.

La curva de fase (inferior) muestra un patrón simétrico y estable, lo que evidencia que no hay cambios en el acoplamiento inductivo ni capacitivo entre fases.

**Tabla 22.** Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración BA-CB.

Norma	Parámetro	Valor obtenido	Interpretación
DL/T911-2004	RLF	2.82	Dentro del rango normal
-	RMF	3.29	Dentro del rango normal
-	RHF	0.68	Dentro del rango normal
-	Evaluación global	—	Devanado normal
NCEPRI	E	0.31	Devanado normal
-	Evaluación global	—	Devanado normal

Los valores son prácticamente idénticos a los de la primera versión (RLF 2.81, RMF 3.29, RHF 0.69, E 0.31), lo cual confirma la reproducibilidad del ensayo y la estabilidad electromecánica del equipo.

### Interpretación según CIGRE TB 812

La ausencia de diferencias significativas entre esta medición y la anterior indica que:

El transformador mantiene su simetría trifásica completa,  
 No existen desplazamientos axiales ni torsiones internas,  
 El comportamiento electromecánico es altamente estable, incluso bajo repetición de prueba.

**Diagnóstico preliminar:**

Devanado HV estable. No se detectan alteraciones estructurales ni cambios en la respuesta SFRA.

**Tabla 23.** Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración BA-CB.

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
Variable medida	Respuesta en frecuencia entre fases
Configuración de conexión	BA – CB (Comparativa)
Devanado bajo prueba	Alta Tensión (HV)
Condición del equipo	Normal / Ensayo repetido
Rango de frecuencia destacado	20 Hz – 2 MHz
Patrón CIGRE plausible	Curvas superpuestas, sin desplazamientos ni deformaciones
Observaciones técnicas	RLF 2.82, RMF 3.29, RHF 0.68, E 0.31; comportamiento idéntico a la medición anterior

**Conclusión general (serie interfase repetida):**

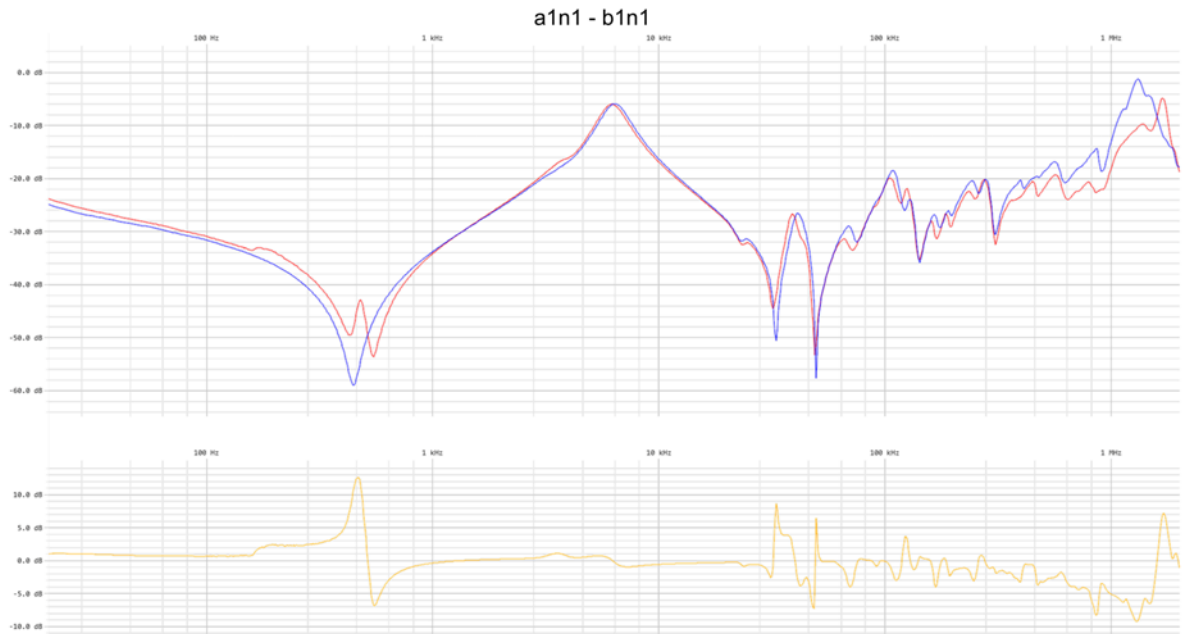
Las tres configuraciones interfases repetidas (AC–BA, AC–CB y BA–CB) confirman la reproducibilidad del método SFRA y la estabilidad electromecánica del transformador.

En todos los casos, los índices cuantitativos se mantuvieron dentro del rango de “Devanado normal”, validando tanto la confiabilidad del ensayo como el buen estado estructural del equipo.

A diferencia de las 3 configuraciones anteriores (que eran entre fases del devanado de Alta Tensión), las siguientes 3 configuraciones analizarán la respuesta entre las fases A y B del devanado de baja tensión, siendo especialmente útil para detectar asimetrías locales o deformaciones en los devanados de salida.

#### 4.3.1.4 Configuración a1n1-b1n1

**Figura 53.** Curva SFRA a1n1-b1n1



**Tipo de conexión:** Medición diferencial entre las fases A1-N1 y B1-N1 del devanado de Baja Tensión (LV).

**Propósito:** Evaluar la simetría electromecánica y la integridad estructural del devanado de baja tensión, verificando si existe **deformación mecánica o desplazamiento relativo** entre las fases del bobinado secundario.

#### Comportamiento observado

- En la curva de magnitud (superior) se observa una buena coincidencia general entre las respuestas de las dos fases, con desviaciones notorias únicamente en la zona de baja frecuencia (alrededor de 1 kHz), donde una de las curvas presenta un ligero desplazamiento en la resonancia principal.

- A partir de 10 kHz, ambas curvas vuelven a superponerse de manera casi total, manteniendo la forma característica de un transformador trifásico sano.
- En la curva de fase (inferior) se aprecian pequeñas variaciones angulares locales, lo que indica la posibilidad de una leve deformación radial o axial en el bobinado de baja tensión.

**Tabla 24.** Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración a1n1-b1n1.

Norma	Parámetro	Valor obtenido	Interpretación
DL/T911-2004	RLF	1.51	Marginalmente fuera del rango ideal
-	RMF	1.32	Normal
-	RHF	0.52	Normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Deformación leve</b>
NCEPRI	E	2.06	Límite superior aceptable
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>

Los valores sugieren una **ligera desviación estructural** en la región de baja frecuencia ( $RLF \approx 1.5$ ), lo que suele asociarse con **pequeños movimientos axiales del devanado o ajustes mecánicos desbalanceados**. El valor del parámetro E (2.06) aún se encuentra dentro del rango “Devanado normal”, pero **cercano al umbral de advertencia**.

#### **Interpretación según CIGRE TB 812**

Este patrón corresponde a un caso de deformación leve o local en el devanado LV, posiblemente asociada con:

Expansión térmica o esfuerzos electromecánicos diferenciales entre fases A y B.

Asimetrías de contacto o presión entre espiras externas.

Ligeras variaciones en la rigidez dieléctrica del aislamiento en una de las fases.

#### **Diagnóstico preliminar:**

Deformación leve localizada en el devanado de baja tensión (fase A–B). No se detectan fallas críticas, pero se recomienda monitoreo periódico para descartar evolución.

**Tabla 25.** Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración a1n1-b1n1.

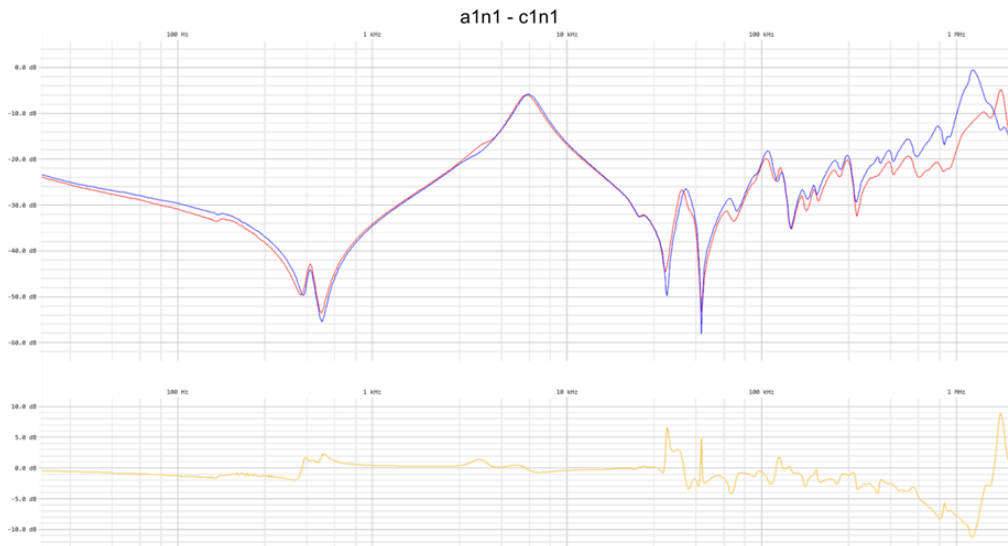
<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia entre fases LV
<b>Configuración de conexión</b>	a1n1 – b1n1
<b>Devanado bajo prueba</b>	Baja Tensión (LV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal con leve desviación
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	100 Hz – 2 MHz
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Deformación leve en zona de baja frecuencia (<10 kHz)
<b>Observaciones técnicas</b>	RLF 1.51; RMF 1.32; RHF 0.52; E 2.06; diagnóstico: leve deformación

**Conclusión parcial (devanado LV):**

El ensayo **a1n1–b1n1** indica una **leve deformación electromecánica localizada** en el devanado de baja tensión, probablemente sin impacto operativo inmediato. Este tipo de comportamiento es **típico de transformadores envejecidos o sometidos a esfuerzos térmicos recurrentes**. El equipo sigue funcionando dentro de parámetros normales, pero se recomienda repetir el SFRA tras un ciclo térmico completo o mantenimiento para verificar si la desviación persiste o aumenta.

#### 4.3.1.5 Configuración a1n1 – c1n1

**Figura 54.** Curva SFRA a1n1–c1n1



**Tipo de conexión:** Medición diferencial entre las fases A1–N1 y C1–N1 del devanado de Baja Tensión (LV).

**Propósito:** Detectar posibles **deformaciones axiales o radiales** en el devanado de baja tensión, así como verificar la consistencia geométrica y magnética entre fases extremas (A y C).

#### **Comportamiento observado**

Las curvas (roja y azul) muestran una **superposición casi total** a lo largo del espectro, con una pequeña divergencia visible en el rango de **baja frecuencia (500 Hz – 2 kHz)**, donde la fase C presenta una resonancia ligeramente desplazada.

En la **zona de media y alta frecuencia (10 kHz – 1 MHz)**, las respuestas se alinean, conservando la misma secuencia de picos y valles, lo que evidencia una **estructura mecánica estable**.

La **curva de fase** (parte inferior) conserva la misma pendiente general que en la medición a1n1–b1n1, con pequeñas variaciones locales asociadas a cambios menores en la distribución de la capacitancia interespiras.

**Tabla 26.** Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración aIn1-cIn1.

Norma	Parámetro	Valor obtenido	Interpretación
DL/T911-2004	RLF	1.69	Ligeramente fuera del rango ideal
-	RMF	1.48	Dentro del rango normal
-	RHF	1.00	Ideal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Deformación leve</b>
NCEPRI	E	2.52	Devanado normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>

Los índices DL/T911-2004 confirman una **pequeña desviación estructural en baja frecuencia**, compatible con una deformación leve o desplazamiento mínimo de espiras.

El parámetro **E = 2.52** sigue dentro del rango de “Devanado normal”, aunque próximo al límite de advertencia ( $E \approx 3$ ).

#### **Interpretación según CIGRE TB 812**

La curva presenta el patrón característico de una **asimetría leve entre las fases extremas**, lo cual puede observarse incluso en transformadores nuevos debido a tolerancias mecánicas y de ensamblaje. Esta leve diferencia entre fases puede atribuirse a:

- **Tensión mecánica residual en los amarres del devanado:** durante el montaje, los amarres o prensas pueden quedar con esfuerzos ligeramente desiguales, causando pequeñas variaciones en la posición relativa de los conductores.
- **Desalineación menor del núcleo o de los conductores externos:** una ligera desviación axial o radial entre el núcleo y los devanados genera cambios en el acoplamiento magnético, provocando pequeñas diferencias en la respuesta en frecuencia.

- **Tolerancias de fabricación:** diferencias mínimas en la compactación de los devanados o en el ajuste de los aislamientos pueden modificar la capacitancia y la inductancia de cada fase, reflejándose como una asimetría leve.

**Diagnóstico preliminar:**

Deformación leve en el devanado de baja tensión (fase A–C), sin evidencia de desplazamiento grave.

Recomendable continuar el monitoreo SFRA y registrar tendencias en futuras pruebas comparativas.

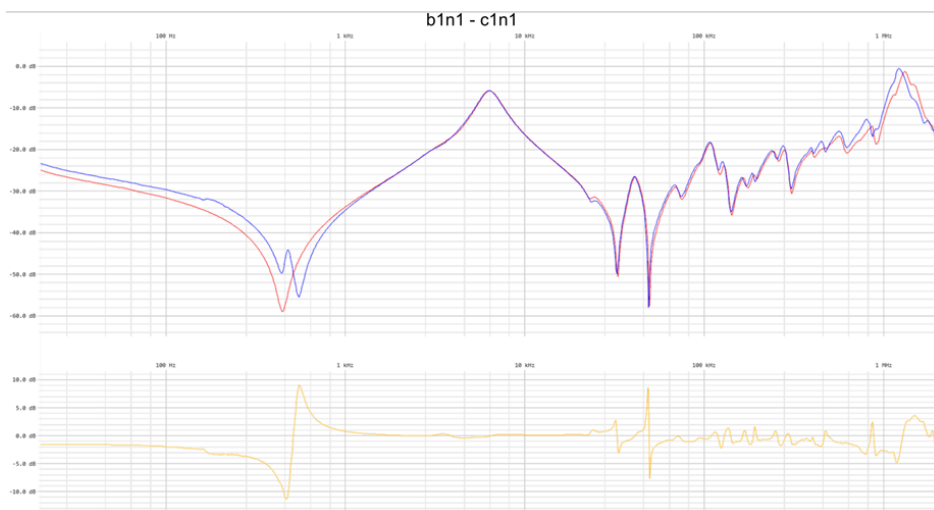
*Tabla 27. Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración a1n1-c1n1.*

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia entre fases LV
<b>Configuración de conexión</b>	a1n1 – c1n1
<b>Devanado bajo prueba</b>	Baja Tensión (LV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal, con leve desviación estructural
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	100 Hz – 2 MHz
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Deformación leve (asimetría de fase A–C)
<b>Observaciones técnicas</b>	RLF 1.69, RMF 1.48, RHF 1.00, E 2.52; diagnóstico: leve deformación en LV

Conclusión parcial (ensayos LV interfases): Las configuraciones a1n1–b1n1 y a1n1–c1n1 muestran resultados similares, caracterizados por pequeñas desviaciones en baja frecuencia, lo cual indica posibles deformaciones leves del bobinado de baja tensión, pero sin indicios de daños graves. Ambas pruebas refuerzan la alta sensibilidad del método SFRA para detectar cambios estructurales sutiles, imposibles de observar con ensayos convencionales de resistencia o relación de transformación.

#### 4.3.1.6 Configuración b1n1 – c1n1

**Figura 55.** Curva SFRA b1n1–c1n1



**Tipo de conexión:** Medición diferencial entre las fases **B1–N1** y **C1–N1** del devanado de Baja Tensión (LV).

**Propósito:** Verificar la **consistencia de la estructura electromecánica entre las fases B y C**, evaluando la presencia de deformaciones locales o desplazamientos relativos del bobinado.

#### **Comportamiento observado**

- Las curvas (roja y azul) se superponen casi por completo a lo largo de todo el espectro, con una coincidencia muy alta desde 500 Hz hasta 1 MHz.
- Se aprecia una ligera desviación en la región de baja frecuencia ( $\approx 1$  kHz), donde una de las curvas presenta un mínimo algo más pronunciado, sugiriendo una diferencia marginal en la inductancia de fuga entre las fases B y C.
- En la zona de alta frecuencia ( $>100$  kHz), ambas respuestas presentan el mismo patrón de resonancias múltiples, con picos y valles simétricos, indicativo de una estructura estable y sin fallas severas.

- La curva de fase (parte inferior) muestra pequeñas variaciones locales ( $<5^\circ$ ), que son coherentes con ajustes electromecánicos menores y no con desplazamientos físicos apreciables.

**Tabla 28.** Resultados del Análisis SFRA e Interpretación Conforme a DL/T 911-2004 y NCEPRI, para la configuración b1n1-c1n1.

Norma	Parámetro	Valor obtenido	Interpretación
DL/T911-2004	RLF	1.79	Ligeramente fuera del rango ideal
-	RMF	1.79	Normal
-	RHF	0.73	Normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Deformación leve</b>
NCEPRI	E	1.15	Devanado normal
-	<b>Evaluación global</b>	—	<b>Devanado normal</b>

Estos resultados complementan los obtenidos en las otras configuraciones del devanado LV, manteniendo la tendencia de **leve deformación estructural en baja frecuencia (RLF $\approx$ 1.5–1.8)**, asociada con **ligeros desbalances magnéticos o tensionales** en las fases extremas.

### Interpretación según CIGRE TB 812

El análisis de la respuesta entre las fases **B** y **C** confirma que el devanado de baja tensión presenta un **comportamiento electromecánico uniforme**, sin evidencia de desplazamientos graves ni resonancias anómalas. El leve desajuste observado en baja frecuencia puede atribuirse a **asimetrías naturales del devanado, pequeñas diferencias en la presión de apriete o fatiga dieléctrica no crítica**.

### Diagnóstico preliminar:

Deformación leve en el devanado de baja tensión (fase B–C), con tendencia normal y comportamiento estable.

No se detectan anomalías críticas; la desviación se considera **mecánica menor** y dentro de límites operativos seguros.

**Tabla 29.** Condiciones de Medición y Resultados Técnicos del Ensayo SFRA, de la configuración b1n1-c1n1.

<b>Campo</b>	<b>Especificación</b>
<b>Variable medida</b>	Respuesta en frecuencia entre fases LV
<b>Configuración de conexión</b>	b1n1 – c1n1
<b>Devanado bajo prueba</b>	Baja Tensión (LV)
<b>Condición del equipo</b>	Normal con leve deformación
<b>Rango de frecuencia destacado</b>	100 Hz – 2 MHz
<b>Patrón CIGRE plausible</b>	Deformación leve en baja frecuencia (<10 kHz)
<b>Observaciones técnicas</b>	RLF 1.79, RMF 1.79, RHF 0.73, E 1.15; diagnóstico: leve deformación

**Conclusión general de los ensayos SFRA en LV:**

Las tres configuraciones interfases a1n1–b1n1, a1n1–c1n1 y b1n1–c1n1 evidencian un patrón consistente de deformaciones leves detectadas en baja frecuencia, interpretadas como variaciones estructurales menores del bobinado de baja tensión. No existen indicios de desplazamientos graves ni de fallas incipientes, por lo que el transformador puede considerarse en condición operativa normal, aunque con recomendación de monitoreo SFRA periódico. Estos resultados validan la alta sensibilidad y confiabilidad del método SFRA, en concordancia con los lineamientos de DL/T911-2004, NCEPRI y CIGRE TB 812.

**4.3.2 Análisis de Sensibilidad y Efectividad**

El análisis de sensibilidad permite evaluar la capacidad de una prueba diagnóstica para detectar variaciones sutiles en la condición física de un transformador. En este sentido, la prueba SFRA presenta una **alta sensibilidad a alteraciones estructurales**, incluso en condiciones donde otras pruebas no reflejan desviaciones. Esta característica se hace evidente en casos como los analizados, donde el pandeo, la torsión o el desplazamiento axial de bobinados generaron cambios detectables únicamente mediante SFRA.

La efectividad de esta técnica radica en su **amplio rango de detección**, que abarca desde desviaciones en la zona inductiva de baja frecuencia (asociadas al núcleo y a la disposición geométrica de los bobinados) hasta resonancias de alta frecuencia relacionadas con la capacitancia distribuida y el acoplamiento entre devanados. Esta versatilidad permite establecer comparaciones no solo entre fases, sino también contra curvas de referencia históricas o entre unidades gemelas, maximizando la confiabilidad del diagnóstico.

Por otra parte, debe reconocerse que la prueba SFRA requiere un alto nivel de interpretación técnica y experiencia para evitar falsos positivos o lecturas mal atribuidas a fallos inexistentes. Factores como la condición del aceite, el ruido eléctrico o pequeñas asimetrías constructivas pueden generar variaciones en la curva que deben ser correctamente contextualizadas.

En términos generales, se concluye que **la prueba SFRA es altamente efectiva como herramienta de mantenimiento predictivo y análisis post-falla**, siempre y cuando se utilice como parte de una estrategia integrada de diagnóstico, complementando las pruebas convencionales. Su incorporación como prueba estándar en la puesta en marcha de transformadores, especialmente aquellos de potencia superior a 1 MVA, aportaría un valor significativo al aseguramiento de calidad y confiabilidad operativa en subestaciones del sistema eléctrico salvadoreño.

# **CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE NORMATIVA**

## **5.1 Estructura de la Normativa Propuesta**

El presente capítulo desarrolla un análisis técnico, normativo y económico sobre la factibilidad de implementar, de manera obligatoria, la prueba SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) en transformadores de potencia de los niveles de distribución y subtransmisión, tanto en las etapas de recepción como en las de mantenimiento preventivo y predictivo.

La propuesta se fundamenta en la necesidad de asegurar la integridad mecánica y eléctrica de los transformadores durante su ciclo de vida, considerando los costos asociados a la adquisición, transporte, instalación y comisionamiento, así como los riesgos financieros derivados de fallas inducidas por logística o defectos estructurales.

Además, se evalúan los beneficios económicos indirectos, como la reducción en primas de seguro, la mitigación de tiempos de inactividad y la protección de garantías. El propósito final es establecer un criterio técnico-normativo nacional, alineado con las mejores prácticas internacionales (IEEE, IEC y CIGRÉ), que justifique en qué condiciones económicas resulta obligatoria la aplicación del SFRA en transformadores de potencia.

## **5.2 Contexto Normativo y Técnico**

### **5.2.1 Fundamentos normativos**

El uso del SFRA en transformadores de potencia está ampliamente respaldado por normas internacionales que definen su aplicación, metodología y criterios de interpretación. Entre las más relevantes se destacan:

- IEEE Std C57.149-2013, Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, la cual

establece los procedimientos, criterios de aceptación y recomendaciones para interpretar resultados.

- IEC 60076-18:2012, Power Transformers – Measurement of Frequency Response, que detalla la configuración de medición, equipos recomendados y condiciones de prueba.
- CIGRÉ Technical Brochure No. 342, que recomienda la ejecución del SFRA en etapas clave del ciclo de vida del transformador: post-fabricación, post-transporte, pre-energización y mantenimiento periódico.

Todas coinciden en que la prueba SFRA es un ensayo no invasivo, de bajo costo relativo y alto valor diagnóstico, capaz de detectar daños estructurales que otras pruebas eléctricas (resistencia de aislamiento, TTR o corriente de excitación) no identifican.

### **5.2.2 Justificación técnica**

Durante el transporte e instalación, un transformador de potencia puede estar sometido a vibraciones, impactos y aceleraciones que provoquen desplazamientos del núcleo o deformaciones en los devanados. Estos daños, invisibles a simple vista, pueden causar cortocircuitos internos o fallas dieléctricas al energizar el equipo.

La prueba SFRA, al comparar la respuesta en frecuencia obtenida antes y después de un evento logístico, permite determinar con precisión si el transformador ha sufrido alteraciones mecánicas internas. Esto la convierte en una herramienta pericial esencial para activar garantías de fábrica o seguros de transporte, asegurando que el equipo no se energice en condiciones de riesgo.

Su adopción como requisito normativo nacional reduciría pérdidas económicas, disputas técnicas y tiempos de diagnóstico ante siniestros.

## 5.3 Procesos de Compra, Transporte y Garantías

### 5.3.1 Cadena de suministro

El ciclo de vida de un transformador de potencia típicamente comprende las siguientes etapas:

- Compra y contratación (licitación, especificaciones técnicas).
- Fabricación (4 a 12 meses según capacidad).
- Pruebas en fábrica, incluyendo la curva SFRA de referencia base.
- Transporte internacional (marítimo o terrestre).
- Pruebas en sitio, entre ellas SFRA post-transporte.
- Instalación y puesta en marcha.
- Entrega final y aceptación contractual.

En este contexto, la prueba SFRA post-transporte es fundamental para comparar con la curva de fábrica, confirmando que el transformador no sufrió desplazamientos o daños durante la manipulación o traslado. Ver **Anexo B**

### 5.3.2 Garantías

Los fabricantes suelen ofrecer garantías entre 12 y 36 meses posteriores a la entrega. Para reclamar daños por transporte o manipulación, es indispensable demostrar con evidencia técnica que el equipo estaba en condiciones normales en fábrica y que el daño ocurrió posteriormente.

El SFRA constituye, por tanto, la prueba pericial clave para sustentar reclamos ante fabricantes o aseguradoras. Sin una curva de referencia post-transporte, es prácticamente imposible probar el momento de ocurrencia de una falla mecánica.

### 5.3.3 Pólizas de seguro

El transporte de transformadores de potencia está cubierto bajo pólizas “All Risk”, las cuales contemplan daños mecánicos y estructurales. Su costo oscila entre 0.3% y 1% del valor asegurado.

**Por ejemplo:**

Para un transformador de USD 1,200,000, la póliza puede costar entre USD 3,600 y USD 12,000. Sin evidencia técnica (como el SFRA) que pruebe que el daño ocurrió durante el transporte, la aseguradora puede negar la indemnización.

Por tanto, el SFRA no solo protege el activo eléctrico, sino también los intereses financieros y legales del propietario.

### 5.4. Datos Económicos de Referencia

*Tabla 30. Estimación económica de referencia para transformadores de distinta capacidad*

Concepto	Caso 1 – 1 MVA	Caso 2 – 7.5 MVA (46-23 kV)
Precio base de transformador	USD 30,000	USD 800,000
Transporte e instalación	USD 15,000	USD 400,000
Precio llave en mano	USD 45,000	USD 1,200,000
Precio prueba SFRA en El Salvador	USD 1,000	USD 1,000
Precio equipo SFRA	USD 39,000	USD 39,000
Comisionamiento básico	USD 1,400	USD 1,400
Costo de póliza de seguro (0.5%)	USD 225	USD 6,000

Fuente: Elaboración propia con base en datos de mercado y catálogos de OMICRON, Megger y Doble (2024).

### 5.5 Análisis Económico

El análisis económico considera modelos de gestión de activos y evaluación de riesgo propuestos por IEEE y CIGRÉ, adaptados al contexto salvadoreño. Se estudian dos casos representativos: un transformador de 1 MVA y otro de 7.5 MVA.

#### 5.5.1 Caso 1 – Transformador 1 MVA

- Valor ( $C_{rep}$ ) = US\$30,000
- Prima  $P = 0.005 \cdot 30,000 = US\$150$
- Exposición  $E = 0.01 \cdot 30,000 = US\$300$

- Exp. anual sin SFRA =  $150 + 0.005 \cdot 300 = 150 + 1.5 = \text{US\$}151.5$
- Si SFRA tiene  $Se \cdot Ae = 0.48 \rightarrow \Delta p = 0.005 \cdot 0.48 = 0.0024$  Delta  $p = 0.005 \cdot 0.48 = 0.0024$
- Reducción esperada en deducible =  $\Delta p \cdot E = 0.0024 \cdot 300 = \text{US\$}0.72$ .
- Coste neto adicional por hacer SFRA =  $1,000 - 0.72 \approx \text{US\$}999.3$  (esto sin contar opciones de recuperar costo vía reclamación).

Desde un punto de vista económico directo, no conviene obligar SFRA para transformadores de US\$30k. La prima y la exposición que soporta el comprador son pequeñas ( $\approx \text{US\$}151.5/\text{año}$  en expectativa), y la reducción de riesgo monetizable es ínfima frente al costo de la prueba. Además, con seguro de tránsito la posición del comprador frente a la pérdida directa está prácticamente cubierta; SFRA sólo aportaría valor documental (útil para reclamos), pero no justifica económicamente imponerla como requisito obligatorio.

#### **Impacto económico de no hacer SFRA:**

Si ocurre un daño mecánico en transporte y no se detecta, el transformador podría fallar en los primeros meses de operación. La sustitución sería de USD 45,000, más costos de desconexión, envío, pérdida de energía y penalidades por indisponibilidad. La pérdida total puede superar USD 60,000.

**Relación costo-beneficio:** el SFRA evita potenciales pérdidas que representan 60 veces su costo.

#### **5.5.2 Caso 2 – Transformador 7.5 MVA**

- Valor total expuesto ( $C_{rep}$ ) =  $\text{US\$}1,600,000$  (1.2M + 400k logística/puesta).
- Prima  $P = 0.005 \cdot 1,600,000 = \text{US\$}8,000$
- Exposición  $E = 0.01 \cdot 1,600,000 = \text{US\$}16,000$
- Exp. anual sin SFRA =  $8,000 + 0.005 \cdot 16,000 = 8,000 + 80 = \text{US\$}8,080$
- Con SFRA ( $Se \cdot Ae = 0.48$ ):  $\Delta p = 0.005 \cdot 0.48 = 0.0024$ .
- Reducción en deducible esperada =  $\Delta p \cdot E = 0.0024 \cdot 16,000 = \text{US\$}38.4$ .
- Coste neto directo de hacer SFRA =  $1,000 - 38.4 = \text{US\$}961.6$  (desde solo la reducción de deducible/prima esperada).

A primera vista, la reducción directa en costes indemnizables por haber hecho SFRA es pequeña comparada con US\$1,000 — porque la prima ya protege gran parte del valor. Pero hay factores críticos NO cubiertos por esa simple expectativa:

- Downtime / pérdida de servicio si el transformador se daña al energizar: pérdidas operativas, sanciones regulatorias y costos por retraso que las pólizas de transporte normalmente no cubren. Ej.: si un fallo genera 30 días de retraso con 10k/día de pérdidas = US\$300k; la expectativa anual de esa pérdida =  $p_0 \cdot 300k = 0.005 \cdot 300k = US\$1,500$ . Una reducción  $\Delta p$  de 0.0024 evita  $0.0024 \cdot 300k = US\$720$  en expectativa de downtime por año — combinado con la reducción del deducible (US\$38) sube el beneficio esperado cercano a US\$758; si agregas mejoras en velocidad de reclamo y evitar litigios, el valor supera el coste de la prueba.
- SFRA como evidencia técnica (IEEE C57.149) — acelera reclamaciones y evita disputas con transportista/fabricante, lo que reduce tiempos y costos no asegurados y protege primas futuras. Eso tiene un valor práctico importante en proyectos de alto capital.

Aun teniendo seguro de transporte, es razonable exigir SFRA pre/post-llegada para transformadores de alto valor (US\$ $\geq$ 1M) porque:

- La prueba es barata frente al valor total y facilita/subsana disputas,
- Reduce exposición a costos no cubiertos (downtime, sanciones, litigios), y, si no hay seguro completo o si la póliza exige evidencia, la SFRA puede permitir recuperar pronto gastos.
- Desde un punto de vista puramente contable de deducible/prima, la reclamación directa no paga la prueba; pero incluyendo downtime y valor documental, la rentabilidad práctica favorece exigirla.

Impacto económico de no hacer SFRA:  
Un daño en transporte no detectado podría invalidar la póliza si no se demuestra el momento de ocurrencia. La sustitución del equipo implicaría pérdidas directas por 1.2 millones más costos indirectos por pérdidas de servicio, que en redes de

distribución pueden alcanzar USD 50,000 a USD 200,000 por día de indisponibilidad. Relación costo-beneficio: el SFRA evita pérdidas de más de 1,000 veces su costo.

## **5.6 Discusión y Valor Umbral de Obligatoriedad**

El costo del SFRA es justificable cuando representa  $\leq 0.5\%$  del valor del transformador. Por debajo de este umbral, los beneficios técnicos, financieros y operativos superan ampliamente el costo del ensayo.

En transformadores de gran capacidad, el SFRA debe considerarse obligatorio, mientras que en unidades pequeñas puede adoptarse como recomendación preventiva.

## **5.7 Conclusiones Parciales**

- Para transformadores de 1 MVA, el SFRA es recomendable, no obligatorio.
- Para transformadores  $\geq 5$  MVA, debe ser requisito normativo obligatorio.
- Las pólizas de seguro no garantizan indemnización sin evidencia técnica.
- IEEE, IEC y CIGRÉ respaldan la aplicación del SFRA post-transporte y post-instalación.

## **5.8 Conclusión General**

Desde una perspectiva económica, técnica y normativa, la incorporación obligatoria del SFRA en transformadores de potencia mayores a 1 MVA es altamente rentable. El ensayo representa un respaldo pericial y financiero, protege inversiones críticas y alinea a El Salvador con estándares internacionales de mantenimiento predictivo.

Por lo tanto, se recomienda que la SIGET, en coordinación con la FIA-UES y las empresas distribuidoras, establezca una norma nacional que exija la ejecución del SFRA:

- En toda recepción de transformadores  $\geq 1$  MVA.
- Antes de energización.
- Y durante mantenimientos programados cada 3–5 años.

## **CAPÍTULO 6: PROPUESTA NORMATIVA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PRUEBA SFRA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN EL PROCESO DE COMISIONAMIENTO**

La prueba SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) se ha consolidado como una herramienta esencial para la detección de fallas mecánicas y eléctricas en transformadores de potencia, tales como desplazamientos axiales o radiales de devanados, cortocircuitos espira a espira, problemas en el núcleo magnético y defectos en conexiones internas.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la aplicación de la SFRA es técnica y económicamente rentable, ya que permite identificar anomalías antes de que el transformador entre en servicio, evitando fallas catastróficas y reduciendo costos asociados a reparaciones, pérdidas energéticas y tiempos de indisponibilidad.

Con base en los análisis desarrollados y en las normas internacionales IEEE, IEC, CIGRÉ, DL/T911-2004 y NCEPRI, se presenta el siguiente marco normativo propuesto para su adopción obligatoria en transformadores de potencia con capacidad superior a 1 MVA durante el proceso de comisionamiento y mantenimiento mayor.

### **6.1 Objetivo de la Propuesta Normativa**

El objetivo de esta propuesta es establecer lineamientos técnicos y procedimentales para la correcta aplicación de la prueba SFRA, garantizando uniformidad en los métodos de medición, interpretación y evaluación de resultados.

De esta manera se busca que todos los agentes del sector eléctrico —fabricantes, instaladores, aseguradoras y entes reguladores— cuenten con un criterio común de aceptación técnica, acorde con los estándares internacionales más reconocidos (IEEE C57.149, CIGRÉ WG A2.26, DL/T911-2004, NCEPRI).

## **6.2 Alcance**

La normativa propuesta se aplicará a los siguientes casos:

- Transformadores de potencia  $\geq 1$  MVA instalados en subestaciones de transmisión y distribución.
- Transformadores sometidos a mantenimiento mayor o reparación en fábrica.
- Transformadores nuevos en etapa de recepción, transporte o comisionamiento previo a energización.
- El cumplimiento será obligatorio para las empresas eléctricas concesionarias y los contratistas responsables de pruebas y puesta en servicio de transformadores de potencia en territorio salvadoreño.

## **6.3 Procedimiento de Ensayo**

El procedimiento de aplicación de la prueba SFRA se estandariza conforme a las recomendaciones de IEEE Std C57.149-2012 y IEC 60076-18:2012.

### **6.3.1. Preparación del equipo**

- Desenergizar completamente el transformador y garantizar la descarga de capacitancias residuales.
- Retirar puestas a tierra flotantes no necesarias para evitar interferencias.
- Verificar continuidad del blindaje en los cables de medición.
- Registrar condiciones ambientales (temperatura y humedad) antes de la prueba.

### **6.3.2. Conexiones recomendadas**

Ensayos fase a fase: H1–H2, H2–H3, H3–H1.

Comparaciones entre fases: a1n1–c1n1 (como se ilustra en la Figura 48).

Mediciones entre devanados: Hx–Lx, Hx–TAP.

Ejemplo: X1 con X1, X2 con X2, manteniendo la referencia en neutro o tierra según la topología.

### **6.3.3. Rango de frecuencia**

20 Hz a 2 MHz: recomendado por IEEE C57.149-2012.

Hasta 10 MHz: en transformadores mayores de 100 MVA, según CIGRÉ WG A2.26 (2008).

### **6.3.4. Curvas de análisis**

Baja frecuencia (20 Hz – 10 kHz): análisis del núcleo magnético y trayectorias de fuga.

Media frecuencia (10 kHz – 600 kHz): detección de desplazamientos en los devanados.

Alta frecuencia (600 kHz – 2 MHz): detección de resonancias, conexiones flojas y deformaciones terminales.

## **6.4 Índices de Evaluación**

Para objetivar la interpretación, se recomienda el uso de los índices cuantitativos propuestos por NCEPRI (China Electric Power Research Institute) y DL/T911-2004, los cuales permiten correlacionar las curvas medidas.

**Tabla 31.** *Parámetros de interpretación de la respuesta en frecuencia del transformador:*

<b>Índice</b>	<b>Rango de Frecuencia</b>	<b>Interpretación</b>
RLF (Low Frequency Ratio)	20 Hz – 10 kHz	Estado del núcleo magnético
RMF (Mid Frequency Ratio)	10 kHz – 600 kHz	Condición de los devanados
RHF (High Frequency Ratio)	600 kHz – 2 MHz	Conexiones y terminales
E (Error Global)	Integral en todo el rango	Similitud general entre curvas

Valores de referencia:

- RLF, RMF, RHF  $\approx 1$   $\rightarrow$  condición normal.
- Desviación entre 1.3 y 2.0  $\rightarrow$  posible deformación leve.
- Desviación  $> 2.0$   $\rightarrow$  daño potencial en devanados o núcleo.

## 6.5 Criterios de Aceptación o Rechazo

Aprobación (transformador en condiciones normales):

- Curvas SFRA con alta similitud entre fases o respecto a las curvas de fábrica.
- Índices RLF, RMF, RHF  $\leq 1.5$  y E  $\leq 1.0$ .
- Resonancias consistentes y reproducibles en todas las fases.

Rechazo (transformador no apto para comisionamiento):

- Diferencias superiores a 10 dB entre fases homólogas en bandas medias o altas.
- Índices RLF, RMF, RHF  $\geq 2.0$  o E  $\geq 2.5$ .
- Ausencia de resonancias características o aparición de nuevas no justificadas.
- Inconsistencias repetidas en configuraciones equivalentes (ejemplo: H1–H2 vs H2–H3).

## 6.6 Justificación Económica y Técnica

La adopción obligatoria de la prueba SFRA en transformadores mayores a 1 MVA está respaldada por estudios que demuestran su alto impacto en confiabilidad y ahorro operativo:

Reducción del riesgo de falla catastrófica hasta en un 80%, según Tembohlen & Stirl (2009). Ahorro promedio de USD 120,000 por transformador en fallas evitadas (Wang, Vandermaar & Srivastava, 2002).

La inversión en la prueba ( $\approx$  USD 1,000) representa menos del 0.1% del valor total de transformadores de media y gran capacidad. Su aplicación acelera reclamaciones ante aseguradoras y reduce tiempos de reposición, lo que mejora la disponibilidad del sistema eléctrico nacional.

## 6.7 Recomendaciones Normativas Finales

Se propone que la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), en coordinación con la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (FIA-UES) y las empresas distribuidoras, establezcan una Norma Técnica Salvadoreña (NTSFRA-01) con los siguientes lineamientos:

### **Aplicación obligatoria del SFRA:**

- En transformadores nuevos  $\geq$  1 MVA antes de la energización.
- En transformadores reparados o trasladados antes de reconexión.
- Cada 3 a 5 años en mantenimientos mayores.

### **Responsabilidad técnica:**

La prueba deberá ser ejecutada por personal certificado bajo normas IEC/IEEE.

Los informes deberán incluir curvas comparativas, índices y análisis de interpretación.

**Integración normativa:**

Incorporar en los pliegos de licitación pública la obligación de entrega de curvas SFRA de fábrica y post-transporte.

Establecer una base de datos nacional para control de curvas SFRA de transformadores en servicio.

La convergencia de las normas IEEE C57.149-2012, CIGRÉ WG A2.26, DL/T911-2004 y NCEPRI permitirá a El Salvador adoptar un estándar técnico robusto y alineado con las mejores prácticas internacionales, garantizando mayor confiabilidad, seguridad y vida útil del parque nacional de transformadores.

## **CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

La aplicación de la prueba de barrido en frecuencia (SFRA) permitió detectar variaciones mecánicas internas en transformadores de potencia  $\geq 1$  MVA, confirmando su alta sensibilidad frente a desplazamientos del núcleo, deformaciones de devanados y pérdida de sujeción mecánica. Los resultados obtenidos demuestran que el método es efectivo y repetible, cumpliendo el objetivo general del estudio.

El análisis normativo realizado (IEC 60076-18: 2012 y DL/T 911-2004) permitió comprender y comparar los procedimientos estandarizados para la ejecución de la prueba. Se comprobó que las tres normas coinciden en la estructura de conexión (End-to-End e interdevanado) y en la interpretación basada en comparación entre fases, unidad gemela o curva de referencia, lo cual garantiza la trazabilidad de las mediciones y reduce la subjetividad del diagnóstico.

Los costos de adquisición y prueba recopilados de empresas nacionales como SSAI Ingenieros y Testing S.A. de C.V. evidencian que la implementación de SFRA representa menos del 3 % del costo total de un transformador de potencia, mientras que una falla catastrófica por deformaciones no detectadas puede multiplicar los costos de reposición y tiempos de indisponibilidad. Esto demuestra una relación costo-beneficio favorable, cumpliendo el objetivo de evaluar la viabilidad económica del método.

El estudio validó que la inclusión de SFRA en el protocolo de puesta en servicio proporciona una capa adicional de seguridad operativa, al identificar posibles defectos antes de la energización del equipo. De este modo, se contribuye directamente a reducir el riesgo de fallas tempranas, mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico nacional y alinear las prácticas locales con las guías internacionales (IEC, IEEE y CIGRÉ).

La elaboración de una propuesta de normalización nacional para transformadores  $\geq 1$  MVA, basada en los estándares internacionales y adaptada al contexto salvadoreño, cumple con el objetivo de justificar la adopción de SFRA como prueba estándar de comisionamiento. Dicha propuesta permitirá establecer protocolos unificados, trazables y comparables entre laboratorios, fabricantes y empresas eléctricas del país.

Se evidenció la necesidad de capacitación técnica en el uso e interpretación de la prueba SFRA, ya que su correcta aplicación depende de la comprensión del fenómeno electromagnético asociado a la respuesta en frecuencia, así como del conocimiento de los

parámetros eléctricos y electrónicos del equipo de medición (Analizadores de respuesta en frecuencia) Este aspecto es esencial para la sostenibilidad de la metodología a largo plazo.

## 7.2 Recomendaciones

Incluir la prueba SFRA en el protocolo nacional de puesta en servicio para transformadores de potencia  $\geq 1$  MVA, definiendo que se ejecute antes del embarque, al arribo al sitio y después del montaje, con configuraciones End-to-End e interdevanado según la norma IEC 60076-18. Esto permitirá comparar las curvas y detectar cualquier daño por transporte o instalación.

Exigir en los pliegos de adquisición que los fabricantes entreguen la huella mecánica de fábrica (curvas SFRA de referencia) junto con el transformador, para servir como punto de comparación en futuras pruebas de mantenimiento.

Implementar criterios objetivos de diagnóstico, utilizando los índices RLF, RMF, RHF y E (Error Global) propuestos por DL/T 911 y CIGRÉ WG A2.53, con rangos de interpretación cuantitativos que reduzcan la subjetividad en la evaluación del estado mecánico.

Estandarizar los procedimientos de registro y almacenamiento de resultados (metadatos, condiciones de prueba, archivos .csv y .pdf), creando una base de datos nacional que permita realizar comparaciones históricas y estudios de tendencia sobre el envejecimiento mecánico de transformadores.

Promover la formación especializada del personal técnico en las normas IEC, IEEE y CIGRÉ, en el manejo de equipos de análisis de respuesta en frecuencia y en la interpretación de curvas por bandas de frecuencia. Ello garantizará la repetibilidad y confiabilidad de las mediciones entre distintos operadores.

Integrar la SFRA dentro de los planes de mantenimiento predictivo, realizándola cada 3 a 5 años o tras eventos anormales (golpes, cortocircuitos, transporte). Su comparación con las pruebas de DGA, resistencia de devanados y relación de transformación permitirá diagnósticos integrales más precisos.

Difundir los resultados del presente estudio entre instituciones académicas, empresas distribuidoras y organismos reguladores (SIGET), con el propósito de impulsar la creación de una norma técnica nacional para la prueba SFRA, fortaleciendo la confiabilidad del sistema eléctrico salvadoreño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chapman, S. J. (2012). Máquinas eléctricas (5.<sup>a</sup> ed.). México: McGraw-Hill Education.
- China Electric Power Research Institute (NCEPRI). (1999). *Evaluation method of transformer winding mechanical deformation based on frequency response analysis*. Beijing: NCEPRI.
- China Electric Power Research Institute. (2004). *DL/T 911-2004: Power Transformer Winding Deformation Detection by Frequency Response Analysis (SFRA)*. Beijing: China Electric Power Press.
- CIGRÉ Working Group A2.26. (2008). Technical Brochure No. 342: Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA). Paris, France: CIGRÉ.
- CIGRÉ Working Group A2.26. (2011). *Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)*. CIGRÉ.
- CIGRÉ Working Group A2.53. (2018). *Transformer bushings – Condition monitoring, diagnosis and data management*. CIGRÉ.
- CIGRE Working Group A2.53. (2020). Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA) (Technical Brochure No. 812). CIGRE. ISBN 978-2-85873-517-4.
- CIGRÉ. (2008). Technical Brochure 342: Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA). Paris, France.
- Gourishankar, K. M. (1989). *Electrical engineering: Theory and practice*. Prentice-Hall of India.
- Grupo Saytec S.A. de C.V. (2025). Ofertas de valor BIZ-1085-3206 y BIZ-2025-2664: Ensayos eléctricos y SFRA en transformadores de potencia. Testing – El Salvador.
- Gutten, M., & Korenciak, D. (2020). Evaluation of power transformer frequency response analysis using correlation methods. *Electrical Engineering*, 102(2), 803–812. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00898-y>
- IEC. (2012). IEC 60076-18: Power Transformers – Part 18: Measurement of Frequency Response. International Electrotechnical Commission.
- IEEE Power & Energy Society. (2012). *IEEE C57.149-2012: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*. New York: IEEE.

IEEE Power & Energy Society. (2013). IEEE Std C57.149-2013 – IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE Std C57.149-2012 - IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*. IEEE.

International Electrotechnical Commission. (2012). *IEC 60076-18: Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response*. Geneva: IEC.

Islam, A., Khan, S. I., & Hoque, A. (2011). *Detection of mechanical deformation in old aged power transformer using cross correlation coefficient analysis method*. [Análisis de Respuesta en Frecuencia en Transformadores (FRA)]. Disponible en <https://imseingenieria.blogspot.com/2016/05/analisis-de-respuesta-en-frecuencia-en.html>

Karsai, K., Kerenyi, D., & Kiss, L. (1987). *Large power transformers*. Elsevier.

Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer engineering: Design and practice*. Marcel Dekker.

LACCEI. (2015). *Análisis de las curvas SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) en transformadores de potencia*. En *13th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2015)*. Santo Domingo, República Dominicana. Recuperado de <https://lacei.org/LACCEI2015-SantoDomingo/ExtendedAbstracts/EA074.pdf>

Liu, Y., Li, C., & Zhao, Z. (2010). Analysis of transformer mechanical fault diagnosis based on frequency response. *Electric Power Systems Research*, 80(1), 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.08.001>

Megger Group. (2020). *FRAX Series – Sweep Frequency Response Analyzer User Guide*. Dover, UK.

Megger. (2016). *Análisis de la condición mecánica de transformadores de potencia: mitos y verdades del ensayo de SFRA* [Presentación]. Megger Instruments.

Omicron Electronics GmbH. (2019). *Application Note: SFRA Measurements on Power Transformers*. Austria.

OMICRON electronics GmbH. (2022). *FRANEO 800 - User manual (Rev. 3.4)*. Recuperado de <https://www.omicronenergy.com>

Redalyc. (s.f.). *Casos de estudio de diagnóstico de transformadores por SFRA*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/3291/329173953006/html>

SIGET. (2019). *Normas Técnicas de Seguridad y Calidad del Servicio Eléctrico*. Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones, San Salvador.

SSAI Ingenieros (2024). *Términos de referencia: Reemplazo de transformador de potencia SE Ateos*. San Salvador: SSAI Ingenieros.

Stevenson, W. D. (1984). *Análisis de sistemas eléctricos de potencia* (4.<sup>a</sup> ed.). México: McGraw-Hill.

Testing S.A. de C.V. (s.f.). *Análisis de respuesta en frecuencia (SFRA)*. Recuperado de <https://testing.com.sv/analisis-de-respuesta-en-frecuencia-sfra>

TYD Electric. (s.f.). *Análisis de barrido de frecuencia (SFRA): interpretación y aplicaciones prácticas*. Recuperado de <https://tydelectric.com/analisis-de-barrido-de-frecuencia-sfra-interpretacion-y-aplicaciones-practicas>

Universidad Tecnológica de Pereira. (s.f.). *Manual para la ejecución de la prueba SFRA en transformadores de potencia*. Repositorio Institucional. Recuperado de <https://repositorio.utp.edu.co/items/2b4e20d0-b727-4d42-934c-d97d4e278089>

Yousof, B. M. (2015). *Frequency Response Analysis for Transformer Winding Deformation Detection* (Doctoral dissertation, The University of Queensland). Recuperado de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:356599>

Mohammed, A. (2011, March 2). *Power transformers – Design and application*. PEGuru. <https://peguru.com/2011/03/power-transformers-design-and-application/>

Samimi, M. H., Faiz, J., & Ghasemi Parchini, J. (2023). Feasibility study on the detection of turn-to-turn fault severity in the transformer winding by frequency response analysis and numerical indices. *Electric Power Components and Systems*, 51(9), 856–870. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2185834>

AK ELECTRIC. (2022, marzo 4). *SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYZE TEST, SFRA TEST FOR TRANSFORMER, FULL CONCEPT, TEST RESULT ANALYZE* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=kGFy\\_G0K28o](https://www.youtube.com/watch?v=kGFy_G0K28o)

Schmidbauer Transformatoren. (n.d.). *Explanation and vector groups to applicate 1-phase and 3-phase autotransformers*. Schmidbauer Transformatoren. <https://www.schmidbauer.net/en/explanation-and-vector-groups-to-applicate-1-phase-and-3-phase-autotransformers/>

# ANEXOS

## ANEXO A

Extracto del documento “CIGRE TB 812 – Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)”

### 6.2.1 Frequency range

In the FRA literature regarding the application of indices, it is noteworthy that it is common to find different frequency ranges used for interpretation. Some researchers use the frequency response data in the whole frequency range, whereas others divide it into several frequency bands for assessment. Table 6.1 summarizes the frequency ranges used in FRA interpretation literature.

**Table 6.1 Frequency ranges used in literature for FRA interpretation**

Reference	Frequency range	Reference	Frequency range	Reference	Frequency range
Single frequency sub-band					
[34, 35]	20 Hz–2 MHz	[36-38]	20 Hz–1 MHz	[39]	10 Hz–1 MHz
[40-42]	100 kHz–1 MHz	[43, 44]	10 Hz–3 MHz	[45]	10 kHz–4 MHz
[1, 46]	5 kHz–1 MHz V < 100 kV	[1, 46]	5 kHz–2 MHz V < 100 kV	[47]	10 kHz–1 MHz
Three frequency sub-bands					
[6, 48]	0–100 kHz 100–600 kHz 600–1000 kHz	[49]	0–20 kHz 20–400 kHz 400–1 MHz	[50]	300 Hz–50 kHz 50 kHz–1 MHz 1–3 MHz
[51]	20 Hz–10 kHz 10–100 kHz 100 kHz–1 MHz	[52]	100 Hz–20 kHz 20–200 kHz 200 kHz–2 MHz	[53]	0–350 kHz 350 kHz–1 MHz 1–2 MHz
More than three frequency sub-bands					
[54]	100 Hz–1 kHz 1–10 kHz 10–100 kHz 100 kHz–1 MHz	[3]	0–2 kHz 2–20 kHz 20 kHz–1 MHz 1–2 MHz	[55]	10 kHz–1 MHz 1–2 MHz 2–3 MHz 3–5 MHz
[56]	0–2 kHz 2–20 kHz 20–400 kHz 400–1 MHz	[57]	1–10; 10–20 kHz 20–40; 40–100 kHz 100–500 kHz 500–1000 kHz	[58]	20 Hz–1 MHz 10 ranges

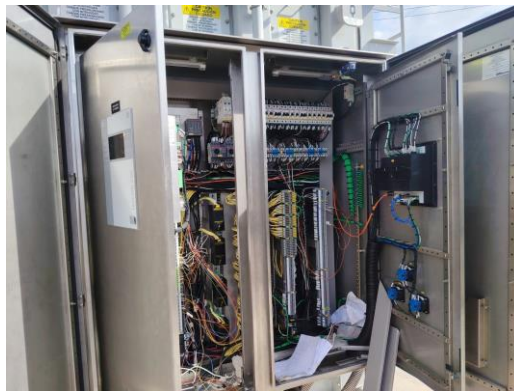
## ANEXO B

El presente anexo recopila el registro fotográfico correspondiente a las etapas de instalación, conexión y verificación del transformador de potencia analizado durante el desarrollo de esta investigación. Estas imágenes documentan el proceso de puesta en servicio, la inspección visual y los elementos asociados al sistema de control, enfriamiento y protección del equipo.

El material gráfico sirve como evidencia complementaria al estudio de detección de deformaciones internas mediante la prueba de Barrido en Frecuencia (SFRA), técnica principal analizada en este trabajo. Su inclusión permite contextualizar las condiciones reales del transformador, la infraestructura eléctrica de la subestación y los componentes donde se aplicaron las metodologías descritas en los capítulos anteriores.

Asimismo, el registro visual refuerza el análisis técnico expuesto, mostrando los equipos auxiliares, el sistema de enfriamiento, las conexiones de control y los accesorios que influyen en la respuesta eléctrica del transformador ante perturbaciones mecánicas o electromagnéticas. De esta manera, el Anexo B constituye una referencia práctica que evidencia el entorno operativo donde se propone la aplicación del ensayo SFRA como herramienta estándar para el diagnóstico mecánico de transformadores de potencia mayores a 1 MVA en El Salvador.

### *Anexo B 1. Tablero de control del transformador.*



Panel de control principal con cableado interno y relés de protección instalados.

**Anexo B 2.** *Indicador de posición del cambiador de derivaciones.*



Vista del controlador de cambiador de tomas bajo carga (OLTC) con selector de posición visible.

**Anexo B 3.** *Medidores de temperatura de devanado y aceite.*



Instrumentos de monitoreo instalados en la carcasa del transformador para control térmico.

*Anexo B 4. Sistema de ventilación y enfriamiento*



Ventiladores ABB instalados para el control térmico del transformador.

*Anexo B 5. Transformador de potencia instalado en subestación*



Vista general del transformador durante su montaje en la subestación.

*Anexo B 6. Personal técnico realizando conexiones.*



Técnicos especializados realizando conexiones de alta tensión en bornes del transformador.

*Anexo B 7. Proceso de verificación y ajuste de conexiones.*



Supervisión de la conexión de los bushings y del sistema de protección asociado.

*Anexo B 8. Estructura superior de conexión en barra.*



Vista de la estructura metálica de interconexión con los alimentadores de potencia.

*Anexo B 9. Sistema de ventilación y radiadores*



Vista lateral del transformador con radiadores y ventiladores instalados.

*Anexo B 10. Contenedor de aceite vegetal dieléctrico.*

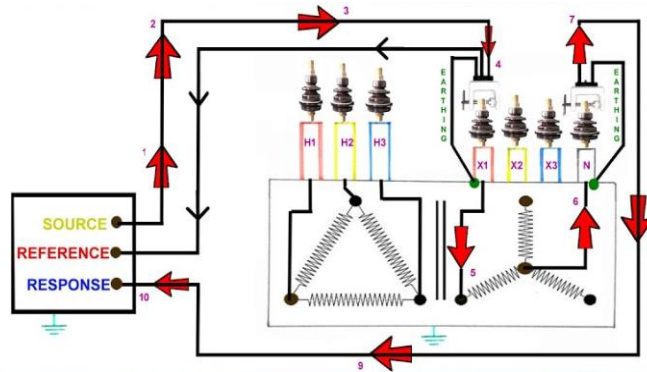


Tambores con aceite vegetal utilizado como medio dieléctrico del transformador.

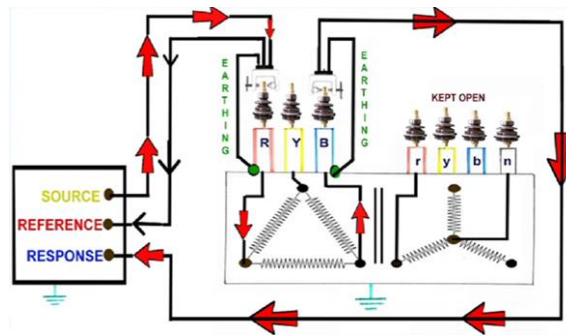
## ANEXO C

### Conexiones

*Anexo C 11. Conexión típica para obtener traza SFRA individual de una fase en devanado en configuración estrella.*



*Anexo C 12. Conexión típica para obtener traza SFRA individual de una fase en devanado en configuración delta.*



**Anexo C 13.** Grupos vectoriales de interés (Schmidbauer Transformatoren. (n.d.). Explanation and vector groups to applicate 1-phase and 3-phase autotransformers. Schmidbauer Transformatoren.)

Bezeichnung		Zeigerbild	Schaltungsbild	Sternpunkt
Kennzahl	Schaltgruppe			
0	YNa0			Mit ca. 10% belastbar
0	ZNa0			100% belastbar

**Y:** devanado “alto” en estrella.

**N:** neutro accesible en ese lado.

**a:** devanado “bajo” en estrella (minúscula = lado de menor tensión).

**0:** 0° de desfase entre primario y secundario.

Se usa mucho en **autotransformadores trifásicos**, suele implicar que el **neutro solo es cargable parcialmente** (aproximadamente un 10 % de la corriente nominal), a menos que el neutro de entrada sea plenamente cargable y el punto estrella esté vinculado al consumidor.

Para neutro 100 % cargable se prefiere **ZNa0** (zig-zag).