



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**“Estudio del estado mecánico del aislamiento y  
detección de fallas en bobinas de máquinas  
rotatorias mediante análisis de respuesta a la  
frecuencia(FRA).”**

---

JOSÉ ANDRES MILLAN OSORIO

---

2025

Requisito parcial para obtener el título de:  
Ingeniero Electricista

Profesor Guía:  
Dr. Roger Schurch B. (UTFSM)

Valparaíso, 2025.



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Estudio del estado mecánico del aislamiento y detección de fallas en bobinas de máquinas rotatorias mediante análisis de respuesta a la frecuencia (FRA).

**Nombre del candidato(a):** José Andrés Millan Osorio

**Carrera / Grado:** Ingeniería Eléctrica

**Campus:** Casa Central Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Roger Schürch Brandt, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** \_\_11/12/2025\_\_ **Firma:** \_\_\_\_\_

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** \_\_\_\_\_11/12/2025\_\_\_\_\_ **Firma:** \_\_\_\_\_

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# Índice de Contenidos

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Justificación del tema . . . . .	3
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.3. Desglose general del estudio . . . . .	4
<b>I Fundamentos teóricos</b>	<b>6</b>
<b>2. Fundamentos del Análisis de Respuesta en Frecuencia</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción al FRA en Máquinas Eléctricas . . . . .	7
2.1.1. Problemática bajo estudio . . . . .	7
2.1.2. Evolución desde transformadores a máquinas rotatorias . . . . .	8
2.1.3. Ventajas y desventajas del FRA versus métodos tradicionales . . . . .	8
2.2. Principios Fundamentales del FRA . . . . .	10
2.2.1. Definición y concepto “huella digital” . . . . .	10
2.2.2. Esquema básico de medición . . . . .	10
2.2.3. Modo de operación del ensayo . . . . .	11
2.3. Instrumentación y accesorios de conexión . . . . .	12
2.3.1. Parámetros de entrada y salida . . . . .	12
2.3.2. Instrumentación para ensayo SFRA . . . . .	12
2.3.3. Cables y conectores . . . . .	13
2.3.4. Aterrizamiento de pantallas . . . . .	13
2.4. Tipos de conexiones . . . . .	14
2.4.1. Elección de puntos de medición . . . . .	14
2.4.2. Configuración bobina simple . . . . .	14
2.4.3. Configuración entre bobinas . . . . .	15
2.5. Caracterización de mediciones en transformadores . . . . .	16
2.5.1. Métodos de comparación . . . . .	16
2.5.2. Parámetros de visualización . . . . .	16
2.5.3. Relación de rangos de frecuencia con parámetros del bobinado . . . . .	17
2.5.4. Factores que influyen en el rango de frecuencia interpretable . . . . .	19
2.6. Normativa y referencias técnicas . . . . .	21
2.7. Metodología de análisis cualitativo e inspección visual . . . . .	22
2.8. Metodologías y enfoques de análisis cuantitativo . . . . .	23

2.8.1.	Indicadores numéricos basados en frecuencias de resonancia . . . . .	23
2.8.2.	Indicadores numéricos basados en ajuste vectorial de mediciones . . .	23
2.8.3.	Algoritmos basados en modelos de caja blanca . . . . .	23
2.8.4.	Algoritmos basados en inteligencia artificial . . . . .	23
2.8.5.	Indicadores estadísticos . . . . .	24
2.8.6.	Método de ventanas deslizantes . . . . .	27
<b>3.</b>	<b>Características constructivas de bobinas preformadas</b>	<b>29</b>
3.1.	Características constructivas de bobinas preformadas . . . . .	29
3.1.1.	Introducción . . . . .	29
3.1.2.	Materiales y técnicas de fabricación . . . . .	29
3.1.3.	Subsistemas dieléctricos . . . . .	30
3.2.	Degradación del aislamiento . . . . .	32
3.2.1.	Mecanismos de degradación . . . . .	32
3.2.2.	Ruptura macroscópica . . . . .	34
3.2.3.	Principales características de los dieléctricos sólidos . . . . .	34
3.3.	Medición SFRA orientada a máquinas rotatorias . . . . .	35
3.3.1.	Modelo de parámetros distribuidos . . . . .	35
3.3.2.	Aplicaciones SFRA . . . . .	36
3.3.3.	Batería de ensayos para el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias	37
<b>II</b>	<b>Trabajo experimental</b>	<b>38</b>
<b>4.</b>	<b>Metodología experimental y validación del sistema de medición</b>	<b>39</b>
4.1.	Descripción general de la metodología experimental . . . . .	39
4.2.	Descripción del sistema de medición . . . . .	40
4.2.1.	Especificaciones técnicas del FRAX101 . . . . .	40
4.2.2.	Configuración del software y parámetros de medición . . . . .	40
4.2.3.	Adaptaciones para bobinas de máquinas rotatorias . . . . .	42
4.3.	Protocolo de ensayos y configuraciones . . . . .	45
4.3.1.	Configuraciones de ensayo propuestas . . . . .	45
4.3.2.	Procedimientos de conexión . . . . .	46
4.3.3.	Parámetros de visualización y consideraciones de muestreo . . . . .	50
4.4.	Validación del sistema de medición . . . . .	51
4.4.1.	Verificación de cero decibel . . . . .	51
4.4.2.	Verificación de rango dinámico . . . . .	53
4.5.	Descripción de probetas y casos de estudio . . . . .	55
4.5.1.	Características de las bobinas preformadas . . . . .	55
4.5.2.	Definición de casos de estudio . . . . .	56
4.5.3.	Catalogación de probetas ensayadas . . . . .	58
4.6.	Estructura de la base de datos . . . . .	65
4.6.1.	Organización y manejo de datos . . . . .	65
4.6.2.	Cantidad total de mediciones realizadas . . . . .	66
4.6.3.	Consolidación de protocolos experimentales . . . . .	66
<b>5.</b>	<b>Caracterización visual y análisis de sensibilidad de la medición</b>	<b>67</b>
5.1.	Caracterización visual de respuesta FRA . . . . .	67
5.1.1.	Zonas de frecuencia característica - Configuración 1 . . . . .	69

5.1.2.	Zonas de frecuencia característica - Configuración 2 . . . . .	70
5.1.3.	Resonancias Características - Configuraciones 1 y 2 . . . . .	70
5.1.4.	Zonas de frecuencia característica - Configuración 3 . . . . .	71
5.1.5.	Comportamiento atípico de probetas (caso B8) . . . . .	72
5.2.	Análisis de estabilidad ante factores experimentales . . . . .	72
5.2.1.	Sensibilidad a configuración de cables coaxiales . . . . .	72
5.2.2.	Evaluación de sistemas de conexión (conectores) . . . . .	76
<b>6.</b>	<b>Análisis de patrones de falla</b>	<b>80</b>
6.1.	Superficie de contacto de ranura . . . . .	80
6.1.1.	Embarrilado de cobre . . . . .	80
6.1.2.	Conductor central . . . . .	80
6.1.3.	Papel aluminio . . . . .	81
6.1.4.	Perfiles de fierro . . . . .	82
6.1.5.	Núcleo de fierro laminado . . . . .	83
6.1.6.	Caracterización del FRA según superficie de ranura . . . . .	84
6.1.6.a.	Configuración 1 . . . . .	84
6.1.6.b.	Configuración 2 . . . . .	85
6.1.6.c.	Configuración 3 . . . . .	86
6.2.	Fallas que afectan la topología del circuito de medición . . . . .	87
6.2.1.	Falla aislamiento principal a tierra . . . . .	87
6.2.2.	Cortocircuito entre vueltas . . . . .	87
6.3.	Fallas que modifican las propiedades dieléctricas . . . . .	90
6.3.1.	Contaminación superficial . . . . .	90
6.3.1.a.	Configuración 1 . . . . .	91
6.3.1.b.	Configuración 2 . . . . .	92
6.3.1.c.	Configuración 3 . . . . .	93
6.3.2.	Pérdida de cinta semi-conductora . . . . .	93
6.3.2.a.	Configuración 1 . . . . .	95
6.3.2.b.	Configuración 2 . . . . .	96
6.3.2.c.	Configuración 3 . . . . .	97
6.4.	Fallas que alteran la geometría . . . . .	97
6.4.1.	Fractura del aislamiento principal . . . . .	97
6.4.1.a.	Configuración 1 . . . . .	98
6.4.1.b.	Configuración 2 . . . . .	99
6.4.1.c.	Configuración 3 . . . . .	99
6.4.2.	Flexión de bobina . . . . .	101
6.4.2.a.	Configuración 1 . . . . .	101
6.4.2.b.	Configuración 2 . . . . .	102
6.4.2.c.	Configuración 3 . . . . .	102
6.5.	Cálculo de indicadores numéricos . . . . .	104
6.5.1.	Elección del indicador CCF . . . . .	104
6.5.2.	Criterio de comparación mediante ventanas de frecuencia fijas . . . . .	104
6.5.3.	Tablas de resultados del indicador CCF . . . . .	104
6.6.	Rangos afectados en ensayos de sensibilidad del FRA . . . . .	105
6.6.1.	Zonas de frecuencias no interpretables . . . . .	105
6.6.2.	Influencia de los conectores . . . . .	107
6.6.3.	Influencia de superficie de contacto de ranura . . . . .	108

---

6.6.4.	Falla de cortocircuito entre vueltas y aislamiento a tierra . . . . .	108
6.6.5.	Sensibilidad a la contaminación y degradación de cinta semiconductor	109
6.6.6.	Sensibilidad a la fractura de aislamiento y flexión de bobina . . . . .	110
6.7.	Caracterización por configuración de medición . . . . .	111
6.7.1.	Configuración 1 - Inductiva . . . . .	111
6.7.2.	Configuración 2 - Inductiva a tierra . . . . .	112
6.7.3.	Configuración 3 - Capacitiva . . . . .	112
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>113</b>
7.1.	Trabajo en el laboratorio . . . . .	113
7.2.	Resultados experimentales . . . . .	114
7.2.1.	Generales . . . . .	114
7.2.2.	Sensibilidades de la medición . . . . .	115
7.2.3.	Sensibilidades a fallas inducidas . . . . .	115
7.2.4.	Aportes del estudio . . . . .	116
7.2.5.	Trabajos futuros . . . . .	117
	<b>Apéndices</b>	<b>118</b>
A.	Gráficas complementarias	118
B.	Tablas de resultados - indicadores numéricos calculados	135
C.	Respuesta en frecuencia de sistemas lineales	148
D.	Metodología de indicadores estadísticos	156
	<b>Bibliografía</b>	<b>166</b>

# Índice de Figuras

2.1.	Esquema básico de medición Fuente: DOI: 10.1109/MEI.2016.7552374 . . .	10
2.2.	Esquema principio básico FRA Fuente: Elaboración Propia . . . . .	11
2.3.	Esquema interno de instrumento FRA [7] . . . . .	12
2.4.	Equipo FRAX101 [7] . . . . .	12
2.5.	Cable coaxial [7] . . . . .	13
2.6.	Conductor plano trenzado [7] . . . . .	13
2.7.	Circuito equivalente cable coaxial. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	14
2.8.	Conector “C” original FRAX101 [7] . . . . .	14
2.9.	Conexión general en transformador [7]. . . . .	14
2.10.	Esquema de conexión: cables y su aterrizamiento [8] . . . . .	14
2.11.	Conexión “end-to-end”, (a) fuente en la fase, (b) fuente en el neutro [6] .	15
2.12.	Conexión inter-devanados, (a) capacitiva, (b) inductiva [6] . . . . .	16
2.13.	Rangos cualitativos de frecuencia para transformador [11] (A) Bajas frec. (B) Frec. medias (C) Altas frec. (D) Ruido. . . . .	18
2.14.	Corrientes de fuga en el transformador [14] . . . . .	19
2.15.	Ejemplos mediciones FRA (asumiendo que no hay otra falla existente) [10] (a) Movimiento radial (b) Movimiento axial (c) Cortocircuito en una vuelta Fase C. . . . .	22
2.16.	Representación gráfica del método de ventanas deslizantes [17] . . . . .	28
3.1.	(a) Bobina preformada, (b) Sección de bobina considerando aislamiento hebra y multi-vueltas, (c) considerando aislamiento solo hebras [19] . . .	31
3.2.	Distribución de bobinas preformadas en un núcleo. Fuente: <a href="https://www.universalcoil.com/products_dipbake.html">https://www.universalcoil.com/products_dipbake.html</a> . . . . .	31
3.3.	Distribución del sistema de aislamiento de máquinas rotatorias Fuente: DOI: 10.1109/57.995396 . . . . .	32
3.4.	Esquema de fuentes de descargas parciales en máquinas rotatorias [19] . .	33
3.5.	Circuito de parámetros distribuidos para bobina preformada [22] . . . . .	36
3.6.	Ensayos off-line devanados estáticos [3]. . . . .	37
4.1.	Interfaz general en software FARX101 [7] . . . . .	41
4.2.	Ventana de configuración de medida de software FRAX101 [7] . . . . .	42
4.3.	Montaje de probetas en el laboratorio . . . . .	43
4.4.	Comparación conector tipo caimán con resorte, original y plano. . . . .	44
4.5.	Comparación de tamaño entre conectores. . . . .	44
4.6.	Montaje de conectores alternativos con prensa auxiliar. . . . .	44
4.7.	Conexión de pantallas a tierra para ensayo GR2 M1. . . . .	45
4.8.	Conexión de pantallas a tierra para ensayo GR12 Mt. . . . .	45

4.9.	Esquema de conexión de pantallas entre coaxiales Fuente: Elaboración propia . . . . .	45
4.10.	Identificación de terminal 1. . . . .	47
4.11.	Esquema de conexión para ensayo SFRA en bobina individual GR2-M1 Fuente: Elaboración propia . . . . .	47
4.12.	Circuito equivalente para bobina individual en configuración GR2-M1 Fuente: Elaboración propia . . . . .	47
4.13.	Esquema de conexión para ensayo SFRA en bobina individual GR2-M1 aterrizada Fuente: Elaboración propia . . . . .	48
4.14.	Circuito equivalente para bobina individual en configuración GR2-M1 aterrizada Fuente: Elaboración propia . . . . .	48
4.15.	Esquema de conexión para ensayo SFRA en bobina individual GR12-Mt Fuente: Elaboración propia . . . . .	49
4.16.	Circuito equivalente para bobina individual en configuración GR12-Mt Fuente: Elaboración propia . . . . .	49
4.17.	Conexión a tierra del instrumento FRAX101 en el laboratorio . . . . .	50
4.18.	Ancho de banda y puntos por década FRAX101 modo prueba rápida [7] .	50
4.19.	Configuración definida para el presente estudio [7] . . . . .	50
4.20.	Verificación cero decibel y rango dinámico - Curvas del fabricante [7] . . .	51
4.21.	Esquema de conexión para verificación de cero decibel Fuente: Elaboración propia . . . . .	52
4.22.	Gráfica experimental - verificación de cero decibel. . . . .	53
4.23.	Comparación de conexión de conector original entre <i>bushing</i> de transformador y en bobina preformada. . . . .	53
4.24.	Esquema de conexión para verificación de rango dinámico Fuente: Elaboración propia . . . . .	54
4.25.	Gráfica experimental - verificación de rango dinámico. . . . .	54
4.26.	Esquema general de bobinas ensayadas en el laboratorio . . . . .	55
4.27.	Imagen comparativa de bobinas ensayadas . . . . .	58
4.28.	Inspección visual de Bobina 1 . . . . .	59
4.29.	Inspección visual de Bobina 2 . . . . .	60
4.30.	Bobina 2 - falla preexistente . . . . .	60
4.31.	Inspección visual de Bobina 3 . . . . .	61
4.32.	Bobina 3 - falla preexistente . . . . .	61
4.33.	Inspección visual de Bobina 4 . . . . .	62
4.34.	Inspección visual de Bobina 5 . . . . .	62
4.35.	Inspección visual de Bobina 6 . . . . .	63
4.36.	Inspección visual de Bobina 7 . . . . .	64
4.37.	Inspección visual de Bobina 8 . . . . .	64
4.38.	Estructura y flujo general de base de datos . . . . .	65
5.1.	Esquemas de configuración de medida Fuente: Elaboración propia . . . . .	67
5.2.	Curvas de respuesta a la frecuencia - comparación entre configuraciones de conexión . . . . .	68
5.3.	Curvas de respuesta a la frecuencia - configuración 1 . . . . .	69
5.4.	Curvas de respuesta a la frecuencia - configuración 2 . . . . .	70
5.5.	Curvas de respuesta a la frecuencia - configuración 3 . . . . .	71
5.6.	Disposición cables enrollados. . . . .	73

5.7.	Disposición cables estirados. . . . .	73
5.8.	FRA - configuración 1 - sensibilidad de cables - B1 . . . . .	74
5.9.	FRA - configuración 2 - sensibilidad de cables - B5 . . . . .	75
5.10.	FRA - configuración 3 - sensibilidad de cables - B8 . . . . .	76
5.11.	Sistema de medición con conector original. . . . .	77
5.12.	Sistema de medición con conector adaptado . . . . .	77
5.13.	FRA - configuración 1 - sensibilidad conectores - B5 . . . . .	77
5.14.	FRA - configuración 2 - sensibilidad conectores - B4 . . . . .	78
5.15.	FRA - configuración 3 - sensibilidad conectores - B6 . . . . .	79
6.1.	Montaje de bobina con embarrilado de cobre . . . . .	80
6.2.	Montaje de bobina unión de conductor central . . . . .	81
6.3.	Montaje bobina con papel aluminio . . . . .	82
6.4.	Montaje bobina con perfiles de fierro . . . . .	83
6.5.	Montaje de bobina con en núcleo de fierro laminado . . . . .	83
6.6.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 1 - B1	84
6.7.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 2 - B6	85
6.8.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 3 - B3	86
6.9.	Comparación FRA falla a tierra - B1 . . . . .	87
6.10.	Bobina dispuesta con seis bornes cortocircuitables. . . . .	88
6.11.	Ejemplo de cortocircuito con resistencia de $4.5\Omega$ . . . . .	88
6.12.	Comparación FRA cortocircuito entre vueltas sin resistencia - configura- ción 1 - B3 . . . . .	89
6.13.	Comparación FRA cortocircuito entre vueltas con resistencia - configu- ración 1 - B3 . . . . .	89
6.14.	Emulación de contaminación superficial <i>grading</i> . . . . .	90
6.15.	Emulación de contaminación superficial terminales. . . . .	90
6.16.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 1 - B6 . . . . .	91
6.17.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 2 - B7 . . . . .	92
6.18.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 3 - B1 . . . . .	93
6.19.	Perdida de cinta semi-conductora - Etapas del ensayo . . . . .	94
6.20.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 1 - B5	95
6.21.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 2 - B2	96
6.22.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 3 - B5	97
6.23.	Emulación de fractura de aislamiento principal de bobina. . . . .	98
6.24.	Embarrilado de cobre sobre aislamiento dañado. . . . .	98
6.25.	Comparación FRA fractura de aislamiento principal - configuración 1 - B1	98
6.26.	Comparación FRA fractura de aislamiento principal - configuración 2 - B1	99
6.27.	Comparación FRA fractura de aislamiento principal - configuración 3 - B1	100
6.28.	Bobina sometida a flexión interior. . . . .	101
6.29.	Bobina sometida a flexión exterior. . . . .	101
6.30.	Comparación FRA flexión - configuración 1 - B6 . . . . .	101
6.31.	Comparación FRA flexión - configuración 2 - B6 . . . . .	102
6.32.	Comparación FRA flexión - configuración 3 - B6 . . . . .	103

A.1.	Comparación FRA cables coaxiales - configuración 1 - B5 . . . . .	118
A.2.	Comparación FRA cables coaxiales - configuración 1 - B6 . . . . .	119
A.3.	Comparación FRA cables coaxiales - configuración 1 - B8 . . . . .	119
A.4.	Comparación FRA conectores - configuración 1 - B4 . . . . .	120
A.5.	Comparación FRA conectores - configuración 1 - B7 . . . . .	121
A.6.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 1 - B3122	
A.7.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 1 - B6123	
A.8.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 2 - B1123	
A.9.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 2 - B3124	
A.10.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 3 - B1124	
A.11.	Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 3 - B6125	
A.12.	Comparación FRA falla a tierra - B8 . . . . .	126
A.13.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 1 - B1 . . . . .	127
A.14.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 1 - B7 . . . . .	128
A.15.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 2 - B1 . . . . .	128
A.16.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 2 - B6 . . . . .	129
A.17.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 3 - B6 . . . . .	129
A.18.	Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configura- ción 3 - B7 . . . . .	130
A.19.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductora - configuración 1 - B2	131
A.20.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductora - configuración 1 - B8	132
A.21.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductora - configuración 2 - B5	132
A.22.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductora - configuración 2 - B8	133
A.23.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductora - configuración 3 - B2	133
A.24.	Comparación FRA pérdida de cinta semiconductora - configuración 3 - B8	134
C.1.	Representación compacta de un sistema [24] . . . . .	148
C.2.	Propiedad de invariancia en el tiempo [24] . . . . .	149
C.3.	Ejemplo red de dos puertos Fuente: Elaboración propia . . . . .	152
C.4.	Efecto “skin”, (a) Corriente continua (b) Frecuencia $\omega$ Fuente: Elabora- ción propia . . . . .	153
C.5.	Resonancia (a) serie (b) paralelo Fuente: Elaboración propia . . . . .	153
C.6.	Tipos de gráficos Magnitud vs. Frecuencia Fuente: Elaboración propia . .	155
C.7.	Resonancia serie y paralelo (con y sin pérdidas)[13]. . . . .	155
D.1.	Mapa de calor - correlación entre indicadores estadísticos - configuración 1	160
D.2.	Mapa de calor - correlación entre indicadores estadísticos - configuración 2	161
D.3.	Mapa de calor - correlación entre indicadores estadísticos - configuración 3	162
D.4.	Variación promedio de indicadores - sensibilidad cables - configuración 1 .	163
D.5.	Variación promedio de indicadores - sensibilidad cables - configuración 2 .	164
D.6.	Variación promedio de indicadores - sensibilidad cables - configuración 3 .	165

# Índice de Tablas

2.1.	Comparación de las principales técnicas eléctricas de diagnóstico para deformación de devanado en transformadores [6] . . . . .	9
2.2.	Características recomendadas para visualización en instrumentos SFRA según normas [6, 10, 11, 12] . . . . .	17
2.3.	Rango de frecuencia de referencia para el análisis según normas [6, 10, 11, 12] . . . . .	18
2.4.	Indicadores estadísticos para análisis de respuesta en frecuencia [17] . . .	25
2.5.	Criterio de decisión, comparación con medición previa [18] . . . . .	26
2.6.	Criterio de decisión, comparación con otra unidad o entre fases [18] . . .	26
2.7.	Nivel de deformaciones basado en $R_{xy}$ [12] . . . . .	26
2.8.	Ventajas y desventajas de los principales indicadores documentados [17] .	27
4.1.	Especificaciones técnicas del instrumento FRAX101 [7] . . . . .	40
4.2.	Especificaciones de probetas utilizadas en el estudio . . . . .	55
4.3.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 1 . . . . .	59
4.4.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 2 . . . . .	59
4.5.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 3 . . . . .	60
4.6.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 4 . . . . .	61
4.7.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 5 . . . . .	62
4.8.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 6 . . . . .	63
4.9.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 7 . . . . .	63
4.10.	Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 8 . . . . .	64
5.1.	Mínimos globales SFRA por bobina y configuración . . . . .	71
6.1.	Rangos no interpretables por configuración y bobina - influencia disposición de cables . . . . .	106
6.2.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a variación de conectores	107
6.3.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a superficie de contacto de ranura . . . . .	108
6.4.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad cortocircuito entre vueltas	108
6.5.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a falla de aislamiento principal a tierra . . . . .	109
6.6.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a contaminación superficial . . . . .	110
6.7.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a degradación de cinta semiconductora . . . . .	110
6.8.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad fractura de aislamiento principal . . . . .	111

6.9.	Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a flexión de bobina . . .	111
B.1.	Umbrales de sensibilidad CCF - B1 - Configuración 1 . . . . .	135
B.2.	Umbrales de sensibilidad CCF - B1 - Configuración 2 . . . . .	136
B.3.	Umbrales de sensibilidad CCF - B1 - Configuración 3 . . . . .	136
B.4.	Umbrales de sensibilidad CCF - B2 - Configuración 1 . . . . .	137
B.5.	Umbrales de sensibilidad CCF - B2 - Configuración 2 . . . . .	137
B.6.	Umbrales de sensibilidad CCF - B2 - Configuración 3 . . . . .	137
B.7.	Umbrales de sensibilidad CCF - B3 - Configuración 1 . . . . .	138
B.8.	Umbrales de sensibilidad CCF - B3 - Configuración 2 . . . . .	138
B.9.	Umbrales de sensibilidad CCF - B3 - Configuración 3 . . . . .	139
B.10.	Umbrales de sensibilidad CCF - B4 - Configuración 1 . . . . .	139
B.11.	Umbrales de sensibilidad CCF - B4 - Configuración 2 . . . . .	140
B.12.	Umbrales de sensibilidad CCF - B4 - Configuración 3 . . . . .	141
B.13.	Umbrales de sensibilidad CCF - B5 - Configuración 1 . . . . .	141
B.14.	Umbrales de sensibilidad CCF - B5 - Configuración 2 . . . . .	142
B.15.	Umbrales de sensibilidad CCF - B5 - Configuración 3 . . . . .	142
B.16.	Umbrales de sensibilidad CCF - B6 - Configuración 1 . . . . .	142
B.17.	Umbrales de sensibilidad CCF - B6 - Configuración 2 . . . . .	143
B.18.	Umbrales de sensibilidad CCF - B6 - Configuración 3 . . . . .	143
B.19.	Umbrales de sensibilidad CCF - B7 - Configuración 1 . . . . .	144
B.20.	Umbrales de sensibilidad CCF - B7 - Configuración 2 . . . . .	145
B.21.	Umbrales de sensibilidad CCF - B7 - Configuración 3 . . . . .	146
B.22.	Umbrales de sensibilidad CCF - B8 - Configuración 1 . . . . .	146
B.23.	Umbrales de sensibilidad CCF - B8 - Configuración 2 . . . . .	147
B.24.	Umbrales de sensibilidad CCF - B8 - Configuración 3 . . . . .	147
D.1.	Ventanas de frecuencia - Configuraciones 1 y 2 . . . . .	157
D.2.	Ventanas de frecuencia - Configuración 3 . . . . .	158
D.3.	Grupos de indicadores con correlación redundante - sensibilidad de cables - configuración 1 . . . . .	161
D.4.	Grupos de indicadores con correlación redundante - sensibilidad de cables - configuración 2 . . . . .	161
D.5.	Grupos de indicadores con correlación redundante - sensibilidad de cables - configuración 3 . . . . .	162

# Resumen

El Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) se ha consolidado como técnica efectiva para la detección temprana de fallas en transformadores de media y alta tensión, con referencias técnicas y prácticas normadas internacionalmente. Sin embargo, su aplicación en máquinas rotatorias presenta una brecha significativa de conocimiento técnico, con escasa documentación y ausencia de metodologías estandarizadas. Esta situación representa una oportunidad de investigación para adaptar la técnica FRA desde transformadores hacia bobinas preformadas de máquinas rotatorias.

Este estudio desarrolla y valida experimentalmente la aplicación del FRA en bobinas preformadas de máquinas rotatorias de media tensión, adaptando metodologías desde transformadores, estableciendo configuraciones de medición específicas, caracterizando patrones de falla típicos y determinando rangos de frecuencia interpretables para diagnóstico efectivo

Se utilizó el equipo FRAX101 del Laboratorio de Alta Tensión USM, estableciendo tres configuraciones de medición: inductiva (configuración 1), inductiva a tierra (configuración 2) y capacitiva (configuración 3). Se desarrollaron conectores adaptados para mejorar la calidad de contacto y se implementó un protocolo experimental que incluyó la simulación de seis tipos de fallas: cortocircuito entre vueltas, aislamiento principal a tierra, degradación de cinta semiconductor, contaminación superficial, fractura de aislamiento y flexión. Se aplicaron indicadores estadísticos según criterios de Cigre TB 812 y se realizó análisis de sensibilidad del sistema de medición.

Las gráficas FRA obtenidas se caracterizan por su simplicidad comparadas con transformadores, presentando una sola resonancia y predominio resistivo-inductivo. Se identificaron rangos de frecuencia característicos para bobinas preformadas: zona no interpretable en bajas frecuencias (20-796 Hz), resonancia principal (0.5-1.7 MHz) y zona de comportamiento capacitivo ( $>2$  MHz). La configuración 2 demostró mayor efectividad para detectar degradación dieléctrica progresiva, mientras que la configuración 1 resultó óptima para fallas topológicas severas. El indicador CCF mostró efectividad para fallas severas pero limitaciones en fallas que varían la geometría.

Se validó que el FRA proporciona capacidad de diagnóstico complementaria a técnicas tradicionales (Tan $\delta$ , Surge test), siendo especialmente efectivo para detección temprana de degradación de cinta semiconductor no detectable por métodos convencionales. Los rangos de frecuencia establecidos y el protocolo de selección de configuración según tipo de falla constituyen referencias para futura estandarización industrial. El desarrollo de conectores adaptados facilitó la implementación práctica de la técnica. Se demostró además que el FRA no solo detecta fallas sino también diferencias de fabricación, ampliando sus aplicaciones como herramienta de control de calidad.

# Abstract

Frequency Response Analysis (FRA) has been established as an effective technique for early fault detection in medium and high-voltage transformers, with internationally standardized technical references and practices. However, its application to rotating machines presents a significant technical knowledge gap, with scarce documentation and absence of standardized methodologies. This situation represents a research opportunity to adapt the FRA technique from transformers to preformed coils of rotating machines.

This study develops and experimentally validates the application of FRA to preformed coils of medium-voltage rotating machines by adapting methodologies from transformers, establishing specific measurement configurations, characterizing typical fault patterns, and determining interpretable frequency ranges for effective diagnosis.

The FRAX101 equipment from the Laboratorio de Alta Tensión USM was utilized, establishing three measurement configurations: inductive (configuration 1), inductive-to-ground (configuration 2), and capacitive (configuration 3). Adapted connectors were developed to improve contact quality, and an experimental protocol was implemented including the simulation of six fault types: turn-to-turn short circuit, main insulation to ground, semiconductive tape degradation, surface contamination, insulation fracture, and bending. Statistical indicators were applied according to Cigre TB 812 criteria, and measurement system sensitivity analysis was performed.

The obtained FRA plots are characterized by their simplicity compared to transformers, presenting a single resonance and resistive-inductive predominance. Characteristic frequency ranges were identified for preformed coils: non-interpretable zone at low frequencies (20-796 Hz), main resonance (0.5-1.7 MHz), and capacitive behavior zone (>2 MHz). Configuration 2 demonstrated greater effectiveness for detecting progressive dielectric degradation, while configuration 1 proved optimal for severe topological faults. The CCF indicator showed effectiveness for severe faults but limitations for geometry-varying faults.

It was validated that FRA provides diagnostic capability complementary to traditional techniques ( $\text{Tan}\delta$ , Surge test), being especially effective for early detection of semiconductive tape degradation not detectable by conventional methods. The established frequency ranges and the configuration selection protocol according to fault type constitute references for future industrial standardization. The development of adapted connectors facilitated the practical implementation of the technique. It was further demonstrated that FRA not only detects faults but also manufacturing differences, expanding its applications as a quality control tool.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Justificación del tema

En las últimas dos décadas la investigación acerca del análisis de respuesta a la frecuencia “FRA” (*Frequency Response Analysis*) ha cobrado bastante fuerza como técnica para la detección temprana de fallas en transformadores de media y alta tensión, permitiendo tomar medidas correctivas, disminuir costos por reparación y mejorar la confiabilidad del sistema.

Las pruebas FRA se basan en la evaluación de la impedancia de un devanado en el dominio de la frecuencia. Dado que las probetas ensayadas pueden ser modeladas por elementos resistivos, capacitivos e inductivos, que dependen de su geometría y materiales, la respuesta a la frecuencia es única. Cualquier alteración geométrica y/o de sus propiedades provoca desviación en esta respuesta, por lo tanto es posible utilizar esta característica como una herramienta para el diagnóstico.

Referencias técnicas y prácticas recomendadas de los más importantes grupos internacionales de estandarización han sido publicadas y orientadas a transformadores inmersos en aceite para las etapas de fabricación, montaje y mantenimiento.

Sin embargo, al ser una técnica relativamente nueva, su introducción en la industria ha sido paulatina y prudente, aplicándose principalmente a eventos que comprometen de manera crítica al equipo, como transporte, montaje, pruebas de cortocircuito y eventos sísmicos. Aunque el FRA está normado internacionalmente, aún no se integra sistemáticamente en las pruebas FAT de transformadores, quedando su aplicación a criterio del fabricante o solicitud específica del cliente.

Con respecto a máquinas rotatorias se percibe, en general, escasa cantidad de publicaciones relacionadas al tema, lo cual representa una oportunidad significativa de investigación y desarrollo en la caracterización de fallas mediante ensayos FRA. Esta brecha en el conocimiento técnico constituye la principal motivación y justificación de este estudio.

La presente memoria abarca el desarrollo teórico y validación experimental del FRA aplicado a bobinas preformadas de máquinas rotatorias de media tensión. El alcance incluye la adaptación metodológica desde transformadores, establecimiento de tres configuraciones de medición específicas, caracterización de seis tipos de fallas típicas, aplicación de indicadores numéricos y determinación de rangos de frecuencia interpretables para diag-

nóstico efectivo.

## 1.2. Objetivos

Los principales objetivos de esta memoria son:

- ✓ Recopilar bibliografía y “estado del arte” respecto a las metodologías usadas en pruebas tipo FRA aplicadas a transformadores y sus alcances en máquinas rotatorias de media tensión.
- ✓ Analizar conceptualmente las técnicas tradicionales de diagnóstico mecánico y dieléctrico en bobinas de máquinas rotatorias estableciendo un marco teórico comparativo con el método FRA para contextualizar sus ventajas y aplicabilidad.
- ✓ Plantear una batería de procedimientos de laboratorio, fallas inducidas y manipulación del estado del aislamiento en bobinas de máquinas rotatorias.
- ✓ Sintetizar uso del equipo FRAX101, que se encuentra en el Laboratorio de Alta Tensión, en bobinas de máquinas rotatorias. Además, interpretar las mediciones entregadas basadas en el uso con transformadores.
- ✓ Analizar la sensibilidades en la medición y determinar patrones de falla, en base a las pruebas del estado de bobinas de máquinas rotatorias para la evaluación de su estado mecánico y detección de fallas eléctricas.
- ✓ Analizar y seleccionar indicadores estadísticos adecuados para interpretación FRA mediante según los criterios establecidos en la referencia técnica Cigre TB 812.

## 1.3. Desglose general del estudio

- **Capítulo 1 - Introducción:** Presenta la problemática del diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias y la oportunidad de aplicar el FRA en este campo. Se establecen los objetivos del estudio y se justifica la necesidad de adaptar esta técnica desde transformadores hacia bobinas preformadas.
- **Capítulo 2 - Fundamentos del Análisis de Respuesta en Frecuencia:** Describe los principios teóricos del FRA, tipos de conexiones, instrumentación y referencias técnicas internacionales aplicables. Se analizan las diferencias entre la aplicación en transformadores y máquinas rotatorias, estableciendo el marco teórico para la adaptación metodológica.
- **Capítulo 3 - Características constructivas de bobinas preformadas:** Detalla la construcción de bobinas de máquinas rotatorias, incluyendo materiales aislantes, cinta semiconductor y procesos de fabricación. Se establece el modelo eléctrico equivalente y se identifican los mecanismos de falla característicos del sistema dieléctrico.
- **Capítulo 4 - Metodología experimental:** Describe el montaje experimental, las tres configuraciones de medición propuestas y los procedimientos de laboratorio. Se detallan las probetas utilizadas, la instrumentación FRAX101 y los protocolos de simulación de fallas implementados.

- **Capítulo 5 - Caracterización visual y análisis de sensibilidad:** Presenta el análisis cualitativo de las curvas FRA, definiendo zonas características para cada configuración. Se evalúa la sensibilidad de la medición ante variaciones de cables, conectores y condiciones de ensayo.
- **Capítulo 6 - Análisis de patrones de falla:** Documenta los patrones FRA obtenidos para cada tipo de falla inducida y analiza los resultados mediante indicadores estadísticos. Se establecen rangos de detección efectivos y se valida el indicador de severidad  $\Delta_{\max-\min}$ .
- **Capítulo 7 - Conclusiones:** Sintetiza los principales hallazgos, incluyendo la efectividad de cada configuración, los aportes metodológicos y las recomendaciones para implementación industrial. Se identifican limitaciones del estudio.

## **Parte I**

# **Fundamentos teóricos**

# Capítulo 2

## Fundamentos del Análisis de Respuesta en Frecuencia

### 2.1. Introducción al FRA en Máquinas Eléctricas

#### 2.1.1. Problemática bajo estudio

El estudio se enfoca en evaluar la sensibilidad de la medición FRA frente a variaciones del estado mecánico del aislamiento de bobinas preformadas de máquinas rotatorias e interpretar los patrones de anomalías macroscópicas presentes en sus componentes. Al considerar la variedad de pruebas disponibles para el diagnóstico de fallas en transformadores y máquinas rotatorias, se identifica la siguiente problemática a la cual se busca contribuir.

**En transformadores** La evaluación del estado mecánico en devanados presenta desafíos significativos debido a limitaciones en la inspección visual. En transformadores de aceite, el tanque sellado herméticamente impide el acceso directo a los bobinados sin comprometer los niveles de contaminación y humedad.

**En máquinas rotatorias** Las máquinas rotatorias presentan dificultades adicionales por la complejidad de su sistema dieléctrico y el acceso restringido a bobinados ubicados en espacios reducidos.

**Dificultades en la detección** Los ensayos eléctricos de rutina no detectan todas las variaciones del estado mecánico ni localizan el origen de las fallas. Las fallas no detectadas alteran el estado mecánico del aislamiento, generando corrientes de fuga no deseadas, temperaturas elevadas y vibraciones electromagnéticas fuera del rango de diseño. Estas condiciones aceleran el deterioro dieléctrico mediante mecanismos de degradación, reduciendo la vida útil del equipo[1, 2, 3].

### 2.1.2. Evolución desde transformadores a máquinas rotatorias

**Madurez de la técnica en transformadores** En la últimas dos décadas, el análisis FRA ha cobrado fuerza como técnica de detección temprana de fallas en transformadores de media y alta tensión. Las principales organizaciones de estandarización mundial (CIGRE, IEEE, IEC) han publicado guías técnicas y prácticas recomendadas específicamente orientadas a transformadores inmersos en aceite. El FRA se aplica rutinariamente en eventos críticos como transporte, montaje, pruebas de cortocircuito y eventos sísmicos, consolidándose como herramienta confiable de diagnóstico.

**Aplicación en máquinas rotatorias** En la investigación de fuentes bibliográficas se percibe menor cantidad de publicaciones relacionadas al FRA orientado a máquinas rotatorias, junto con que esta técnica aún no está considerada dentro de los ensayos de rutina. La complejidad del sistema dieléctrico de las máquinas rotatorias, que incluye factores como la posición del rotor, cinta semiconductor y configuraciones de ranuras específicas, presenta desafíos únicos para la aplicación directa de metodologías desarrolladas para transformadores [4, 5].

**Justificación del estudio** La adaptación de metodologías FRA hacia bobinas preformadas individuales aborda múltiples necesidades:

- Contribución a técnicas de control de calidad durante la fabricación para detectar defectos antes de la instalación.
- Caracterizar patrones de falla específicos de subsistemas dieléctricos.
- Aporte metodológico para futuras aplicaciones en sistemas completos de máquinas rotatorias.
- Bases metodológicas para futuras comparaciones con otras técnicas de diagnóstico dieléctrico, como son Surge test (Impulso de tensión), Pérdidas dieléctricas (Tangente  $\delta$ ), Resistencia de aislamiento y Capacitancia.

### 2.1.3. Ventajas y desventajas del FRA versus métodos tradicionales

La tabla 2.1 sintetiza las ventajas y limitaciones del FRA en relación con las técnicas tradicionales de diagnóstico mecánico transformadores [6]. Esta comparación evidencia que, si bien cada método presenta fortalezas específicas, el FRA se distingue por su superior repetibilidad y capacidad de interpretación, complementando eficazmente los métodos existentes en lugar de sustituirlos.

Técnica de diagnóstico	Ventajas	Desventajas
Corriente de magnetización (excitación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere, relativamente, equipamiento simple.</li> <li>• Puede detectar daño en el núcleo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es sensible a la deformación de devanados.</li> <li>• Medición altamente afectada por magnetismo residual en el núcleo.</li> </ul>
Impedancia de cortocircuito	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tradicional método actualmente especificado en normas de ensayos de cortocircuito.</li> <li>• Valores de referencia (datos de placa) disponibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy pequeños cambios pueden ser significantes.</li> <li>• Sensibilidad limitada para algunos modos de falla (mejor en deformación radial).</li> </ul>
Respuesta en frecuencia de perdidas de fuga (FRSL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ser más sensible que la medición de impedancia de dispersión.</li> <li>• Casi único ensayo para detectar, cortocircuito entre hebras paralelas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay normativa usada en la industria.</li> </ul>
Capacitancia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ser más sensible que la medición de impedancia de dispersión.</li> <li>• Equipo estandarizado disponible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad limitada para algunos modos de falla (mejor en deformación radial).</li> <li>• Otras capacitancias relevantes pueden no ser medibles (por ejemplo, entre serie/común/tap del devanado para auto-transformadores).</li> </ul>
Impulso de baja tensión (LVI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconocido como muy sensible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipamiento especial requerido.</li> <li>• Dificultad para lograr mismas condiciones de configuración del ensayo, (repetibilidad).</li> <li>• Dificultad de interpretación.</li> </ul>
Análisis de respuesta en frecuencia (FRA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor repetibilidad que el LVI, con la misma sensibilidad.</li> <li>• Más fácil de interpretar.</li> <li>• Incremento de numero de usuarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estandarización de la técnica, requerida.</li> <li>• Guía de interpretación, requerida.</li> </ul>

**Tabla 2.1:** Comparación de las principales técnicas eléctricas de diagnóstico para deformación de devanado en transformadores [6]

Considerando estas ventajas del FRA es necesario definir lo que implica que una medición sea Repetible y Reproducible.

**Repetibilidad** Capacidad del método FRA de obtener resultados consistentes cuando las mediciones se realizan bajo las mismas condiciones experimentales: mismo instrumento, mismo operador, mismo laboratorio y mismo intervalo de tiempo. Relacionado al FRA, esto implica mantener constantes la configuración de cables, posición de conectores, temperatura ambiente y en general la configuración experimental.

**Reproducibilidad** Capacidad del método FRA de obtener resultados equivalentes cuando las mediciones se realizan bajo condiciones experimentales diferentes: diferentes instrumentos, operadores, laboratorios o períodos de tiempo prolongados. Representa la robustez del método ante variaciones en las condiciones de ensayo.

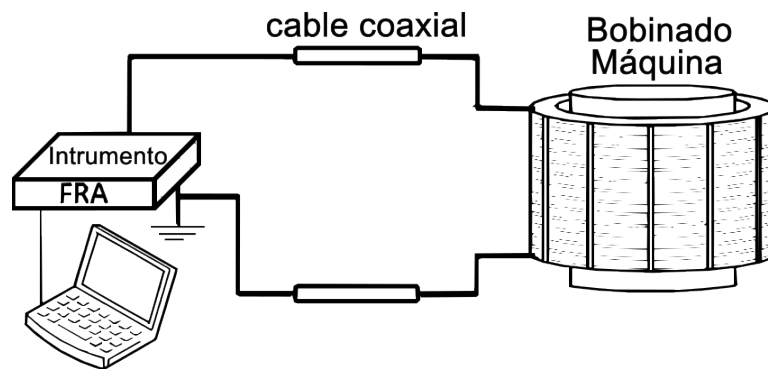
## 2.2. Principios Fundamentales del FRA

### 2.2.1. Definición y concepto “huella digital”

El análisis de respuesta en frecuencia FRA (*Frequency Response Analysis*) es un ensayo “off-line” aplicado a transformadores de media y alta tensión que permite reconocer cambios en la integridad de sus devanados. Consiste básicamente en la evaluación, en el dominio de la frecuencia, de la impedancia equivalente entre los extremos de cada bobina. La respuesta a un rango determinado de frecuencias es única para cada bobinado (huella digital), por lo que los cambios geométricos entre dos mediciones se verían reflejados en la comparación de ambas. Por tal razón es considerada como una poderosa herramienta en casos donde se presenten dudas o ambigüedades respecto al diagnóstico, ya que se puede identificar, grosso modo, la zona involucrada mediante patrones obtenidos empíricamente.

### 2.2.2. Esquema básico de medición

En la figura 2.1 se muestra, a modo de introducción al método, un esquema sencillo de la conexión para medir el FRA.



**Figura 2.1:** Esquema básico de medición  
Fuente: DOI: 10.1109/MEI.2016.7552374

El montaje general de la medición se caracteriza fundamentalmente de los siguientes elementos:

- **Instrumento de medición** .El cual envía y recibe las señales eléctricas que interactúan con la probeta ensayada. Se caracteriza por ser una señal de baja potencia, equipo pequeño y transportable fácilmente.
- **Conjunto de cables coaxiales**. Se utilizan cables coaxiales apantallados con el fin de tener una referencia equipotencial debido al aterrizamiento en ambos extremos de la medición. Esto evita reflexiones de onda que distorsionen la medición y permite atenuación controlada de la señal independiente de la longitud del cable.
- **Bobinado**. El elemento a medir es precisamente el bobinado de máquina eléctrica. La forma y configuraciones en medición de profundiza en las siguientes secciones.

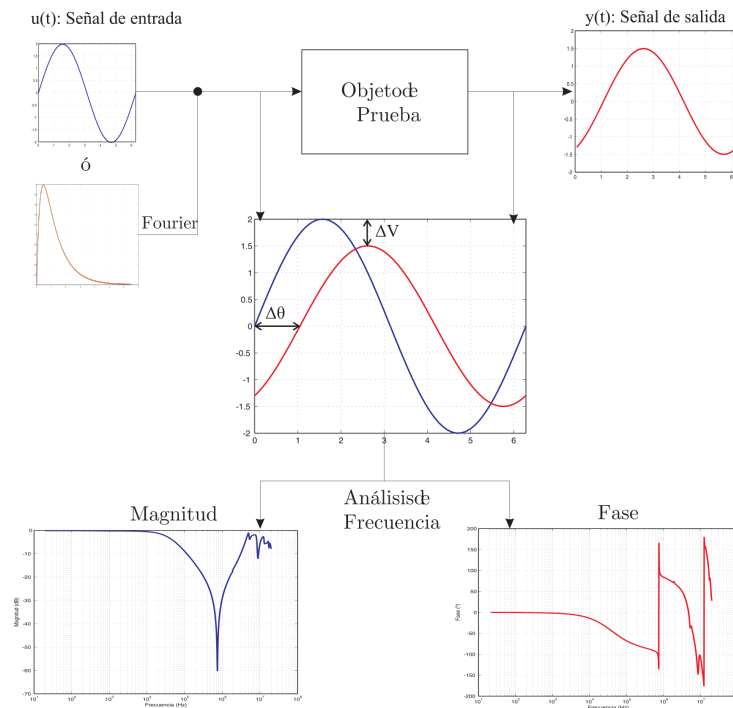
### 2.2.3. Modo de operación del ensayo

- Se inyecta una señal de bajo voltaje ( $\sim 10\text{-}20\text{V}$ ) y amplio espectro de frecuencia por un terminal de la probeta.
- La señal de excitación puede ser de tipo:

**IFRA** (*Impulse Frequency Response Analysis*), por lo que se requiere una descomposición de Fourier en la señal medida para su análisis.

**SFRA** (*Sweep Frequency Response Analysis*) o también llamado “barrido de frecuencias”. Esta forma es la más común en la actualidad.

- Se mide la respuesta en el otro extremo de la probeta con respecto a masa.
- La comparación entre entrada y salida se plasma en el diagrama de Bode, como se muestra en la figura 2.2, y representa en primera instancia una herramienta de comparación visual.
- La curva generada luego de la fabricación del transformador es llamada “huella digital”, y es el patrón de comparación para mediciones futuras.



**Figura 2.2:** Esquema principio básico FRA  
Fuente: Elaboración Propia

## 2.3. Instrumentación y accesorios de conexión

### 2.3.1. Parámetros de entrada y salida

- **Tensión generada**  $V_{gen}$  o  $V_{source}$ , hace referencia a la magnitud de tensión que entrega la fuente en el ensayo, ya sea por el método IFRA o SFRA.
- **Tensión de referencia**  $V_{ref}$ , es la magnitud de tensión medida en la entrada de la probeta.
- **Tensión de medición**  $V_{med}$  o  $V_{test}$ , es la magnitud de tensión medida en la salida probeta.

### 2.3.2. Instrumentación para ensayo SFRA

En la actualidad, la implementación del ensayo SFRA impera sobre el IFRA por su practicidad y preferencia entre usuarios del método FRA y fabricantes de instrumentos. Por tal motivo, a continuación se describen las principales características del instrumento de medición SFRA, tomando como referencia el modelo utilizado en las prácticas de laboratorio de la presente memoria.

- En el caso de este estudio se utiliza el equipo FRAX101 de marca Megger<sup>®</sup>, propiedad del LAT-USM que se muestra en la figura 2.4.
- Envía una señal sinusoidal de baja tensión ( $\sim 10V$ ) por defecto y frecuencia variable desde  $20Hz$  hasta  $2MHz$  generalmente (depende de la configuración previa).

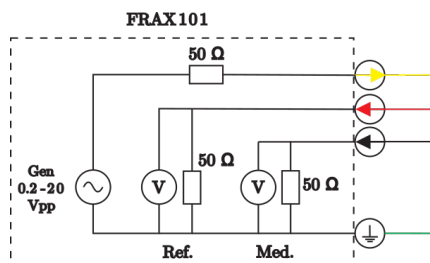


Figura 2.3: Esquema interno de instrumento FRA [7]



Figura 2.4: Equipo FRAX101 [7]

Las entradas y salidas más relevantes del instrumento son:

- **Generador:** Entrega la señal alterna en el punto de conexión de la bobina.
- **Referencia:** Mide señal de Generador, tensión  $V_{ref}$ .
- **Medición:** Mide la respuesta en el otro extremo de la bobina (u otro punto de interés), tensión  $V_{med}$ .
- **Tierra:** Cable de protección que debería ser el primero en ser conectado y último en ser removido, por motivos de seguridad y buenas prácticas.

### 2.3.3. Cables y conectores

Los cables usados para Generador, Referencia y Medición deben ser de tipo coaxial triple apantallado o superior, que es lo adecuado para el transporte de señales de alta frecuencia y baja potencia.

En la figura 2.5 se muestra el conductor interno, el cual porta la señal principal. El apantallamiento cumple la función de retorno para la señal principal, además minimiza el efecto del ruido electromagnético externo dirigiendo las corrientes inducidas hacia tierra por un camino de baja impedancia.

Una ventaja del cable coaxial es su impedancia constante o “característica” que permite una atenuación acotada de la señal independiente de la longitud del tramo.

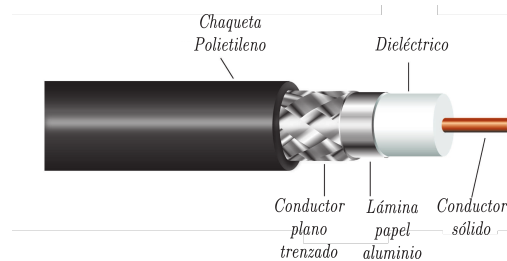


Figura 2.5: Cable coaxial [7]



Figura 2.6: Conductor plano trenzado [7]

La calidad de los terminales de conexión también es importante, por lo que se utilizan prensas tipo “C” para asegurar una baja resistencia de contacto, como se muestra en la figura 2.8.

En la práctica se recomienda que el largo de los cables coaxiales sea igual por lo menos para Referencia y Medición, y además que su impedancia característica ( $Z_c$ ) sea coherente con la del instrumento para que no existan reflexiones de onda,<sup>1</sup> por lo que generalmente la impedancia del instrumento y de los coaxiales es de  $50\Omega$ .

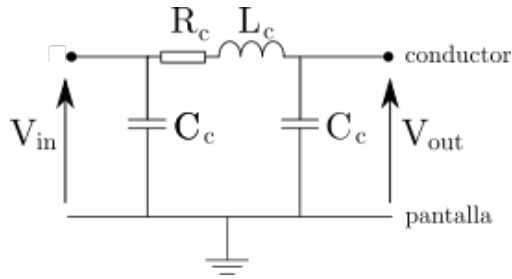
### 2.3.4. Aterrizamiento de pantallas

Las pantallas de los cables coaxiales se conectan por un extremo al punto de tierra de protección del instrumento y en el otro extremo al tanque del transformador (a lo largo del *bushing*) a través de conductores planos trenzados (figura 2.6 y 2.9), para así lograr un punto de referencia equipotencial<sup>2</sup>.

En la figura 2.10, donde  $S$  es Generador,  $R$  es Referencia y  $T$  es Medición, se muestra el esquema de conexión en un transformador, separando el camino que recorre la señal principal y los apantallamientos, teniendo en cuenta que cada cable se representa comúnmente mediante un circuito  $\pi$  como el que se muestra en la figura 2.7.

<sup>1</sup>Teoría de ondas viajeras - Apuntes Prof. Sergio Fuentes.

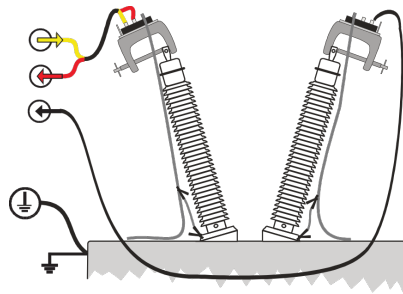
<sup>2</sup>Más detalle en norma [6]



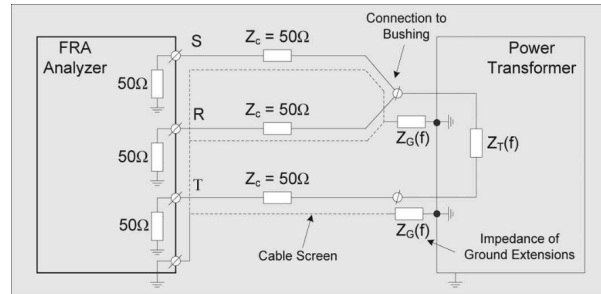
**Figura 2.7:** Circuito equivalente cable coaxial.  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.8:** Conector “C” original FRAX101 [7]



**Figura 2.9:** Conexión general en transformador [7].



**Figura 2.10:** Esquema de conexión: cables y su aterrizamiento [8]

## 2.4. Tipos de conexiones

### 2.4.1. Elección de puntos de medición

Los cuadripolos<sup>3</sup> o pares entrada/salida, pueden llegar a ser tantos como combinaciones de terminales sea posible. Sin embargo, debido a las simetrías constructivas que se pueden encontrar en un transformador sano, algunas configuraciones deberían entregar curvas muy similares. Por esta razón, y con el objetivo de optimizar la cantidad mediciones, existen tablas de acuerdo al grupo de conexión del transformador (Dyn o YnYn por ejemplo) en [9] que muestran los pares de terminales más importantes para la comparación y análisis, a modo de rutina sugerida de registro.

### 2.4.2. Configuración bobina simple

El ensayo de bobina simple o “end-to-end” se realiza entre los extremos de una bobina por fase de alguno de los lados del transformador (AT o BT), por lo que se conecta la fuente en un extremo y se mide la entrada  $V_{ref}$  y la salida  $V_{med}$  en el otro extremo, como se muestra en la figura 2.11.

En el caso particular de bobinas conectadas en estrella con acceso al neutro (Yn), la práctica más común es conectar la fuente en el terminal de fase. También es válido en la otra dirección, siempre y cuando se registre y repita dicha forma en futuros ensayos.[6].

<sup>3</sup>Ver anexo C.5

**Devanados no ensayados.** Se denominan devanados “no ensayados” a los que pertenecen al lado del transformador que no participa en la medición. Para el ejemplo de la figura 2.11 corresponden a los del lado AT en conexión delta.

**¿Vacío o cortocircuito?** . Se relaciona a la condición de los devanados “no ensayados”. Éstos pueden estar en cortocircuito (línea segmentada) o en vacío. Esta última es la forma más común. La conexión en cortocircuito también es válida siempre que se repita el ensayo de la misma manera en futuras ocasiones.

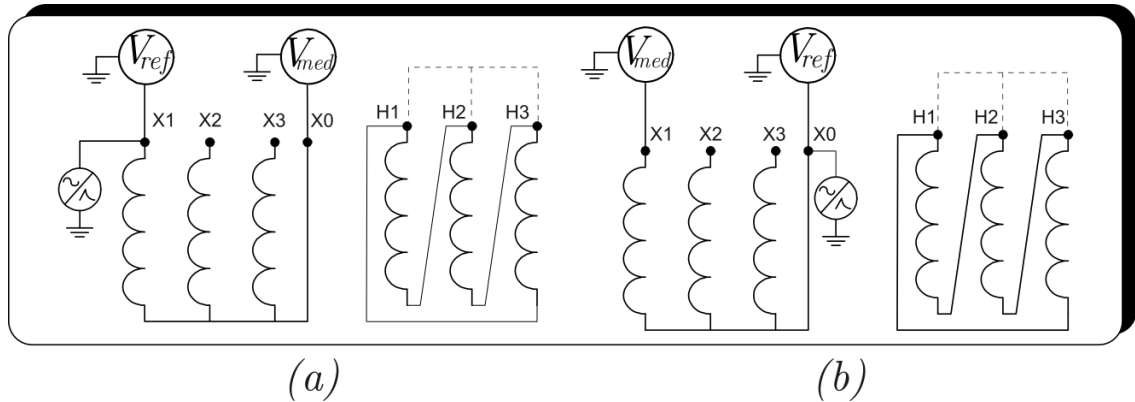


Figura 2.11: Conexión “end-to-end”, (a) fuente en la fase, (b) fuente en el neutro [6]

### 2.4.3. Configuración entre bobinas

La conexión entre bobinas puede ser capacitiva o inductiva. Consiste en medir entre los devanados de AT y BT de una misma fase.

- La forma **capacitiva** sostiene como parámetro principal el aislamiento entre bobinas, y se logra manteniendo todos los devanados “no ensayados” en vacío.
- En la forma **inductiva** se aterrizan ambos lados del transformador, creando un símil con el ensayo de relación de transformación en las cercanías de la frecuencia fundamental. Ambos casos se muestran en la figura 2.12.

**Limitación.** La conexión entre bobinas capacitiva no es aplicable en auto-transformadores. Ambos devanados comparten una porción común del bobinado y se encuentran eléctricamente vinculados. Esta característica constructiva impide establecer la configuración de terminales en vacío requerida para la medición capacitiva.

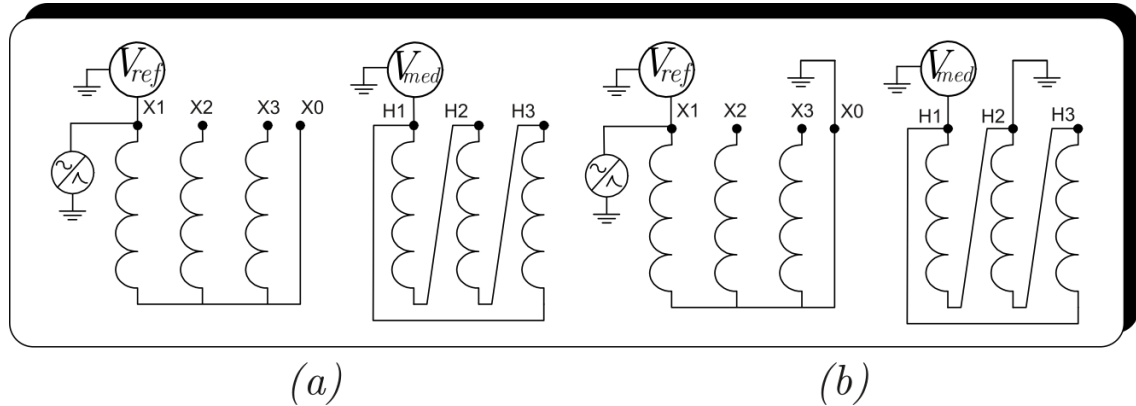


Figura 2.12: Conexión inter-devanados, (a) capacitiva, (b) inductiva [6]

## 2.5. Caracterización de mediciones en transformadores

### 2.5.1. Métodos de comparación

Existen tres formas de comparación en la evaluación del FRA.

- **Basada en el tiempo:** Se compara la curva medida con resultados previos de la misma unidad. Idealmente la curva patrón o “huella digital” debe ser medida cuando el transformador sale de la fábrica, sin embargo, otra medición anterior al control también es válida.
- **Basada en el tipo:** Se recurre a este método cuando desafortunadamente no se cuenta con una medición previa y se compara con la huella digital de otro transformador del mismo fabricante y tipo. Cabe destacar que los transformadores deben ser idénticos constructivamente.
- **Entre fases:** Una posibilidad es la comparación de las curvas FRA entre las fases del transformador, si no existen más antecedentes. Sin embargo la práctica más recomendada es con mediciones previas.

### 2.5.2. Parámetros de visualización

Según las experiencias revisadas en las referencias técnicas de la sección 2.6 se destaca un conjunto de parámetros básicos en el instrumento para la correcta visualización de las curvas, de los cuales se presentan sus valores recomendados en la tabla 2.2.

Parámetro	Cigré	IEEE	IEC	DL/T911
Resolución	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\uparrow</math> 200 p/dec<sup>a</sup> para frecuencias bajas</li> <li>• <math>\uparrow</math> 1000 p/dec sobre 2 MHz</li> </ul>	mínimo 200 p/dec	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mínimo 10 puntos bajo 100 Hz</li> <li>• mínimo 200 p/dec sobre 100 Hz</li> </ul>	
Rango dinámico	-100 a 20 dB	no menciona	-90 a 10 dB	
Impedancia med.	50Ω	no menciona	50Ω ± 2 %	
Ancho de banda	< 10 kHz - 1 MHz	20 Hz - > 2 MHz	20 Hz - 2 MHz	1 kHz - 1 MHz

<sup>a</sup>puntos por década, década= espaciamiento entre dos potencias de 10 en el gráfico logarítmico.

**Tabla 2.2:** Características recomendadas para visualización en instrumentos SFRA según normas [6, 10, 11, 12]

- **Resolución:** Hace referencia a la cantidad de puntos de muestreo en el intervalo de una década (eje de frecuencias). Se puede configurar mediante el *software* del FRAX101.
- **Rango dinámico:** Se define como el rango útil entre la máxima y mínima señal medible. Este parámetro tiene relación con el nivel de ruido del instrumento, ya que a mayor nivel de ruido disminuye el rango interpretable de la curva.
- **Impedancia de medición:** No hay indicio que la variación de la impedancia influya en la calidad de la medición. Solo se debe tener en cuenta que para la comparación entre ensayos debe ser la misma. Generalmente los equipos vienen con una impedancia de medición igual a 50 [Ω] (figura 2.3).
- **Ancho de banda:** Intervalo de frecuencia que el instrumento genera.

### 2.5.3. Relación de rangos de frecuencia con parámetros del bobinado

En la configuración *end-to-end* la curva obtenida en la medición SFRA suele ser dividida en cuatro zonas desde las bajas hasta las muy altas frecuencias.

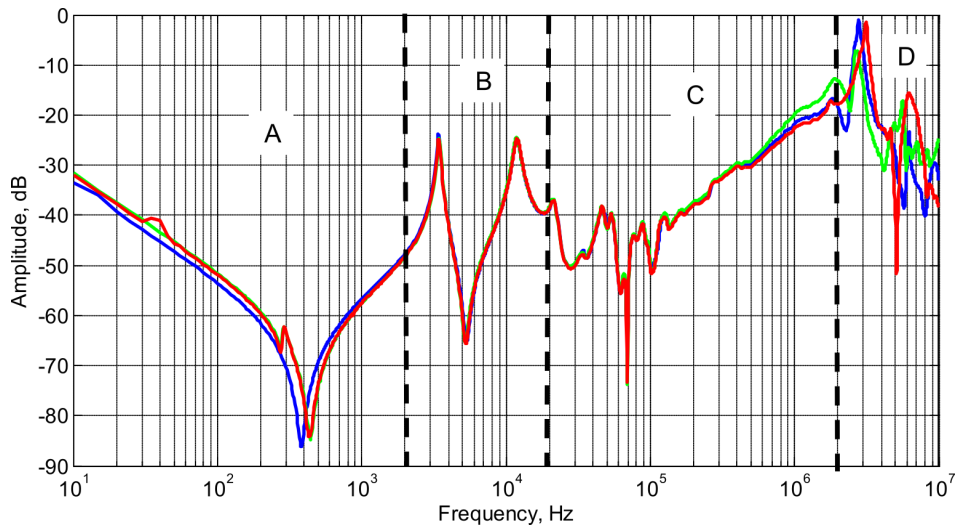
La división exacta de estas zonas depende del transformador bajo ensayo, de la calidad del sistema de medición [13] y de factores externos, por lo que en la literatura solo se mencionan rangos cualitativos que sin duda ayudan a estimar el origen de los posibles cambios mecánicos. Ver anexo C.

- **Bajas frecuencias:** En esta zona la red de dos puertos ensayada se comporta como un elemento inductivo. Los parámetros que predominan, es decir, por donde fluye la mayor parte de la energía, son: la inductancia de magnetización (núcleo) y la propia de los devanados.

Con respecto al diagrama de Bode, a medida que aumenta la frecuencia la magnitud disminuye. Se asimila al comportamiento de un filtro pasa-bajos y generalmente se considera hasta la primera resonancia.

- **Frecuencias medias:** Esta zona se caracteriza por tener la mayor cantidad de resonancias y anti-resonancias (máximos y mínimos locales), y se forman por la interacción constante de la inductancia de los devanados y la capacitancia serie distribuida del aislamiento. Es la zona más aprovechada para la interpretación y el diagnóstico.

- **Altas frecuencias:** El devanado bajo ensayo se comporta como un elemento capacitivo casi puro, ya que la energía fluye mayoritariamente por la capacidad serie y paralelo.
- **Muy altas frecuencias:** Esta zona se considera muy sensible a mínimos cambios en la configuración del instrumento de medición.



**Figura 2.13:** Rangos cualitativos de frecuencia para transformador [11] (A) Bajas frec. (B) Frec. medias (C) Altas frec. (D) Ruido.

En la tabla 2.3 se muestra un resumen de los rangos de frecuencias caracterizados en las distintas referencias técnicas.

Referencias técnicas	Rangos de Frecuencia			
	Rango 1	Rango 2	Rango 3	Rango 4
Chinese Standards DL/T911-2004	1 kHz a 100 kHz	100 kHz a 600 kHz	600 kHz a 1 MHz	-
CIGRÉ Standards WG A2/26	<10 kHz	10 kHz a 500 kHz	200 kHz a 1 MHz	-
IEEE Std C57.149-2012	20 Hz a 10 kHz	5 kHz a 100 kHz	50 kHz a 1 MHz	>1 MHz
IEC 60076-18 Ed.1	<2 kHz	2 kHz a 20 kHz	20 kHz a 1MHz	>1 MHz

**Tabla 2.3:** Rango de frecuencia de referencia para el análisis según normas [6, 10, 11, 12]

### 2.5.4. Factores que influyen en el rango de frecuencia interpretable

Los rangos de interpretación varían según las características del elemento medido, ya sea tamaño, potencia nominal, características de diseño, etc. Sin embargo las referencias técnicas identifican los principales factores que influyen en la medición.

**Altas frecuencias** El rango que presenta más incertidumbre en la medición es en las altas frecuencias. En este régimen, se forman puentes capacitivos de baja impedancia tanto en la probeta como en el sistema de medición, por lo que la señal medida tiende a tener muchas variaciones a pequeños cambios en la configuración. Lo descrito anteriormente se ejemplifica claramente en la figura 2.14, en donde el camino segmentado simboliza las capacitancias parásitas del aislamiento de los devanados y del aceite, los cuales desvían las corrientes desde el devanado a tierra. Por tales fenómenos, existe un rango en las altas frecuencias que no es útil para la interpretación.

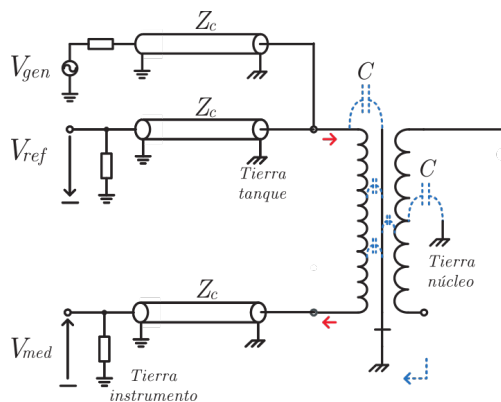


Figura 2.14: Corrientes de fuga en el transformador [14]

**Magnetización residual** Cada vez que se desenergiza un transformador el núcleo ferromagnético queda con una magnetización remanente. Este remanente generalmente no es conocido y depende del historial del transformador. Además, no es recomendable realizar medición FRA luego de una prueba de corriente continua o impulso, ya que el flujo remanente también se ve afectado. Dicho factor distorsiona la curva FRA en el rango de las bajas frecuencias donde los elementos inductivos predominan la respuesta. Sabiendo que el flujo remanente ha cambiado mediante el historial del transformador, se recomienda, previo al FRA, realizar un proceso para desmagnetizar la máquina.

**Calidad y forma de aterrizar pantallas** Como se muestra en la figura 2.10, los conductores que aterrizan las pantallas aportan una impedancia inductiva adicional al sistema de medición  $Z_G(f)$ . La calidad y la forma de aterrizar se relacionan directamente con la geometría y la disposición del conductor a lo largo del *bushing*, ya que al usar cable plano trenzado se atenúa el *efecto skin* y por lo tanto la impedancia. La disposición correcta del conductor en la conexión debe ser lo más tensa y cercana posible a lo largo del *bushing* para así aminsonar cualquier acoplamiento capacitivo que se pudiese producir en el *gap* cable-bushing, como se muestra en la figura 2.9. Además, cabe mencionar que el conductor que aterriza la pantalla no debe tener contacto con la parte activa del transformador[6].

**Otros factores** Algunos factores secundarios pero no menos importantes deben ser tomados en consideración y registrados para futuros ensayos:

- Variación de elementos adyacentes al devanado: existencia y largo del *bushing*, existencia y nivel de aceite.
- Posición del cambiador de tap.
- Voltaje aplicado en el ensayo.
- Temperatura y nivel de humedad en el aislamiento [15].
- Precisión del instrumento (rango dinámico).
- Posición del equipo de medición y cables [16].

Según los factores anteriormente descritos, se consideran los siguientes formas de identificar el rango interpretable en la medición:

- El límite inferior se define mediante el chequeo previo del flujo remanente en el núcleo del transformador.
- La **máxima frecuencia para la interpretación** se determina mediante la verificación de:
  - Ruido que aporta el instrumento (nivel de rango dinámico).
  - Verificación de sensibilidad de la configuración del ensayo. Esto se logra realizando dos o mas mediciones de la misma probeta, cambiando la ubicación del instrumento, la disposición de los cables o realizando otros cambios que de configuración que al comparar las curvas de indicios de variaciones visibles en los rangos de altas frecuencias.

Se debe tener en cuenta que un transformador de mayor tensión (lado de AT) tendrá menor rango de frecuencias útil para la interpretación ya que su *bushing* será de mayor longitud, y por ende, la longitud de los conductores que aterrizan las pantallas.

## 2.6. Normativa y referencias técnicas

- **2005** La primera publicación validada a nivel mundial con la intención de regular esta práctica fue en China [12], en la cual se incluye el principio de funcionamiento del método (SFRA), instrumentación requerida, configuración del ensayo y análisis de los resultados.

- **2008** Cigré publicó la investigación realizada por su grupo de trabajo WG A2/26 en relación al FRA [6].

Su aporte fue la comparación de las distintas formas de aplicar esta técnica, como por ejemplo: tipo de ensayo (IFRA-SFRA), tipos de conexión, influencia del largo de cables, caracterización de fallas con sus anchos de banda respectivos, determinación de la frecuencia máxima válida para la interpretación, entre otros.

Todo esto con el fin de obtener la mejor manera de aplicar el FRA para una interpretación más objetiva.

- **2012** El primer borrador se publicó el 2008 y la última edición el 2012 [10]. Sin embargo la norma esta en calidad de “borrador”.

En el 2002 IEEE formó un grupo de trabajo con el objetivo de crear una guía en torno a la práctica del FRA para transformadores inmersos en aceite. Presenta procedimientos y análisis de resultados mediante casos de estudio.

Recomienda el uso de tres cables de prueba: Fuente, Referencia y Medición (esta práctica en concordancia con la comunidad científica y los fabricantes de instrumentación para SFRA).

A diferencia de la norma China, la norma IEEE plantea más tipos de ensayos, mayor ancho de banda, y zonas de análisis no solo orientados hacia devanados, sino que también hacia el núcleo y aislamiento entre bobinados de baja tensión y alta tensión.

- **2012** IEC publicó el borrador de su estándar orientado a la medición de la respuesta en frecuencia en transformadores [11]. Este estándar se centra principalmente en prácticas recomendadas. Presenta un amplio espectro de casos de estudio y sus curvas características.

- **2020** Cigré Technical Brochure 812 constituye una referencia técnica que compila de manera exhaustiva el estado del arte en el entendimiento del FRA en transformadores. Este documento describe los factores que influyen en la medición, documenta casos de estudio y referencia la literatura especializada. Asimismo, explica y aplica diversos índices numéricos para la interpretación de resultados, además de detallar las metodologías actuales para el manejo y procesamiento de los datos obtenidos mediante esta técnica de medición.

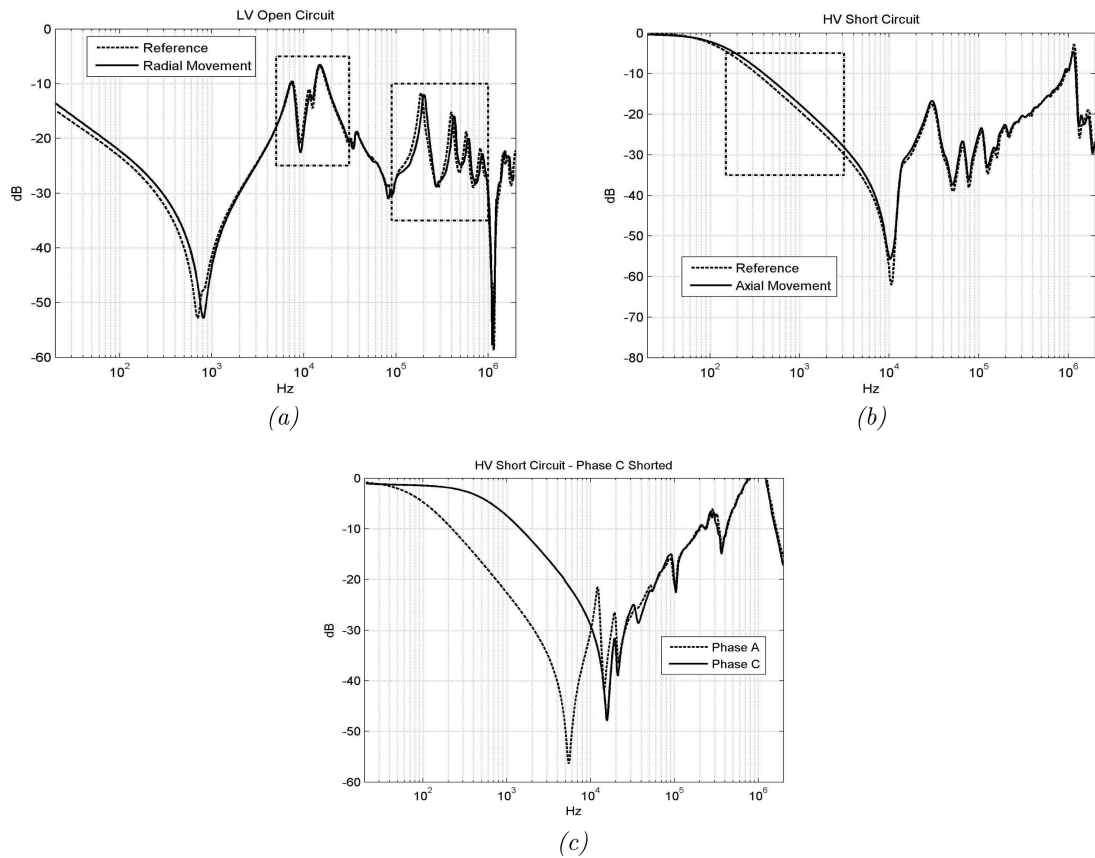
- **2024** La norma IEEE se actualiza incorporando casos de estudio adicionales con sus curvas de falla características. Además, incluye una nueva sección que analiza la influencia del aterrizamiento de las pantallas de los cables de medición en las distintas etapas del circuito de medición.

### 2.7. Metodología de análisis cualitativo e inspección visual

La observación de las curvas FRA es el primer acercamiento a la interpretación. En general, la desviación entre curvas se clasifica en tres aspectos:

- Variación en el numero de resonancias.
- Variación de posición de las resonancias (desplazamiento vertical y horizontal).
- Cambio de forma general en la respuesta.

Estas variaciones se analizan de forma separada en cada rango de frecuencias presentadas en la tabla 2.3. Sin embargo, mientras más tipos de anomalías se presenten a la vez, las variaciones en las curvas también lo harán simultáneamente, por lo tanto presenta un mayor desafío para el análisis. Mientras aumenta el nivel de gravedad de la deformación o el desplazamiento del devanado también aumenta el pronunciamiento de la desviación, ya sea en magnitud (*dB*) como en el rango de frecuencias involucrado. En la figura 2.15 se presentan ejemplos de casos reales en donde el desplazamiento de las resonancias caracteriza a las fallas.



**Figura 2.15:** Ejemplos mediciones FRA (asumiendo que no hay otra falla existente) [10] (a) Movimiento radial (b) Movimiento axial (c) Cortocircuito en una vuelta Fase C.

## 2.8. Metodologías y enfoques de análisis cuantitativo

### 2.8.1. Indicadores numéricos basados en frecuencias de resonancia

Los indicadores basados en frecuencias de resonancia extraen información de los puntos de máximos (resonancias) y mínimos (anti-resonancias) presentes en las gráficas FRA. Esta metodología identifica automáticamente estos puntos característicos y los utiliza para calcular índices numéricos específicos como el IAD (Index of Amplitude Deviation) y el IFD (Index of Frequency Deviation). Los algoritmos analizan tanto las variaciones en amplitud como en frecuencia de estos puntos críticos entre mediciones de referencia y posteriores. Sin embargo, la precisión depende significativamente de la exactitud en la identificación automática de los puntos de resonancia y anti-resonancia.

### 2.8.2. Indicadores numéricos basados en ajuste vectorial de mediciones

El método de ajuste vectorial (vector fitting) aproxima las mediciones FRA mediante funciones racionales que representan la función de transferencia del sistema en el plano de Laplace, extrayendo polos y coeficientes a través de un proceso matemático iterativo (Black box model). Este proceso permite calcular índices como el SDP (Sum of absolute Displacement of Poles) y el FI (Faulted-Intact relation) basados en la ubicación de polos y coeficientes del numerador y denominador de la función racional ajustada. Sin embargo, el método presenta limitaciones importantes como la sensibilidad a la asignación de polos iniciales, dependencia del orden de la función racional y variabilidad en los resultados según el número de iteraciones.

### 2.8.3. Algoritmos basados en modelos de caja blanca

Los modelos de caja blanca (White Box Models) incluyen dos enfoques principales: modelos de circuitos que describen explícitamente la topología de inductancias, capacitancias y resistencias, y modelado por elementos finitos (FEM) que reproduce numéricamente el comportamiento electromagnético. Estos métodos permiten extraer parámetros físicos directamente de las mediciones y comparar valores numéricos con mediciones de referencia, sin requerir conocimiento detallado de la geometría interna. Los modelos de circuito proporcionan información sobre el comportamiento físico interno útil para discriminar el tipo y ubicación de fallas, mientras que los modelos FEM pueden simular cambios mecánicos difíciles de modelar con circuitos equivalentes. La limitación principal es el requerimiento de tiempo computacional y memoria significativos para cálculos 3D.

### 2.8.4. Algoritmos basados en inteligencia artificial

Los métodos de inteligencia artificial incluyen árboles de decisión, algoritmos genéticos, lógica difusa y redes neuronales para la interpretación automatizada de resultados FRA. Los árboles de decisión utilizan criterios lógicos secuenciales para clasificar el estado de los devanados, mientras que las redes neuronales procesan múltiples índices numéricos simultáneamente para detectar patrones de falla complejos. Estos algoritmos permiten la clasificación automática de tipos de falla y evaluación de severidad mediante aprendizaje supervisado utilizando bases de datos de casos conocidos. La principal ventaja es la capa-

cidad de manejar la complejidad inherente de la interpretación FRA y establecer criterios objetivos de diagnóstico. Sin embargo, requieren extensas bases de datos de entrenamiento y validación para garantizar la generalización estadística adecuada.

### 2.8.5. Indicadores estadísticos

Los indicadores numéricos cuantifican matemáticamente las diferencias entre gráficas de respuesta en frecuencia, extrayendo un valor único mediante ecuaciones que operan tanto en la totalidad del ancho de banda como en diferentes sub-bandas de frecuencia. La mayoría de indicadores se calculan usando la medición de amplitud, pudiendo utilizar valores originales o en escala dB, aunque no existe consenso sobre las ventajas de cada enfoque. Estos índices son de fácil implementación al calcularse directamente sin procesamiento adicional. Para casos en donde no existe variación con la medición de referencia, todos los indicadores numéricos resultan cero (indicando coincidencia perfecta), excepto CC y CCF que resultan en uno, los cuales pueden normalizarse como  $1-CC$  y  $1-CCF$  para homogeneizar el criterio de evaluación. Este método permite una evaluación cuantitativa objetiva del estado del bobinado basada en el análisis comparativo de su respuesta en frecuencia [17]. En la tabla 2.4 se muestran algunos de los indicadores estadísticos más utilizados, aunque en la referencia Cigré TB 812 se documenta 35. Se tiene que  $X(f)$  e  $Y(f)$  son los vectores de magnitud de cada unas de las mediciones. Generalmente se considera  $X$  como la medición de referencia e  $Y$  como la de comparación.

Indicador Estadístico	Abrev.	Fórmula	Rango
Standardized Difference Area	SDA	$\frac{\int  Y(f) - X(f)  df}{\int  X(f)  df}$	$[0, \infty)$
Cross Correlation Factor	CCF	$\frac{\sum_{i=1}^N (X(i) - \bar{X})(Y(i) - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X(i) - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y(i) - \bar{Y})^2}}$	$[-1, 1]$
Absolute Sum of Logarithmic Error	ASLE	$\frac{\sum_{i=1}^N  20 \log_{10} Y(i) - 20 \log_{10} X(i) }{N}$	$[0, \infty)$
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{ Y(i) - X(i) }{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  X(i) } \right]^2}$	$[0, \infty)$
Correlation Coefficient	CC	$\frac{\sum_{i=1}^N X(i)Y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X(i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N Y(i)^2}}$	$[-1, 1]$
Minimum Maximum	MM	$\frac{\sum_{i=1}^N \min(Y(i), X(i))}{\sum_{i=1}^N \max(Y(i), X(i))}$	$[0, 1]$
Standard Deviation	SD	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y(i) - X(i))^2}{N-1}}$	$[0, \infty)$
Sum Squared Error	SSE	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y(i) - X(i))^2$	$[0, \infty)$
Sum Squared Min Max Ratio Error	SSMMRE	$\frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\max(X(i), Y(i))}{\min(X(i), Y(i))} - 1 \right)}{N}$	$[0, \infty)$
Stochastic Spectrum Deviation	SSD	$\frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left  \frac{Y(i) - X(i)}{X(i)} \right $	$[0, \infty)$
Comparative Standard Deviation	CSD	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Y(i) - \bar{Y}) - (X(i) - \bar{X})]^2}{N-1}}$	$[0, \infty)$
Sum of Error	SE	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y(i) - X(i))$	$(-\infty, \infty)$
Least Squared Error	LSE	$\frac{\sum_{i=1}^N (X(i) - \bar{X})(Y(i) - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (X(i) - \bar{X})^2}$	$(-\infty, \infty)$
Jaccard Distance	JD	$\frac{\sum_{i=1}^N (X(i) - Y(i))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X(i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N Y(i)^2 - \sum_{i=1}^N X(i)Y(i)}}$	$[0, \infty)$

Tabla 2.4: Indicadores estadísticos para análisis de respuesta en frecuencia [17]

Respecto a la comparación del indicador CCF, que equivale al factor de correlación  $\rho$  de *Pearson*, la documentación consultada considera los siguientes criterios de aceptación.

$\rho$	Evaluación
0,98-1	Bueno
0,96-0,97	Marginal
< 0,96	Investigar

**Tabla 2.5:** Criterio de decisión, comparación con medición previa [18]

$\rho$	Evaluación
0,95-1	Bueno
0,90-0,94	Marginal
< 0,90	Investigar

**Tabla 2.6:** Criterio de decisión, comparación con otra unidad o entre fases [18]

El estándar chino ha definido un criterio para detectar deformación dentro del transformador basado en el factor de coeficiente de correlación (CCF) [12]. En este estándar, se han descrito tres rangos de frecuencia de la siguiente manera:

- LF: 1-100 kHz
- MF: 100-600 kHz
- HF: 600-1 MHz

La interpretación se basa en un factor relativo,  $R_{xy}$ , que se define usando:

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 & \text{si } (1 - CCF) < 10^{-10} \\ -\log_{10}(1 - CCF) & \text{otros casos} \end{cases} \quad (2.1)$$

donde  $CCF$  se calcula usando la ecuación indicada en la tabla 2.4. La tabla 2.7 proporciona los límites basados en  $R_{LF}$ ,  $R_{MF}$ , y  $R_{HF}$ , que son  $R_{xy}$  en el rango LF, MF, y HF, respectivamente.

Grado de deformación del devanado	Límites para el factor relativo $R_{xy}$
Deformación severa	$R_{LF} < 0,6$
Deformación obvia	$0,6 \leq R_{LF} < 1$ o $R_{MF} < 0,6$
Deformación leve	$1,0 \leq R_{LF} < 2,0$ o $0,6 \leq R_{MF} < 1,0$
Devanado normal	$2,0 \leq R_{LF}$ , $1,0 \leq R_{MF}$ y $0,6 \leq R_{HF}$

**Tabla 2.7:** Nivel de deformaciones basado en  $R_{xy}$  [12]

A continuación se describen algunas ventajas y desventajas de los indicadores principalmente referenciados en Cigré TB 812:

Abrev.	Ventajas	Desventajas
CC-CCF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampliamente utilizado en la industria.</li> <li>• Forma parte de estándares establecidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insensible cuando la gráfica se mueve solo verticalmente sin cambios en la forma.</li> <li>• Menos sensibles que otros indicadores.</li> </ul>
SSE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy sensible a grandes cambios de amplitud alrededor de máximos y mínimos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No posee límites acotados de referencia.</li> </ul>
ASLE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor rendimiento entre todos los indicadores evaluados.</li> <li>• Supera los defectos de otros indicadores.</li> <li>• 90 % de precisión para detectar fallas comparando diferentes fases.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No posee límite superior acotado.</li> </ul>
SSRE-SSMMRE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derivados de SSE para mejorar el análisis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja sensibilidad a variaciones alrededor de los puntos de valle.</li> </ul>
ED	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede usarse simultáneamente con CC para casos donde CC no detecta fallas.</li> <li>• Útil para calcular en diferentes rangos de frecuencia.</li> </ul>	–
$\sigma$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena inmunidad al ruido.</li> <li>• Es cero para diferencias de amplitud constante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comportamiento invertido en algunos casos.</li> </ul>
SD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede detectar fallas axiales y radiales en transformadores grandes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No posee límite superior acotado.</li> </ul>
E	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena inmunidad al ruido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No muestra tendencia clara para deformación radial.</li> </ul>

**Tabla 2.8:** Ventajas y desventajas de los principales indicadores documentados [17]

### 2.8.6. Método de ventanas deslizantes

Esta metodología aborda la limitación fundamental de las bandas de frecuencia fijas mediante el escaneo completo de la respuesta en frecuencia utilizando una ventana de ancho específico que se desplaza progresivamente desde la frecuencia inicial hasta la final con pasos definidos ( $W_s$ ), como representa la figura 2.16. El índice *SDD* (Standard Deviation of Difference) se calcula en cada posición de la ventana, generando un vector de valores que representa la desviación entre las curvas de respuesta en frecuencia como función continua de la frecuencia. La principal ventaja radica en eliminar la dependencia de límites de frecuencia predeterminados, ya que diferentes transformadores requieren rangos específicos según su tamaño físico y características de los devanados. Este enfoque ha demostrado exitosamente la detección de deformaciones en nueve casos de transformadores seleccionados de la base de datos de Cigré TB 812, permitiendo establecer criterios objetivos para la evaluación cuantitativa de fallas mecánicas, aunque el método se considera tentativo debido al número limitado de transformadores analizados.

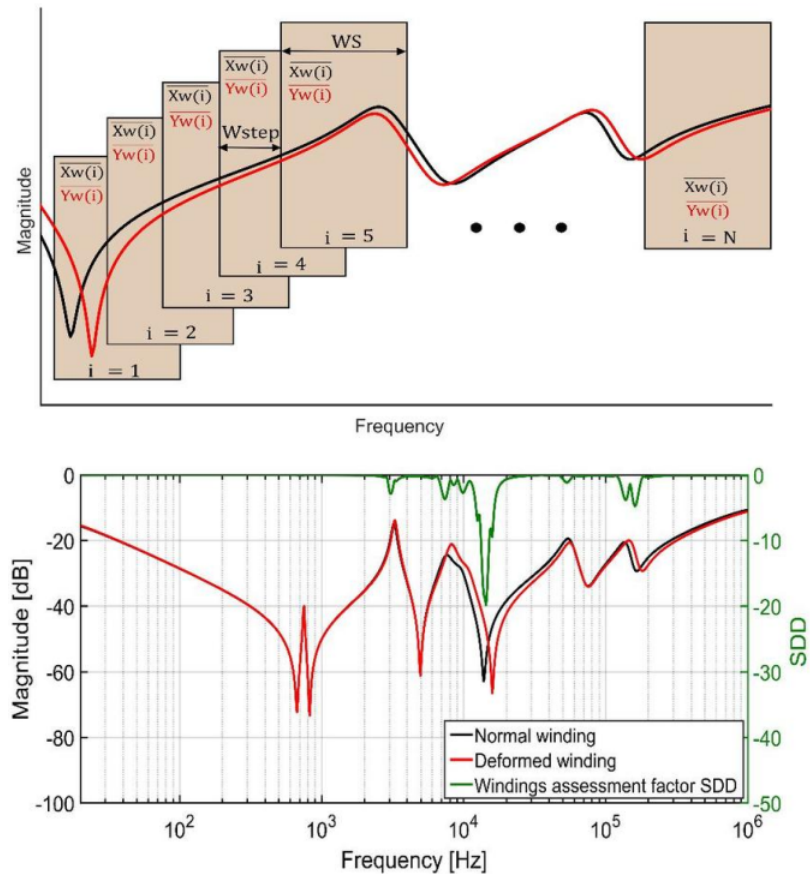


Figura 2.16: Representación gráfica del método de ventanas deslizantes [17]

# Capítulo 3

## Características constructivas de bobinas preformadas

### 3.1. Características constructivas de bobinas preformadas

#### 3.1.1. Introducción

El estator de una máquina rotatoria de corriente alterna está compuesto principalmente de tres partes: núcleo de hierro que confina el campo magnético, conductor de cobre que transporta la corriente inducida por el campo magnético y aislamiento que tiene como primer propósito evitar los cortocircuitos entre las partes activas. La vida útil de una máquina se limita a la de su aislamiento, ya que es mucho menos resistente que el hierro y el cobre a los esfuerzos que implica su ciclo de trabajo

Los materiales aislantes se seleccionan de acuerdo a: capacidad de soportar adecuadamente los esfuerzos de tipo eléctrico, mecánico y térmico; resistencia a factores ambientales; costos de fabricación, entre otros. Se desea una buena cohesión entre ellos y que en conjunto cumplan con dichas propiedades. Las mejoras en los procesos de fabricación han permitido incorporar los aislantes a la bobina de forma más homogénea, minimizando considerablemente la cantidad de agentes contaminantes y vacuolas (micro-volúmenes de aire), que son iniciadores y catalizadores del proceso de ruptura dieléctrica.

Conocer la distribución de los materiales que componen la bobina y los mecanismos de falla asociados es un requisito necesario en el estudio y aplicación de cualquier técnica de diagnóstico. Por tal motivo, se presenta una síntesis de los aspectos constructivos más relevantes en bobinas de máquinas rotatorias.

#### 3.1.2. Materiales y técnicas de fabricación

En el inicio de la industria (fines del siglo XIX), los aislantes eléctricos eran en su mayoría de origen natural y consistían en una combinación de fibras (papel, tela, etc.) y resina. Esta última se adhería a la fibra, que rodeaba las hebras de cobre, mediante la aplicación de un solvente y un proceso de secado, dando como resultado un aislante duro, resistente pero térmicamente limitado.

Durante la Primera Guerra Mundial se registran las primeras mejoras. Combinando

láminas de mica con resina asfáltica se aumenta la resistencia térmica y la potencia de las máquinas. Comúnmente, las láminas de mica se colocaban a mano, rodeando todo el bobinado y cubiertas con cinta de algodón. Luego se aplicaba calor y vacío durante varias horas para sacar toda la humedad y el aire. Finalmente, manteniendo el vacío se impregnaba la resina asfáltica caliente, la cual rellenaba los espacios entre las láminas de mica. Esta técnica es llamada VPI (*Vacuum Pressure Impregnated*), actualmente se ha perfeccionado y continúa vigente.

Luego de los aislantes de origen natural surgieron otros sintéticos que ayudaron principalmente a mejorar la homogeneidad y las propiedades térmicas y mecánicas del bobinado. Sin embargo pasaron varias décadas para que el desarrollo se estabilizara en los materiales que actualmente son básicos e indispensables: cintas de mica, resistentes a las descargas parciales y al crecimiento de árboles eléctricos; fibra de vidrio que se combina con el aislante (en formato cinta “tape”) para dar mayor resistencia mecánica; resinas sintéticas (epóxica o poliéster), con capacidad de impregnar y llenar más espacios de aire que otros impregnables naturales, uniendo fuertemente las cintas de mica y logrando buenas propiedades térmicas.

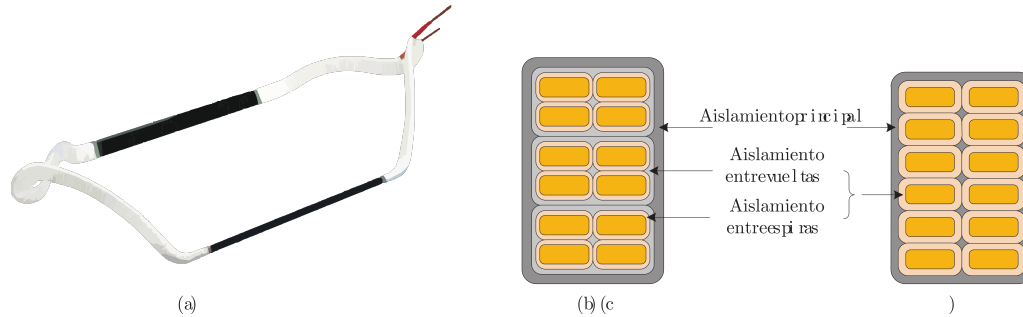
A continuación se describen brevemente las técnicas de impregnación de bobinas:

- **VPI (bobina individual):** Se colocan cintas de mica con un contenido de resina entre 5-15 % del volumen. Luego del proceso de secado se ponen en una cámara de vacío para remover el aire. La cámara es inundada con el material impregnable sometido a alta presión. Finalmente se remueve el exceso de resina de las bobinas y se curan mediante aplicación de temperatura.
- **Global VPI:** El estator completo es impregnado luego de insertar las bobinas en las ranuras del núcleo. En este caso también se llenan los espacios de aire de las ranuras.
- **Resin Rich:** Las cintas de mica se colocan con más resina de lo normal, 40-45 % del volumen, bajo presión. Luego se le aplica calor para que la resina sea absorbida. Finalmente se procede al curado.

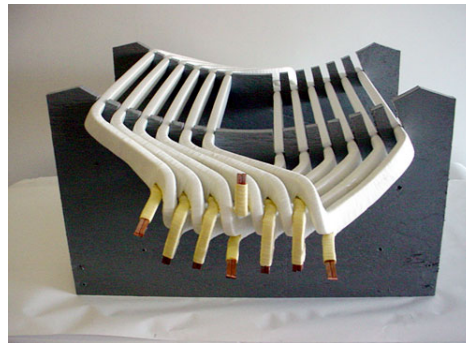
En general el proceso de curado para ambas técnicas se realiza al interior de la ranura para llenar todos los espacios de aire y mantener la bobina fija.

### 3.1.3. Subsistemas dieléctricos

La construcción más típica del estator en máquinas de mediana potencia es mediante bobinas preformadas (*form-wound coils*) (figura 3.1), las cuales están formadas de hebras de pequeña sección de cobre trefilado. Éstas son prensadas y debidamente aisladas mediante alguno de los procesos anteriormente descritos, para alojar de forma exacta en su ranura correspondiente. La figura 3.3 muestra la disposición de la bobina en la ranura y las capas dieléctricas que la componen.



**Figura 3.1:** (a) Bobina preformada, (b) Sección de bobina considerando aislamiento hebra y multi-vueltas, (c) considerando aislamiento solo hebras [19]



**Figura 3.2:** Distribución de bobinas preformadas en un núcleo.  
Fuente: [https://www.universalcoil.com/products\\_dipbake.html](https://www.universalcoil.com/products_dipbake.html)

Si se observa la figura 3.1(a), se distinguen a simple vista dos partes: la que va inserta en la ranura (color negro) y la que está fuera de la ranura (color blanco) llamada cabezal de bobina (en inglés “*overhang*”).

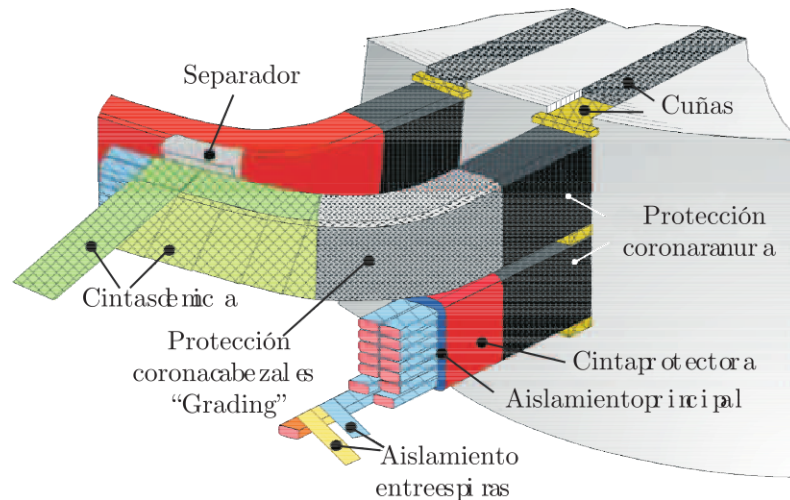
- **Protección cabezales de bobina:** Por teoría de campos es sabido que en geometrías irregulares la concentración de campo eléctrico es más elevada (efecto punta), por lo que la zona del *overhang* más cercana al núcleo se protege mediante un graduador de campo o “*grading*”, que consiste en una cinta (o pintura) de resistividad controlada (o comúnmente llamada “semiconductora”), la cual disminuye la actividad corona en dicha zona, evitando daños superficiales del aislamiento.
- **Protección ranura:** Su función es proteger el aislamiento principal de las descargas corona, mejorando el contacto entre la bobina y la ranura. Es una cinta de baja resistencia que controla la diferencia de potencial en los “gaps” de aire mitigando las descargas corona. No puede ser una resistencia muy baja, ya que puede cortocircuitar las láminas del núcleo.

La subdivisión en hebras de cobre aisladas entre sí, mejora las propiedades mecánicas dando flexibilidad y eléctricamente reduce el efecto “*skin*” y las corrientes de fuga.

- **Aislamiento entre hebras y/o vueltas:** La configuración más usada es la de la figura 3.1(c) donde cada hebra o espira es aislada individualmente generalmente con delgadas cintas de mica o una película de algún barniz dieléctrico. Este aislamiento está

sometido a tensiones que van desde las decenas hasta los cientos de volts dependiendo del tamaño de la máquina. Al ser la capa más cercana al conductor, es la más exigida térmicamente.

- **Aislamiento principal:** Toda la bobina es envuelta en un aislamiento general que separa el conjunto de hebras del núcleo ferromagnético. Típicamente está hecho de cintas de mica combinadas con un material impregnable adherido mediante uno de los métodos mencionados anteriormente. Está sometido a esfuerzos eléctricos derivados de la tensión fase-neutro de la máquina.



**Figura 3.3:** Distribución del sistema de aislamiento de máquinas rotatorias  
Fuente: DOI: 10.1109/57.995396

Cabe destacar que tanto aislamientos internos como externos deben ser capaces de resistir esfuerzos eléctricos originados por sobrecargas momentáneas y/o fenómenos transitorios. Sin embargo, esto sumado al uso normal de la máquina y agentes contaminantes, produce la inevitable degradación del aislamiento.

Cada ranura puede alojar una o dos bobinas, dependiendo del diseño del estator. Las cuñas que se muestran en la figura 3.3 ayudan a la estabilidad mecánica del devanado soportando vibraciones originadas por las fuerzas electromagnéticas.

## 3.2. Degradación del aislamiento

### 3.2.1. Mecanismos de degradación

A pesar de que existen varios factores influyen en la degradación del aislamiento de máquinas rotatorias, se pueden agrupar en cuatro grandes grupos. Estos se describen a continuación y corresponden al conjunto de factores comúnmente llamados “TEAM” (Térmico, Eléctrico, Ambiental y Mecánico).

- **Térmico:** El esfuerzo térmico es originado por la temperatura de operación alcanzada por la máquina debido principalmente a las pérdidas por conducción del cobre

( $IR^2$ ), entre otras. Si la temperatura sobrepasa los umbrales soportados por el aislamiento ocurrirán reacciones químicas que cambian paulatinamente las propiedades de los materiales. Se puede llegar a la fractura de éstos y, en el caso de las bobinas preformadas, las cintas de mica del aislamiento principal comenzaran a despegarse a causa del debilitamiento del material impregnable. Formas de evitar las temperaturas nocivas en la maquina es mediante canales de ventilación, ya sea natural (aire) o forzada, a través de agua e incluso hidrógeno en máquinas de gran potencia.

- Eléctrico:** La degradación del aislamiento a causa de sollicitación de campo eléctrico es efectiva si descargas parciales están presentes. Generalmente estas descargas son más comunes en máquinas con tensión de servicio mayor a 1000 (V). Las descargas parciales, básicamente, son pequeños cortocircuitos generados en micro-volumenes de aire, ya sea en el interior o superficie del dieléctrico. Las descargas parciales en el largo plazo erosionan el material aislante hasta llegar a la ruptura transversal en el peor de los casos. Por otro lado, en el corto plazo generan corrientes de fuga en la bobina que tienden al aumento de la temperatura y en general al envejecimiento. En la figura 3.4 se muestran las posibles fuentes de descargas parciales en la bobina. Varias de estas pueden ser originadas en el proceso de fabricación, por lo que los esfuerzos eléctricos siempre son un factor de degradación a considerar.

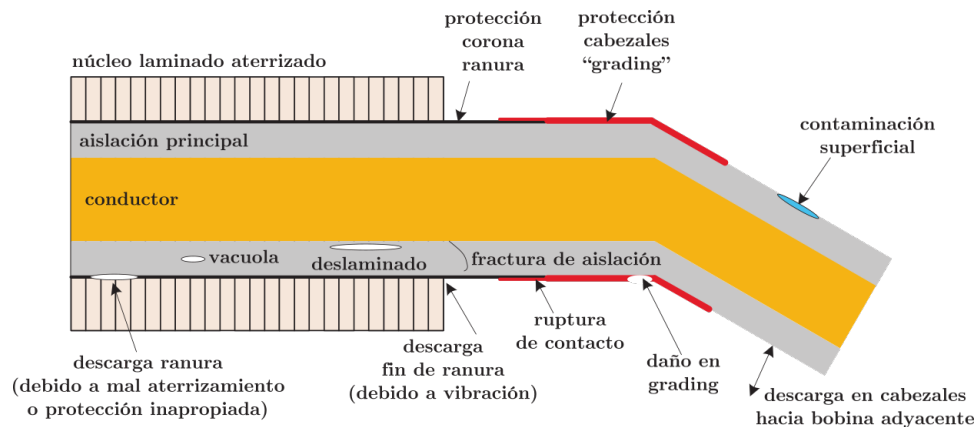


Figura 3.4: Esquema de fuentes de descargas parciales en máquinas rotatorias [19]

- Ambiental:** Los factores del ambiente en que trabaja la máquina influyen en su envejecimiento. Los más importantes son: humedad relativa del aire y condensada, contaminación por aceites lubricantes, contaminación por partículas (como polvo), salinidad del aire, entre otros. Estos factores ambientales actúan en combinación con otros esfuerzos para afectar directamente en la degradación del aislante. Por ejemplo, mediante la contaminación con suciedad o salinidad la sollicitud de campo eléctrico origina descargas superficiales.
- Mecánico:** La degradación del aislamiento debido a esfuerzos mecánicos se centra principalmente en tres factores. En primer lugar, la "fuerza centrífuga" ejercida por el rotor en movimiento puede generar deformación en algunos materiales. A pesar de esto, dicha fuerza es la menos influyente en el envejecimiento. En segundo lugar, la corriente circulante en el estator genera fuerzas magnéticas oscilantes de doble frecuencia industrial (100 Hz), las cuales son la causa de las vibraciones en la ranura

y el desgaste del aislamiento principal. Por último, las altas corrientes transitorias de partida, desincronizaciones o fallas, generan altas fuerzas magnéticas que exigen fuertemente al devanado (25 veces más que en operación normal). Un claro ejemplo es la componente unidireccional de la fuerza transitoria que tiende a doblar los cabezales de bobina y en el peor caso quebrar el aislamiento[3].

- ★ **Ciclo de trabajo:** El ciclo de trabajo de un motor o generador también influye en cómo se degrada el aislamiento a través del tiempo. Esto tiene directa relación al sector industrial al cual está destinada la máquina y su función. Se deben tener en cuenta la cantidad de partidas/detenciones, sobrecargas, desincronizaciones, fallas en la red, etc. Dichos eventos exigen fuertemente la máquina, generalmente en más de uno de los elementos del TEAM. Otro elemento a considerar, es el uso de convertidores de frecuencia para el control de torque-velocidad de motores, los cuales producen frecuencias parasitas que disminuyen la vida útil del aislamiento, por el aumento en la actividad de descargas parciales [20].

Por ultimo, la degradación del aislamiento es efectiva cuando dos o mas elementos del TEAM están presentes, ya que entre ellos existe una directa relación causa-efecto. Como se mencionó anteriormente, el debilitamiento del material impregnable en bobinas preformadas debido a elevados esfuerzos térmicos crea deslaminación en el aislamiento principal, lo cual lleva a un debilitamiento mecánico y a descargas parciales en los espacios de aire producidos, que con el tiempo terminan por erosionar el material dieléctrico comprometido.

### 3.2.2. Ruptura macroscópica

Se denomina ruptura macroscópica a las descargas que comprometen la totalidad del espacio de aislación, consituyendo un arco conductor entre electrodos.

Las modalidades de ruptura total macroscópica total son las siguientes:

- **Ruptura dieléctrica transversal:** Es aquella en que la descarga atraviesa totalmente el cuerpo aislante, por superación de la rigidez dieléctrica del material. En el caso de materiales sólidos, la descarga transversal conducirá a la formación de un canal carbonizado, que inutiliza totalmente el sistema aislante.
- **Ruptura dieléctrica longitudinal:** Es aquella en que el arco de ruptura no penetra el cuerpo de aislación, sino que recorre la frontera o perfil del sólido.

En estricto rigor, la falla no se produce en el material sólido, sino que en el gas que lo rodea, por ejemplo aire.

### 3.2.3. Principales características de los dieléctricos sólidos

Se considera aislantes eléctricos a aquellos materiales cuya resistividad volumétrica está en el rango superiora  $10^{10}[\Omega cm]$ :

La siguientes son las características que enmarcan el comportamiento dieléctrico de los materiales sólidos [21]

1. Las descargas de ruptura transversal comprometen la vida de los dieléctricos sólidos. Son materiales no-regenerativos para este tipo de falla.
2. La tensión de iniciación de descargas localizadas es varias veces menor que la tensión de ruptura. Esta última, rara vez se alcanza en servicio, por lo que el envejecimiento progresivo de la aislación está gobernado fundamentalmente por la actividad de descargas parciales.
3. La temperatura es un parámetro fundamental en el comportamiento de los sólidos, dada su débil capacidad refrigerante. Para cada material sólido existe una temperatura de operación recomendada (clase térmica).
4. En general las aislaciones sólidas actúan en combinación con aislantes líquidos (transformadores, condensadores, cables) o con aislantes gaseosos (líneas, motores), por lo que entran en consideración fenómenos de ruptura longitudinal en las fronteras dieléctricas.
5. Muchos aislantes sólidos, en especial los de origen orgánico, se ven sometidos a cambios químicos durante su vida útil, lo que condiciona su duración.
6. Los parámetros dieléctricos fundamentales (permitividad, conductividad, factor de pérdidas) varían con la frecuencia de la sollicitación. Por lo tanto no es lo mismo el comportamiento en corriente continua que a frecuencia industrial o alta frecuencia. Además,  $\epsilon$  y  $\tan \delta$ , dependen fuertemente del nivel de la sollicitación, de la presión mecánica y de la temperatura.

### **3.3. Medición SFRA orientada a máquinas rotatorias**

#### **3.3.1. Modelo de parámetros distribuidos**

La bobina preformada vista como sistema dieléctrico en la sección 3.1.2 se muestra a continuación desde el punto de vista circuital a través de su modelo de parámetros distribuidos[22] para lograr un mayor entendimiento respecto de cada conexión propuesta en el ensayo SFRA.

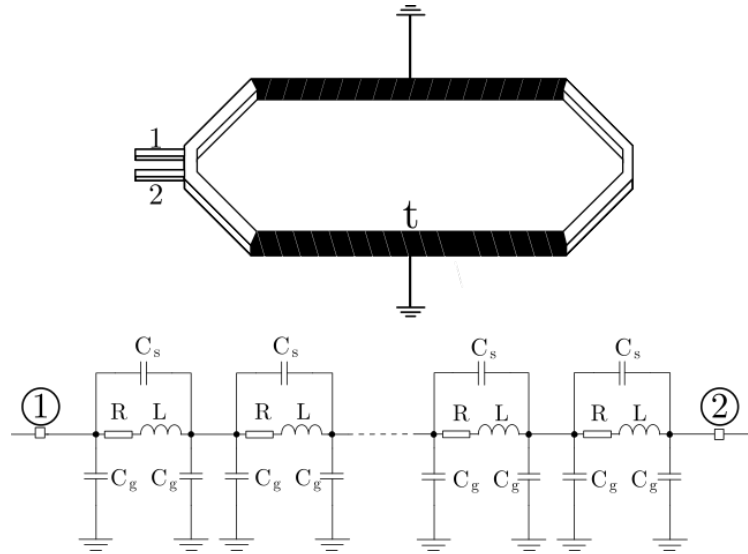


Figura 3.5: Circuito de parámetros distribuidos para bobina preformada [22]

Análogo al transformador, la capacitancia serie  $C_s$  representa el dieléctrico más próximo al conductor  $R-L$ , que en este caso corresponde al aislamiento entre espiras o hebras. La capacitancia paralelo  $C_g$  o “a masa” modela el aislamiento principal compuesto por la impregnación de resina sobre cintas de mica combinada con fibra de vidrio. Los puntos a tierra “t” aluden al contacto con la ranura del estator a través de la cinta semiconductor. Los puntos 1 y 2 indican los bornes de la bobina por lo cuales se inyecta la señal de referencia en el ensayo SFRA.

### 3.3.2. Aplicaciones SFRA

Las bobinas preformadas se ensayan de forma individual como medida de control de calidad [21]. En la fabricación en serie, se extrae una muestra para el control de la homogeneidad de la manufactura, que en este caso se relaciona con las propiedades dieléctricas. Ejemplo claro es el procedimiento para bobinas y barras de la norma DIN VDE-0530, en donde se recurre al ensayo de pérdidas dieléctricas como mecanismo de control. Otro ejemplo es el ensayo de impulso de tensión (*Surge*) que se utiliza para evaluar la calidad del aislamiento entre vueltas previo a la instalación en las respectivas ranuras.

Análogo a lo anteriormente descrito, el ensayo SFRA ha dado indicios de no solo tener características para detectar e identificar fallas de tipo mecánico, sino que también en labores de mantenimiento preventivo.

Por otro lado, es posible realizar las mediciones de un devanado completo, como el que se muestra en la figura 3.2, sin embargo, se debe tener en consideración la influencia del yugo de la máquina y la presencia del rotor, lo cual presenta una respuesta en frecuencia que no es posible obtener en una bobina individual debido a una mayor presencia de material ferromagnético[4]. Esta última forma señalada escapa a los alcances de la presente memoria, ya que todas las mediciones se realizaron con bobinas individuales.

### 3.3.3. Batería de ensayos para el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias

Con el fin de contextualizar, se indican las principales formas de falla (o pre-falla) en bobinados de máquinas rotatorias [23, 3] en relación a las características constructivas descritas en este capítulo.

- Delaminación del aislamiento principal y de la protección de cabezales debido al deterioro del material impregnante.
- Contaminación superficial de los cabezales.
- Deterioro de la protección de corona ranura. Si la protección es de mala calidad se desgasta más rápido por las vibraciones.
- Deterioro de la protección de corona “grading”. Al estar fuera de la ranura es más propensa a los factores medioambientales y de vibración.
- Cortocircuito entre espiras.
- Fractura del aislamiento principal.

La siguiente tabla muestra de forma compacta los ensayos “off-line” que se aplican a devanados estáticos para la evaluación general de su estado dieléctrico y mecánico.

Name	Description	Performance Difficulty	Effectiveness	Relevant Standards
Insulation resistance (IR)	Apply DC voltage for 1 min to measure leakage current	Easy	Only finds contamination or serious defects	IEEE 43
Polarization index (PI)	Ratio of 1 min and 10 min IR	Easy	Only finds contamination or serious defects	IEEE 43
DC high potential	Apply high DC voltage for 1 min	Easy	Only finds serious defects	IEEE 95
AC high potential	Apply high AC voltage for 1 min	Moderate, due to large transformer needed	More effective than DC high potential	NEMA MG1 or IEC 60034
Capacitance	Apply low or high voltage to measure winding capacitance to ground	Moderate	Moderately effective to find thermal or water leak problems	
Dissipation (power) factor	Apply low or high voltage to measure insulation loss	Moderate	Moderately effective to find thermal or water leak problems	IEEE 286 or IEC 60894
Power factor tip-up	Differences in insulation loss from high to low voltage	Moderate	Effective to find widespread thermal or contamination problems in FW*	IEEE 286 or IEC 60894
Off-line partial discharge	Directly detect PD pulse voltages at rated voltage	Difficult	Finds most problems except end-winding vibration; for FW only	IEEE 1434
Surge comparison	Apply simulated voltage surge	Difficult to determine if puncture occurred in FW	Effective for finding turn insulation problems in RW* and multiturn FW	IEEE 522
Blackout	Apply high ac voltage and look for discharges with lights out	Moderate	Effective for contamination problems in end-winding	IEEE 1434
Wedge tightness	“Hammer” wedges to see if loose	Moderate	Effective to find loose windings in FW	
Side clearance	Insert “feeler gauges” down side of slot	Easy, after wedges removed	Effective to find loose windings in FW	

\*FW is form-wound winding; RW is random-wound winding.

Figura 3.6: Ensayos off-line devanados estáticos [3].

## **Parte II**

# **Trabajo experimental**

# Capítulo 4

## Metodología experimental y validación del sistema de medición

### 4.1. Descripción general de la metodología experimental

El presente capítulo establece los procedimientos experimentales desarrollados para adaptar el equipo FRAX101 a las características particulares de bobinas preformadas de media tensión. La metodología propuesta se estructura en cuatro etapas principales.

1. Se caracteriza técnicamente el sistema de medición, documentando las especificaciones del instrumento y las configuraciones de software optimizadas para este estudio.
2. Se describen las adaptaciones mecánicas y eléctricas necesarias para conectar adecuadamente las bobinas preformadas al sistema de medición, incluyendo el desarrollo de conectores alternativos y protocolos de conexionado propuestos.
3. Se implementa un proceso de validación experimental que verifica el correcto funcionamiento del sistema mediante ensayos de cero decibel y rango dinámico.
4. Se establece una estructura experimental, definiendo los casos de estudio, la catalogación de probetas y la organización de la base de datos.
5. Se realiza la documentación y catalogación de las probetas ensayadas con sus características, mediciones aplicadas y hallazgos.

## 4.2. Descripción del sistema de medición

### 4.2.1. Especificaciones técnicas del FRAX101

Característica	Especificación
Fabricante	Megger®
Modelo	FRAX101
Método de Medición	Barrido de Frecuencia (SFRA)
Rango de Frecuencia	1 Hz - 10 MHz (extensible hasta 25 MHz)
Rango de Frecuencia Extendido	0.1 Hz - 25 MHz
Número Máximo de Puntos	32000
Espaciado de Puntos	Logarítmico, lineal o combinación
Rango Dinámico	>130 dB (FRAX-99 >115 dB)
Precisión	±0.5 dB
Software	FRAX para Windows 2000/XP/Vista
Comunicación PC	USB aislado galvánicamente
Intervalo de Calibración	Máximo 3 años
Estándares	CIGRE Brochure 342, DL/T 911-2004
Canales Analógicos de Salida	1 canal
Voltaje de Cumplimiento	0.2 - 20 V peak to peak
Voltaje de Medición	0.1 - 10 V pick to peak
Impedancia de Salida	50 $\Omega$
Canales Analógicos de Entrada	2 canales
Muestreo	Simultáneo, 100 MS/s
Impedancia de Entrada	50 $\Omega$
Peso (FRAX-101)	1.4 kg (3.1 lbs), 1.9 kg con batería
Dimensiones (FRAX-101)	250 x 169 x 52 mm
Dimensiones (FRAX-150)	305 x 194 x 360 mm
Voltaje de Entrada Equipo	90-135 VAC y 170-264 VAC, 47-63 Hz
Temperatura Operativa	-20° a 50°C (Bluetooth 0° a 50°C)
Humedad Operativa	<90 % sin condensación
Temperatura de Almacenamiento	-20° a 70°C
Humedad de Almacenamiento	<90 % sin condensación

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas del instrumento FRAX101 [7]

### 4.2.2. Configuración del software y parámetros de medición

En la figura 4.1 se muestra la interfaz principal del *software* FRAX101. Se pueden visualizar las siguientes configuraciones y accionamientos principales:

- **Tipos de visualización:** En la parte superior derecha (en rojo) se puede navegar por pestañas y acceder a distintos modos de gráficos: Magnitud, Fase y Magnitud/Fase en conjunto.
- **Gráficas disponibles:** Se presentan cinco gráficas disponibles en la sección superior derecha (en azul), las cuales permiten la selección según los requerimientos de visualización. Cada gráfica se configura de manera independiente, ofreciendo opciones de escalado logarítmico-logarítmico, logarítmico-lineal y sus combinaciones inversas. El configuración permite la manipulación personalizada de los límites en los ejes X e Y, así como el ajuste mediante autoescalado.

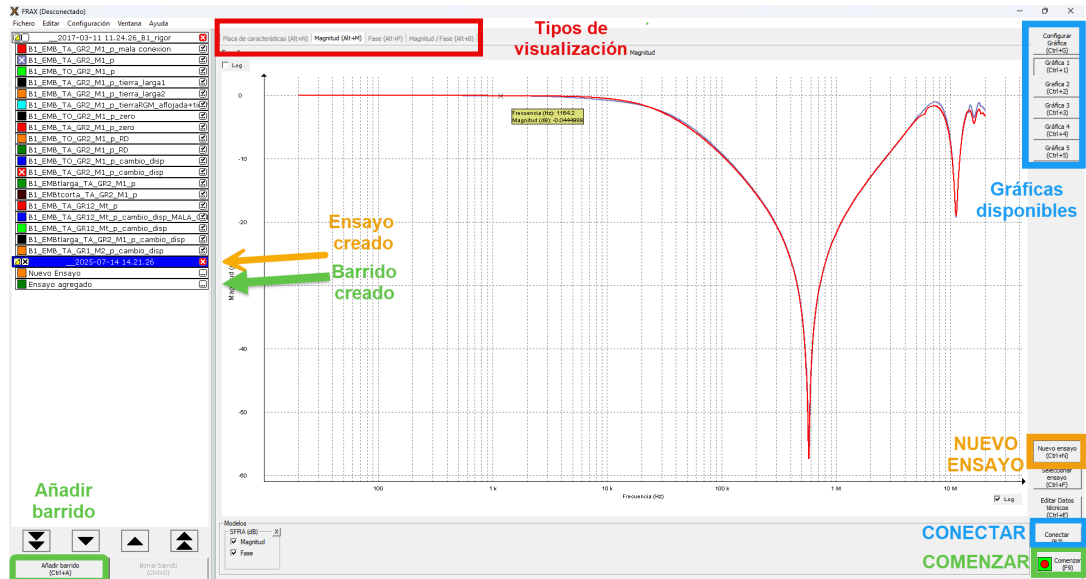


Figura 4.1: Interfaz general en software FARX101 [7]

- **Crear ensayos:** El *software* denomina ensayo a una batería de mediciones que se agrupan en la sección izquierda de la ventana. Cada ensayo presenta como encabezado la fecha de inicio de los distintos barridos que contiene. Esta metodología de organización facilita la posterior exportación de conjuntos de mediciones que comparten características específicas, tales como una probeta determinada o un tipo de conexión particular.
- **Crear barridos:** El *software* define como barrido cada medición ejecutada para generar una curva específica. La creación de un barrido produce las curvas correspondientes tanto de magnitud como de fase.
- **Conectar:** El botón conectar se utiliza posterior a la conexión del equipo mediante puerto USB al computador donde se adquieren los datos. Al activarse, aparece una ventana emergente que indica la conexión exitosa del equipo.
- **Comenzar:** El botón comenzar inicia la medición del barrido, la adquisición y el graficado de puntos en tiempo real.
- **Configuración de medida:** Se accede mediante el menú contextual superior izquierdo de la interfaz general, pestaña [Configuración] → [Configuración de medida]. Esta ventana constituye el elemento más relevante para el manejo del *software* y la manipulación de ensayos según el propósito requerido, ya que permite modificar los límites de las décadas o intervalos de medición, crear nuevas bandas y establecer la cantidad de puntos por década (P/D). La figura 4.2 muestra la distribución y cantidad de puntos por década configurados por defecto, donde se observa que el ancho de banda predeterminado abarca de 20 Hz a 2 MHz con puntos por década considerablemente reducidos. Esta configuración de fábrica permite realizar un barrido rápido de prueba, dado que el tiempo de medición resulta proporcional a la cantidad de puntos. La experiencia demuestra que una medición real requiere entre 1,5 y 3 minutos según la configuración establecida.

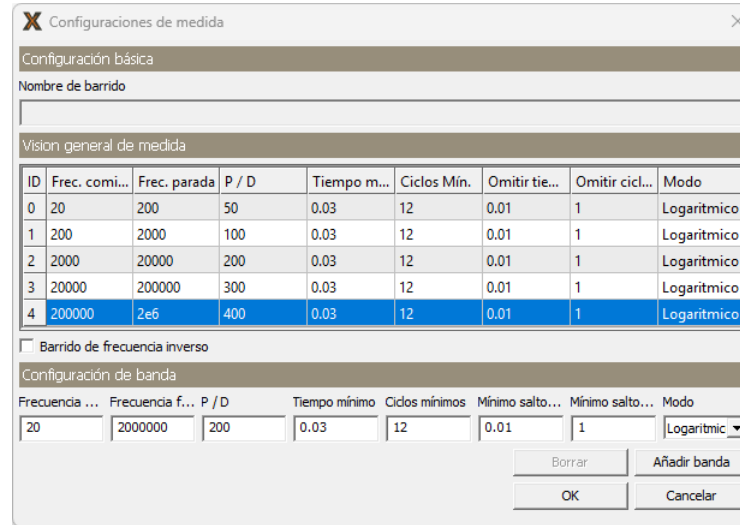


Figura 4.2: Ventana de configuración de medida de software FRAX101 [7]

### 4.2.3. Adaptaciones para bobinas de máquinas rotatorias

Considerando la descripción general del ensayo FRA para transformadores de potencia, indicada en el capítulo 2, y que el equipo descrito se fabrica y orienta específicamente hacia mediciones en transformadores, se requieren adaptaciones para montar, conectar y medir las bobinas preformadas de estator, objeto del presente estudio. Esta tarea no resulta factible mediante el conjunto de elementos y configuraciones de software predeterminadas. Por tal razón, a continuación, se describen las adaptaciones realizadas:

1. **Montaje de probetas:** Para ubicar las bobinas en el espacio del laboratorio y realizar las configuraciones de conexión, se establece un montaje basado en la estabilidad de posición para manipular los conectores del instrumento y aislar la probeta del suelo (contacto a tierra). Las probetas se disponen sobre aisladores con el fin de mantenerlas suspendidas a una altura considerable que permita realizar cómodamente las conexiones, como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3: Montaje de probetas en el laboratorio

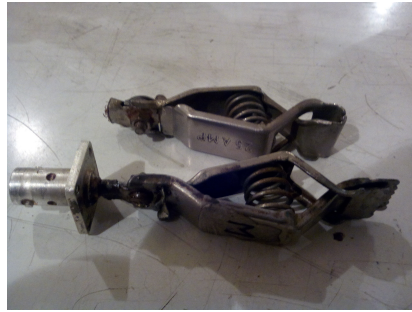
Consideraciones generales para el montaje:

- La probeta debe estar, en lo posible, libre de contaminación superficial.
  - Se debe separar de tierra (mesa de trabajo) mediante aisladores de soporte.
  - Considerar la configuración del contacto de ranura (ver sección 6.1), según corresponda el caso.
  - Marcar el terminal designado como N<sup>o</sup>1 de cada bobina, donde se conecta el cable de Medición (figura 4.10). Esta práctica se mantiene para todas las probetas.
  - Apretar conector fabricado mediante prensas auxiliares para asegurar una buena resistencia de contacto (figura 4.6).
  - Despejar la zona de trabajo de elementos que puedan interferir o atentar contra la estabilidad de las conexiones.
2. **Adaptación de conector:** El equipo FRAX101 posee dos prensas de conexión que se muestran en las figuras 2.8 y 4.3, las cuales son el punto de unión de los cables coaxiales con la probeta. Éstas al ser fabricadas para su conexión en terminales tipo *bushing* de transformador de potencia, resultan ser muy pesadas para el delgado y blando terminal de bobina preformada.

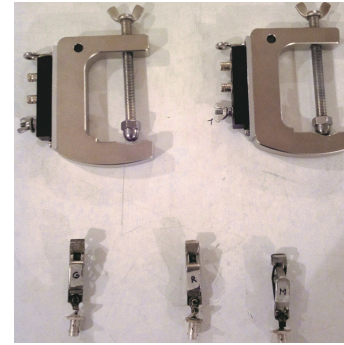
Por esta razón se propone un conector alternativo de menor tamaño que consiste en la unión de un terminal tipo “bnc” hembra con un conector tipo caimán como el que se muestra en la figura 4.4, permitiendo así, la misma conexión eléctrica pero con un conector de menor peso y mayor maniobrabilidad.

En la figura 4.5 se observa la diferencia de tamaño entre éstos, y además la etiqueta para los respectivos cables de Generador, Referencia y Medición. La unión del terminal “bnc” con el conector caimán se hace, en primera instancia, mediante apriete

de conductor entre tornillo-golilla-tuerca, luego se refuerza la unión con soldadura a base de estaño.



**Figura 4.4:** Comparación conector tipo caimán con resorte, original y plano.



**Figura 4.5:** Comparación de tamaño entre conectores.

El conector caimán al ser dentado y con solo el resorte como mecanismo de apriete, no asegura una buena resistencia de contacto. Debido a esto se decide aplanar la punta (figura 4.4) y reforzar el contacto con una prensa pequeña, junto con el respectivo pulido y limpieza en el metal del caimán.

En la figura 4.6 se muestra el acabado del conector junto con la prensa, aplicados al terminal de bobina.



**Figura 4.6:** Montaje de conectores alternativos con prensa auxiliar.

3. **Aterrizamiento de pantallas:** Desde la experiencia del FRA en transformadores, se observa en las figuras 2.6 y 2.9 que la conexión de las pantallas se realiza a medida para que el conductor plano y trenzado se adapte a la longitud del bushing del transformador. En el caso de las bobinas estáticas, este conductor resulta demasiado corto y pesado para su implementación. Por esta razón, se utiliza un conductor considerablemente más liviano y maleable.

En la práctica esto se realiza mediante una malla metálica especial para estas aplicaciones (*Electrical Shielding Tape*) sujeta a través de pequeños caimanes en las

carcasas de los terminales coaxiales construidos, como se muestra en las figuras 4.7 y 4.8, así respetando la forma estipulada en la sección 2.3.4.

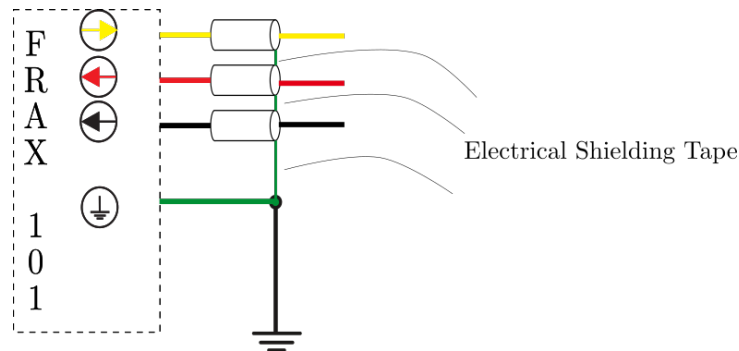


**Figura 4.7:** Conexión de pantallas a tierra para ensayo GR2 M1.



**Figura 4.8:** Conexión de pantallas a tierra para ensayo GR12 Mt.

Las pantallas de los cables coaxiales se unen entre si y se aterrizan a la malla de puesta a tierra del laboratorio, como se muestra de forma esquemática en la figura 4.9.



**Figura 4.9:** Esquema de conexión de pantallas entre coaxiales  
Fuente: Elaboración propia

4. **Configuración de medida:** Según se indica en la sección 4.2.2, se modifica la configuración de medida por defecto del instrumento. Se implementan las siguientes modificaciones: se incorpora una banda adicional y se incrementan los puntos por década en todas las bandas. Dicha configuración se detalla en la sección 4.3.3

### 4.3. Protocolo de ensayos y configuraciones

#### 4.3.1. Configuraciones de ensayo propuestas

Se establecen tipos de conexión en la bobina preformada basados en la experiencia derivada de la práctica con transformadores, adaptándolos a las probetas bajo estudio. Se definen tres configuraciones que se describen a continuación:

- **Configuración 1 - Conexión de bobina simple:** Se establece una analogía de la conexión indicada en la sección 2.4.2, pero orientada a la bobina estatórica, inyectando la señal por uno de sus terminales visibles y tomando el punto de medición en el terminal opuesto. Esta configuración busca caracterizar todos los elementos identificados en el modelo de parámetros distribuidos e interacciones entre ellos: Resistencia de conductor ( $R$ ) e Inductancia distribuida ( $L$ ) presentes en el bobinado de cobre, Capacitancia serie ( $C_s$ ) presente en el aislamiento entre espiras y Capacitancia paralela ( $C_g$ ) que caracteriza el aislamiento externo. Esta configuración proporciona información completa acerca de las variaciones de sus componentes constructivos.
- **Configuración 2 - Conexión de bobina simple aterrizada:** Corresponde a la Configuración 1 conectada a tierra desde su aislamiento exterior. Esta configuración presenta dos enfoques distintos. En primer lugar, monitorea los mismos elementos descritos en la Configuración 1, pero presenta mayor sensibilidad a la capacitancia del aislamiento exterior  $C_g$ , lo que permite separar los efectos entre  $C_s$  y  $C_g$ . El segundo enfoque se establece desde la perspectiva de falla a tierra en una ranura del estator, permitiendo caracterizar dicha falla.
- **Configuración 3 - Conexión capacitiva:** Esta configuración permite caracterizar de forma completa el aislamiento principal, eliminando los efectos inductivos. Se efectúa mediante la conexión unificada de sus dos terminales (entrada común de señal). El punto de medición se establece en el aislamiento exterior.

#### 4.3.2. Procedimientos de conexionado

Las tres tipos de configuraciones propuestas en la sección anterior se proceden a describir en relación a su implementación en el laboratorio y diagramas a modo de guía o procedimiento de conexionado.

Para mantener la coherencia con las letras iniciales representativas de los cables coaxiales del instrumento indicadas en la sección 2.3.2 se considera la siguiente nomenclatura para referirse a cada una de las configuraciones: (**G**enerador, **R**referencia, **M**edición).

La nomenclatura **t** indica el punto central del aislamiento exterior donde se realiza la conexión de medición (M) en la Configuración 3.

Por otra parte se debe diferenciar ambos terminales para medir siempre en la misma dirección. Por lo que en el caso de este estudio se numeran los terminales (1-2) y en el laboratorio se diferencia el terminal 1 con una cinta adhesiva de color rojo como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10: Identificación de terminal 1.

■ **Configuración 1**

- Generador y Referencia conectados en el terminal 2.
- Medición conectado en el terminal 1

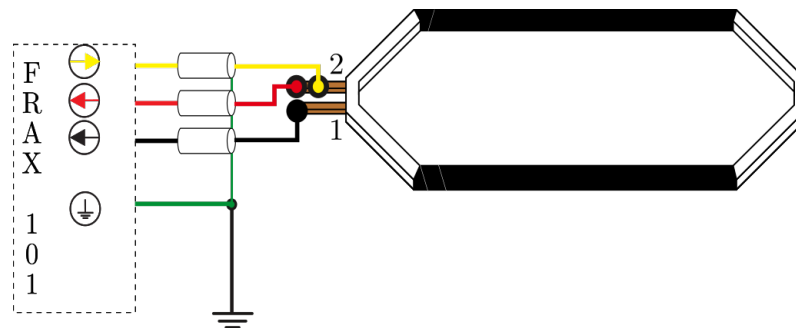


Figura 4.11: Esquema de conexión para ensayo SFRA en bobina individual GR2-M1  
Fuente: Elaboración propia

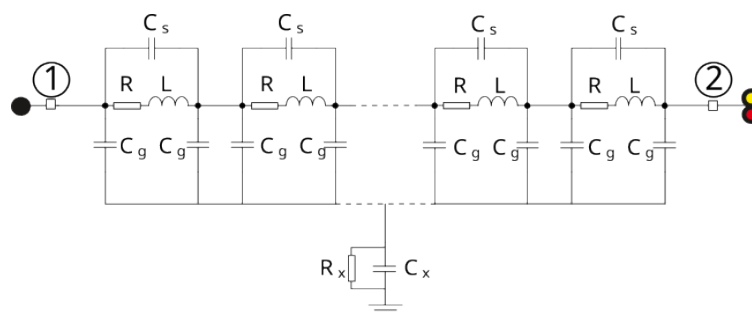
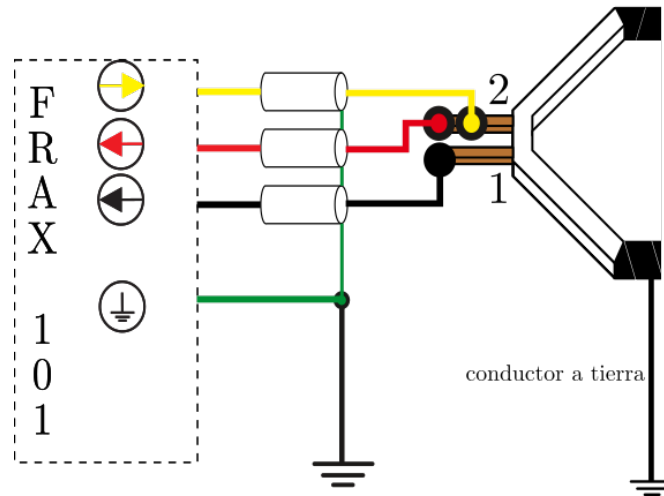


Figura 4.12: Circuito equivalente para bobina individual en configuración GR2-M1  
Fuente: Elaboración propia

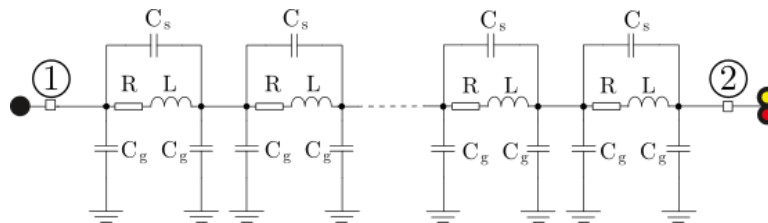
■ **Configuración 2**

- Generador y Referencia conectados en el terminal 2.

- Medición conectado en el terminal 1.
- Bobina conectada a tierra en un punto central.



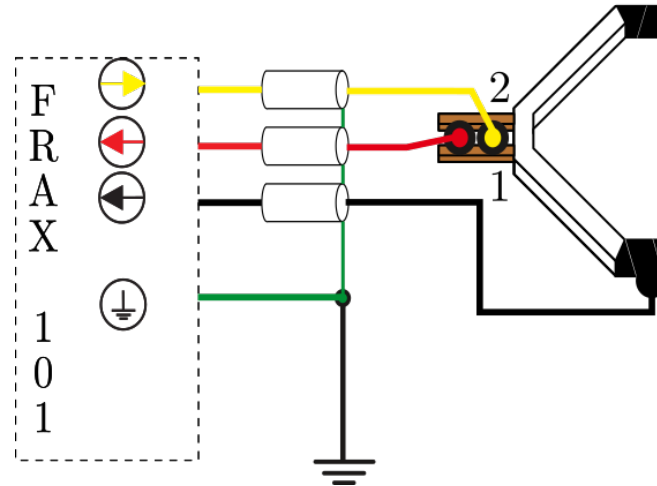
**Figura 4.13:** Esquema de conexión para ensayo SFRA en bobina individual GR2-M1 aterrizada  
Fuente: Elaboración propia



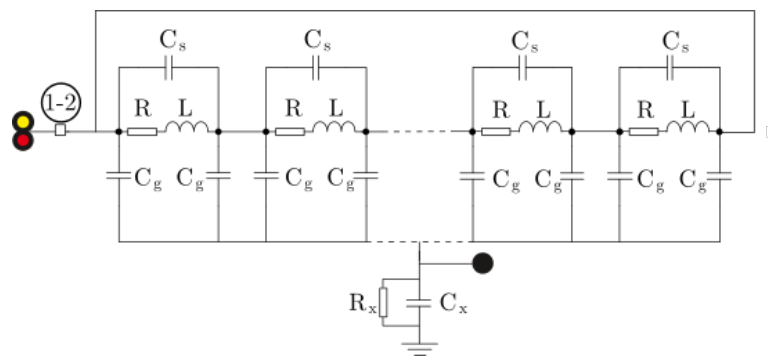
**Figura 4.14:** Circuito equivalente para bobina individual en configuración GR2-M1 aterrizada  
Fuente: Elaboración propia

### ■ Configuración 3

- Terminales 1 y 2 unidos. En dicha unión se conectan los cables de Generador y Referencia.
- El conductor de Medición se conecta en un punto central a la bobina. Análogo a la conexión a tierra del esquema anterior.



**Figura 4.15:** Esquema de conexión para ensayo SFRA en bobina individual GR12-Mt  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.16:** Circuito equivalente para bobina individual en configuración GR12-Mt  
Fuente: Elaboración propia

- La resistencia y capacitancia  $R_x$  y  $C_x$  respectivamente, representan la base en donde se soporta la bobina, como lo son los aisladores y la mesa que se describen en el punto 1 de la sección 4.2.3
- **Conexión a tierra del instrumento:** Antes de energizar el instrumento y antes de conectar cualquier cable en la probeta se debe conectar el cable de protección a la toma de tierra del laboratorio, como indica la figura 4.17.

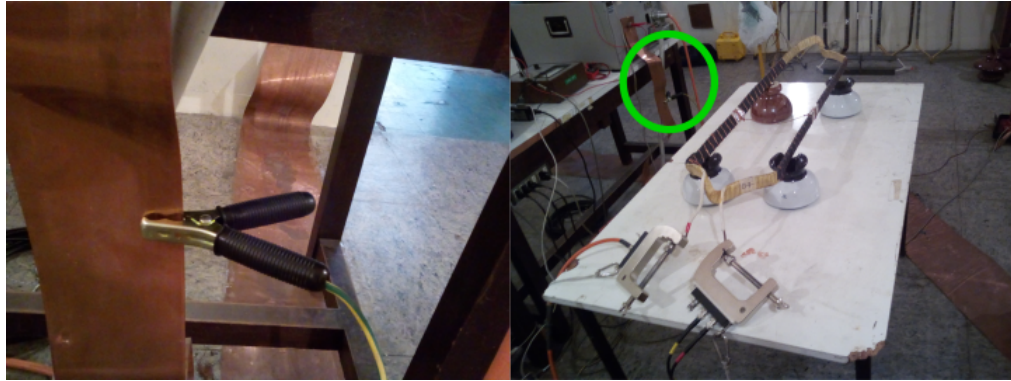


Figura 4.17: Conexión a tierra del instrumento FRAX101 en el laboratorio

### 4.3.3. Parámetros de visualización y consideraciones de muestreo

Dentro de las configuraciones del *software* se modifican los parámetros de medición relevantes. Estos son el ancho de banda y los puntos por década, como se muestran en las figuras 4.18 y 4.19, que corresponden a la configuración por defecto y modificada, respectivamente.

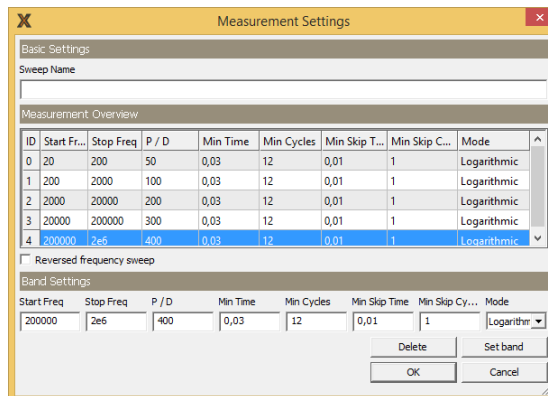


Figura 4.18: Ancho de banda y puntos por década FRAX101 modo prueba rápida [7]

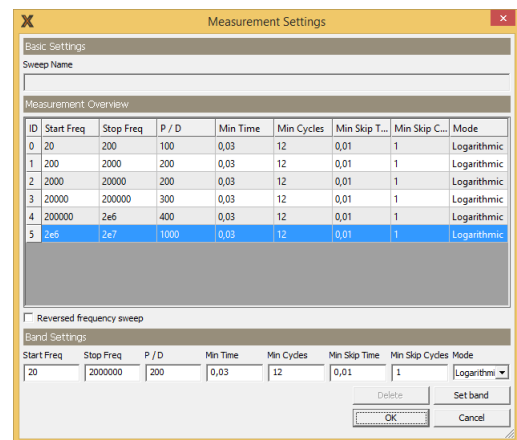


Figura 4.19: Configuración definida para el presente estudio [7]

Considerando los parámetros mencionados en 2.5.2 se tiene:

- **Ancho de banda:** Se extiende el rango de análisis mediante una nueva banda de 1000 puntos por década, que abarca desde 2 MHz hasta 20 MHz, con el propósito de caracterizar el comportamiento capacitivo completo y aplicar el criterio Cigré de la tabla 2.2. El ancho de banda total se establece desde 20 Hz hasta 20 MHz.
- **Resolución:** Los puntos por década (P/D) se duplican en la primera y segunda banda, según se indica en la figura 4.19. La cantidad total alcanza 2200 puntos muestreados por medición.
- **Impedancia de medición:** Se opera el instrumento con una impedancia de 50Ω al igual que los cables.

- **Rango dinámico:** Se considera como parte de los ensayos y verificaciones a realizar, el cual se describe en la sección 4.4.2.
- **Tensión aplicada:** Se aplica una tensión sinusoidal de  $10V_{peak}$ , como se encuentra configurada por defecto según se indica en la tabla 4.1.

#### 4.4. Validación del sistema de medición

El objetivo de este procedimiento consiste en conocer el nivel de ruido que aporta el instrumento junto con la respuesta en frecuencia de la conexión del conjunto “cables-tenazas”, verificando así que el equipo se encuentra dentro de los rangos estipulados por el fabricante, como indica la figura 4.20, para la correcta visualización y adquisición de los datos. Se recomienda realizar este proceso una vez por sesión de mediciones, ya que los resultados son independientes de la probeta utilizada. Resultados fuera de los rangos establecidos en la tabla 4.1 significan que se requiere calibrar el instrumento.

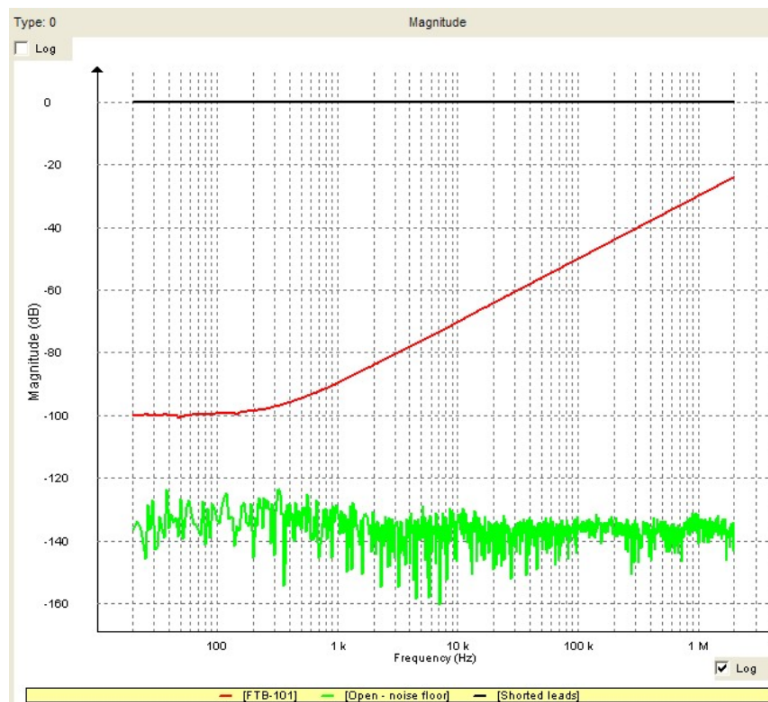
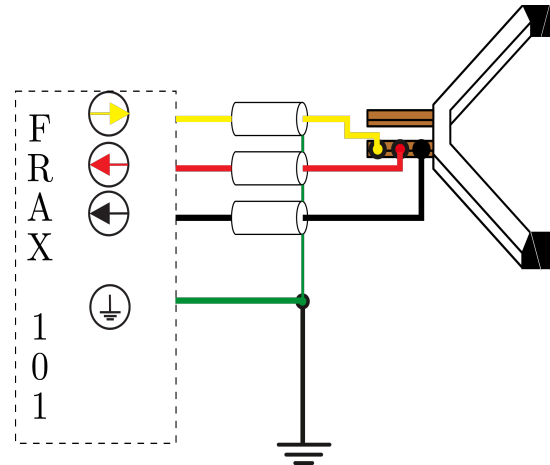


Figura 4.20: Verificación cero decibel y rango dinámico - Curvas del fabricante [7]

##### 4.4.1. Verificación de cero decibel

Considerando la ec.(C.14) y ec.(C.19), el procedimiento de verificación de cero decibel (*zero-check*) o ensayo de cortocircuito consiste en comprobar que se obtiene una respuesta de diagrama de Bode de cero decibel para todo el rango de frecuencias al conectar Generador, Referencia y Medición en el mismo punto, donde la señal de entrada equivale a la de salida.

Se muestra en la figura 4.21 el esquema de conexión para comprobar lo anteriormente descrito.



**Figura 4.21:** Esquema de conexión para verificación de cero decibel  
Fuente: Elaboración propia

La figura 4.22 presenta el resultado experimental para la Bobina N<sup>o</sup>1, perteneciente al conjunto de bobinas disponibles en el laboratorio. Se verifica el cero decibel utilizando tanto los conectores originales del equipo como el conector adaptado. La gráfica muestra que el conector original no cumple en la totalidad del ancho de banda con las especificaciones del fabricante de mantenerse entre  $\pm 0.5$  dB (dato de precisión en tabla 4.1).

El conector original del FRAX101, diseñado para terminales robustos de transformadores, no ejerce presión adecuada sobre los terminales delgados y blandos de bobinas preformadas, generando mayor resistencia de contacto. La resistencia de contacto depende de la presión específica y calidad del contacto microscópico, no del área total. El conector adaptado (caimán aplanado + prensa auxiliar) optimiza la presión de contacto sobre el terminal delgado, reduciendo significativamente la resistencia según confirma la prueba de cero decibel, manteniéndose dentro del rango aceptable en todo el ancho de banda.

En conclusión, esto no significa que el equipo esté descalibrado, sino que el conector propio del equipo se orienta hacia terminales más robustos como los que se observan en la figura 4.23.

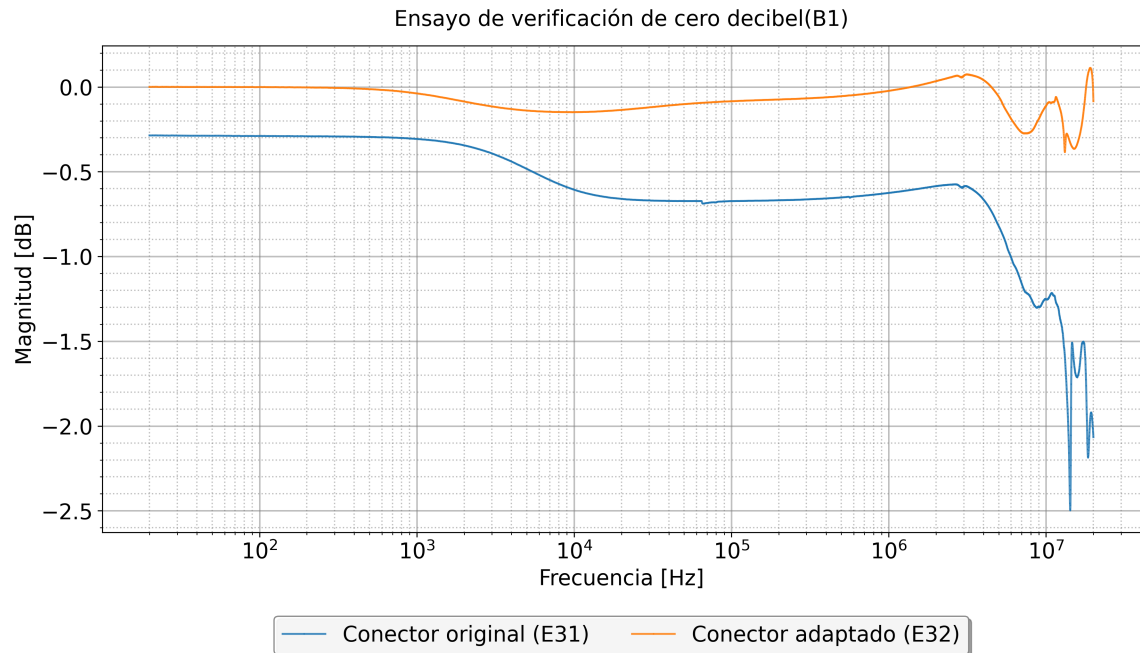


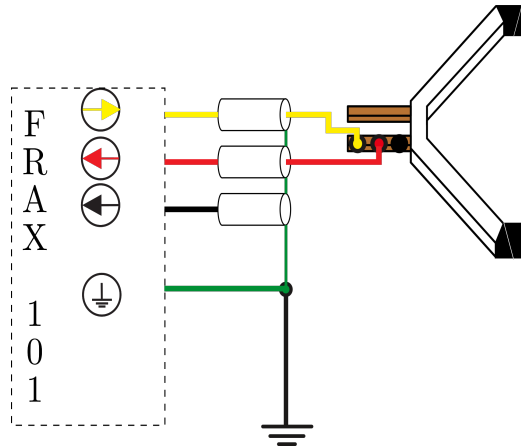
Figura 4.22: Gráfica experimental - verificación de cero decibel.



Figura 4.23: Comparación de conexión de conector original entre *bushing* de transformador y en bobina preformada.

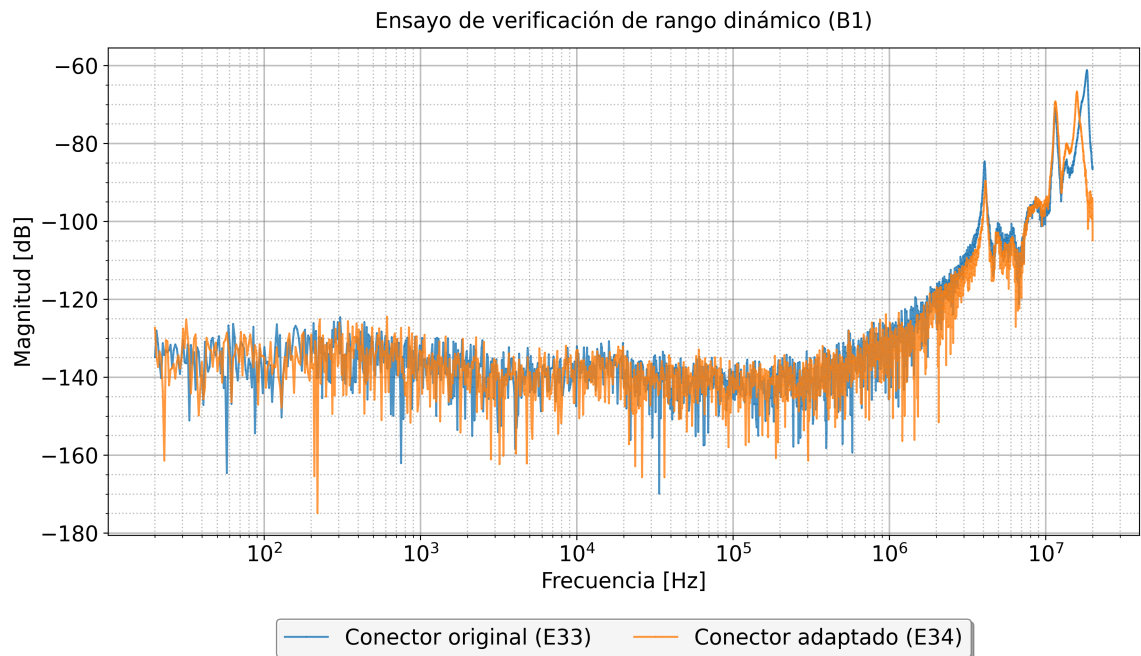
#### 4.4.2. Verificación de rango dinámico

El parámetro “rango dinámico” presenta relación directa con el ruido electromagnético generado por el instrumento y, al tratarse de un ensayo de baja potencia, influye en la medición y por ende en la interpretación de los datos. Para visualizar el nivel de ruido se realiza una medición denominada en la literatura como de circuito abierto o “vacío”, la cual se ejecuta dejando el cable de Medición sin conexión con la probeta, como se muestra en la figura 4.24.



**Figura 4.24:** Esquema de conexión para verificación de rango dinámico  
Fuente: Elaboración propia

Considerando las ecuaciones del anexo C.4, de forma teórica la atenuación de la señal de repuesta de esta prueba debería tender a infinito negativo para todo el espectro de frecuencias. Sin embargo al observar la curva experimental en la figura 4.25 se evidencia una atenuación limitada en donde la envolvente de la señal oscila en torno a  $-140\text{ dB}$  para ambos conectores evaluados. Se observa también un límite de frecuencia hasta donde esto se cumple, que es hasta aproximadamente  $1\text{ MHz}$ , por lo que para valores superiores de frecuencia el ruido del instrumento contamina aún más la señal medida. Finalmente se concluye que el equipo está bien calibrado en relación a rango dinámico, considerando que la tabla de especificaciones del fabricante indica valores inferiores a  $-130\text{ dB}$ .



**Figura 4.25:** Gráfica experimental - verificación de rango dinámico.

## 4.5. Descripción de probetas y casos de estudio

### 4.5.1. Características de las bobinas preformadas

Los objetos a ensayar en el presente estudio corresponden a bobinas simples de motor tipo preformadas (media tensión), pertenecientes al inventario del LAT-USM. A continuación en la tabla 4.2 se detalla el código con que cada bobina es identificada y sus datos nominales, acompañada de un esquema simple que muestra la forma y las dimensiones obtenidas en el laboratorio. Además se incluye una breve identificación del estado con que se recibieron las bobinas y observaciones de relevantes de la inspección visual de cada una de ellas. Se complementa la tabla con un enlace a las fotografías tomadas a modo de inspección, identificación y catalogación de las probetas.

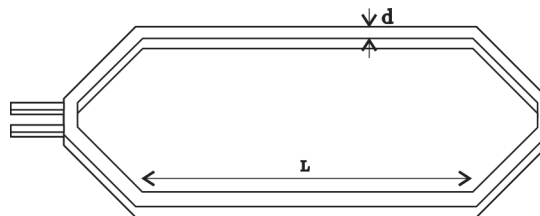


Figura 4.26: Esquema general de bobinas ensayadas en el laboratorio

Código Identificación Bobina	Clase de aislación (kV)	Largo L(mm)	Espesor d(mm)	Condición de recepción	Observación	Figura de referencia
B1	4	600	15	Buen estado	Usaba en ensayos previos	4.28
B2	4	450	35	Con falla	Falla en aislamiento principal	4.29
B3	3	700	15	Con falla	Falla en aislamiento principal	4.31
B4	12	850	35	Buen estado	Usaba en ensayos previos	4.33
B5	12	850	35	Buen estado	Usaba en ensayos previos	4.34
B6	5	600	15	Buen estado	Usaba en ensayos previos	4.35
B7	4	750	30	Buen estado	Usaba en ensayos previos	4.36
B8	4	900	25	Buen estado	Sin proceso de curado	4.37

Tabla 4.2: Especificaciones de probetas utilizadas en el estudio

**Nota:** No se cuenta con información ni se puede detectar visualmente el tipo de mecanismo de impregnación de cada bobina, para efectos de este estudio solo se denominan como “bobinas preformadas de media tensión impregnadas en resina”

### 4.5.2. Definición de casos de estudio

- **Casos base:** Los casos base constituyen el grupo de ensayos de referencia experimental, empleando bobinas preformadas sin alteración en su configuración original. Las mediciones se ejecutan con conectores originales del FRAX101 y con los adaptados, manteniendo condiciones consistentes de ensayo. Se simulan las condiciones eléctricas de la ranura del estator mediante cinta semiconductor protectora, envolviendo la bobina con embarrilado de cobre y uniendo las piernas de la bobina a través de un conductor central, estableciendo el patrón de comparación para evaluaciones posteriores. Se puede observar el montaje del caso base en la figura 4.3
- **Casos de validación:** Esta categoría agrupa los ensayos orientados a caracterizar la variabilidad inherente del sistema de medición.
  - **Sensibilidad de cables coaxiales:** Los ensayos de sensibilidad de cables evalúan la variación entre configuraciones de disposición de cables enrollados y estirados, cuantificando el impacto de la geometría de instalación.
  - **Sensibilidad de conectores:** La comparación de conectores tiene como objetivo cuantificar la variabilidad del sistema de medición atribuible a deficiencias en las conexiones eléctricas, identificando y caracterizando errores operativos comunes durante la implementación del método SFRA. Adicionalmente, esta etapa permite validar el desempeño del conector adaptado desarrollado específicamente para bobinas preformadas, evaluando su consistencia y confiabilidad frente al conector original del FRAX101.
  - **Superficie de contacto de ranura:** La variación de superficie de contacto busca evaluar la influencia de las condiciones de instalación en el estator sobre FRA de las bobinas preformadas, simulando diferentes configuraciones presentes en la ranura. Se ensayan materiales como embarrilado de cobre (referencia), perfiles de acero, papel aluminio y configuraciones de piernas unidas por conductor central. La configuración 2, que simula cortocircuito en ranura, representa la medición más relevante para este análisis, determinando la sensibilidad del método ante variaciones en las condiciones de contacto eléctrico.
- **Casos de falla inducida:**
  - **Contaminación superficial:** Consiste en la simulación de contaminantes a través de la instalación de un embarrilado de cobre en las zonas expuestas de los extremos de bobina, simulando la acumulación de partículas conductoras, humedad y depósitos carbonosos descritos en el capítulo 3. El objetivo es cuantificar la sensibilidad del método FRA ante la degradación gradual de las propiedades dieléctricas superficiales del aislamiento.
  - **Perdida de cinta semiconductor:** Implica la remoción progresiva de la cinta semiconductor externa, emulando el desprendimiento y envejecimiento del sistema de control de campo eléctrico analizado en el capítulo 3. Esta evaluación busca identificar los rangos de frecuencia más sensibles a la pérdida de uniformidad en la distribución del campo eléctrico.
  - **Cortocircuito entre vueltas:** Se implementa mediante la conexión entre espiras adyacentes, reproduciendo las fallas de cortocircuito por degradación del aislamiento entre vueltas documentadas en el capítulo 3. El propósito es establecer

patrones de respuesta FRA característicos que permitan la detección temprana de esta anomalía crítica.

- **Fractura de aislamiento principal:** Comprende la generación de deterioro destructivo controlado en el aislamiento principal de la bobina, simulando las fracturas por fatiga mecánica y esfuerzos térmicos identificados en el capítulo 3. La evaluación busca correlacionar el grado de severidad de la fractura con las variaciones en la respuesta en frecuencia.
- **Flexión de bobina:** Involucra la deformación mecánica controlada de la estructura de la bobina, tanto en flexión interna como externa, replicando las deformaciones por fuerzas electromagnéticas y vibraciones mecánicas analizadas en el capítulo 3. El objetivo es determinar la sensibilidad del método FRA ante cambios geométricos en la configuración espacial del devanado.

### 4.5.3. Catalogación de probetas ensayadas

La figura 4.27 presenta la totalidad de las probetas ensayadas, estableciendo una comparación de dimensiones y configuración geométrica. Las figuras siguientes exhiben cada bobina con mayor detalle y documentan las mediciones correspondientes a cada elemento evaluado.

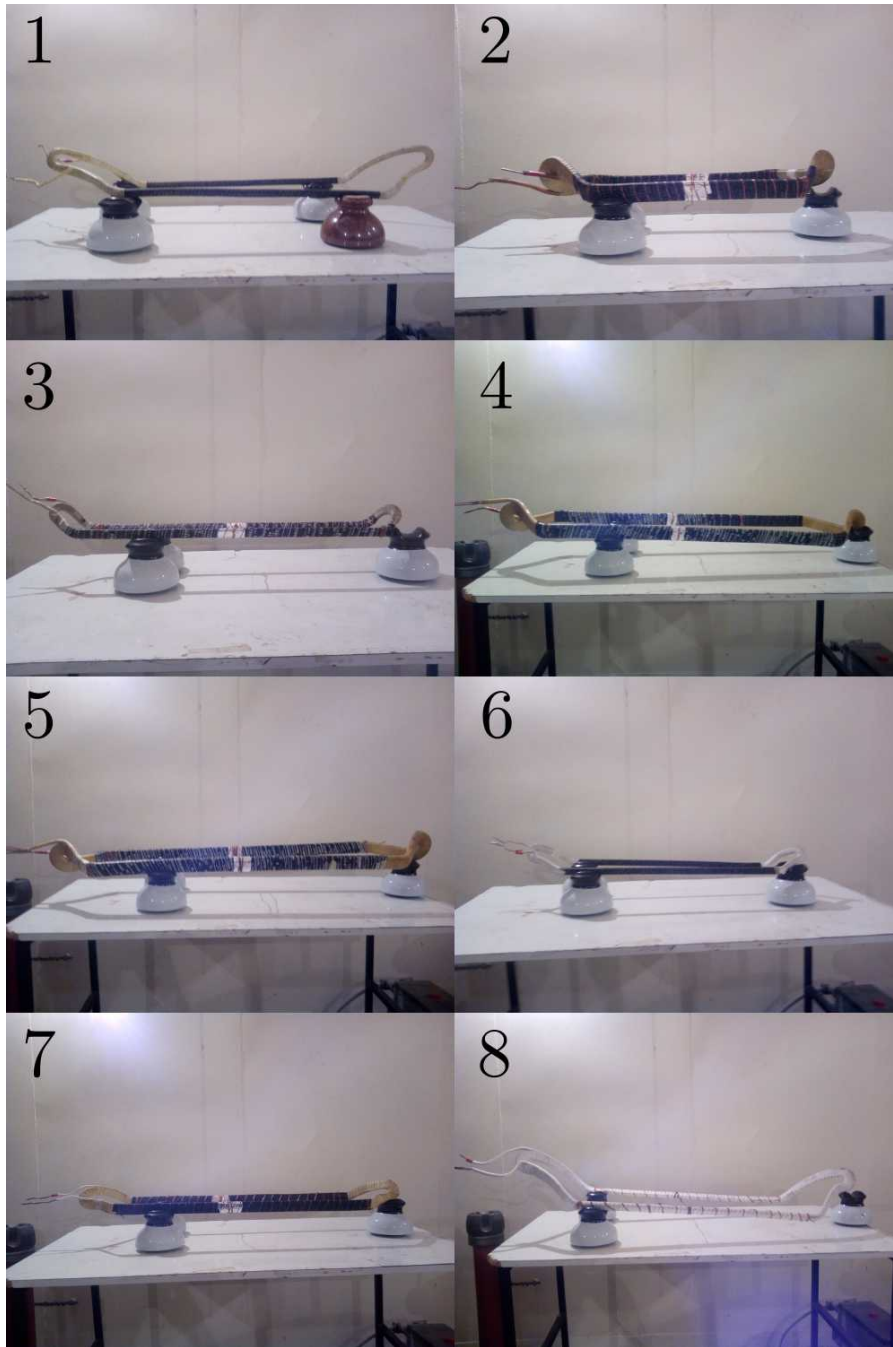


Figura 4.27: Imagen comparativa de bobinas ensayadas

Bobina 1		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	3	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	28	Cables Conectores Superficie de contacto Mala conexión
Falla inducida	12	Contaminación superficial Fractura de aislamiento
<b>Total mediciones</b>	43	-

**Tabla 4.3:** Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 1



**Figura 4.28:** Inspección visual de Bobina 1

Bobina 2		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	2	CONFIG 1 CONFIG 3
Sensibilidad	10	Cables Conectores Superficie de contacto
Falla inducida	24	Pérdida cinta semiconductor
<b>Total mediciones</b>	36	-

**Tabla 4.4:** Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 2



Figura 4.29: Inspección visual de Bobina 2



Figura 4.30: Bobina 2 - falla preexistente

Bobina 3		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	8	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	8	Cables Superficie de contacto Mala conexión
Falla inducida	10	Cortocircuito entre hebras
<b>Total mediciones</b>	26	-

Tabla 4.5: Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 3



Figura 4.31: Inspección visual de Bobina 3



Figura 4.32: Bobina 3 - falla preexistente

Bobina 4		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	3	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	9	Cables Conectores
Falla inducida	0	-
<b>Total mediciones</b>	12	-

Tabla 4.6: Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 4



Figura 4.33: Inspección visual de Bobina 4

Bobina 5		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	3	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	9	Cables Conectores
Falla inducida	24	Pérdida cinta semiconductor
<b>Total mediciones</b>	<b>36</b>	-

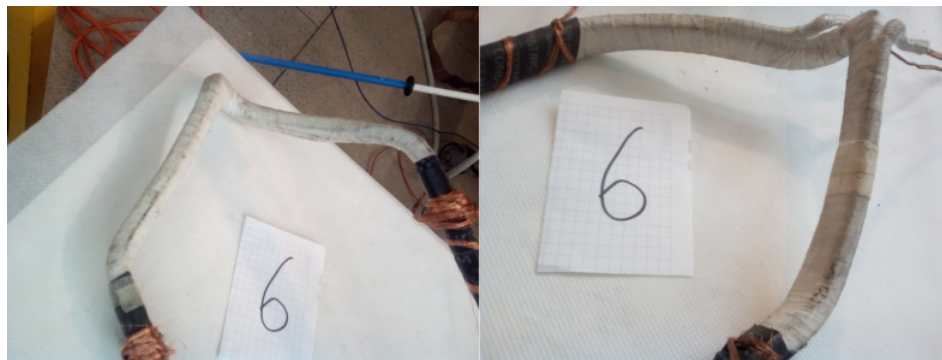
Tabla 4.7: Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 5



Figura 4.34: Inspección visual de Bobina 5

Bobina 6		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	4	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	20	Cables Conectores Superficie de contacto
Falla inducida	24	Contaminación superficial Flexión
<b>Total mediciones</b>	36	-

**Tabla 4.8:** Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 6



**Figura 4.35:** Inspección visual de Bobina 6

Bobina 7		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	3	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	10	Cables Conectores Mala conexión
Falla inducida	6	Contaminación superficial
<b>Total mediciones</b>	19	-

**Tabla 4.9:** Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 7

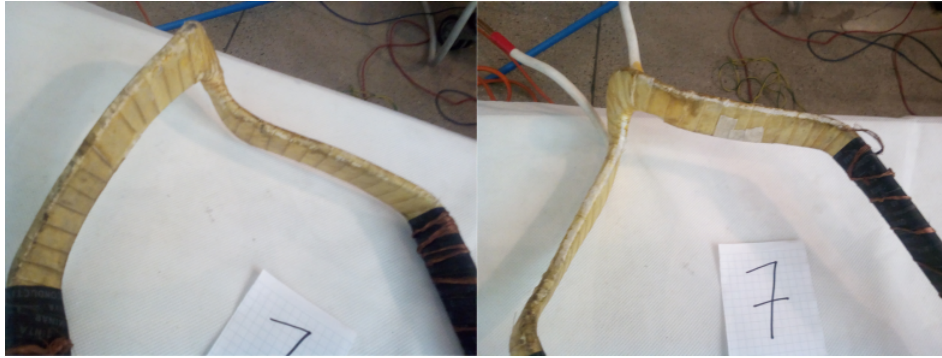


Figura 4.36: Inspección visual de Bobina 7

Bobina 8		
Tipo de medición	Cantidad mediciones	Descripción
Caso base	2	CONFIG 1 CONFIG 2 CONFIG 3
Sensibilidad	9	Cables Conectores
Falla inducida	15	Contaminación superficial
<b>Total mediciones</b>	<b>26</b>	-

Tabla 4.10: Especificaciones de ensayos realizados en Bobina 8

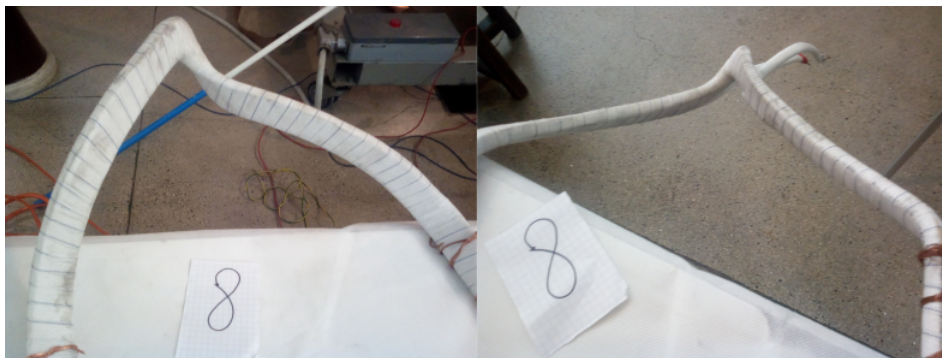


Figura 4.37: Inspección visual de Bobina 8

## 4.6. Estructura de la base de datos

### 4.6.1. Organización y manejo de datos

El orden de la información experimental se estructura mediante un esquema de tres niveles, como se presenta en la figura 4.38.

- El **primer nivel** comprende las mediciones FRAX101 en formato de exportación del software (.frax o .txt), las cuales se generan empleando nomenclatura temporal estándar [año-mes-día][hh.mm.ss][id-bobina][tipo-ensayo].frax. El archivo exportado constituye el resultado de un “Ensayo” según la nomenclatura del software, definido como un conjunto de mediciones o barridos que comparten una característica común, conforme a las definiciones establecidas en la sección 4.2.2.
- El **segundo nivel** consiste un índice de mediciones (archivo .csv), que establece la correspondencia entre el nombre original de la medición con las variables de caracterización experimental: bobina, superficie de contacto, configuración, conector, variación, falla inducida, etapa y observaciones relevantes.
- El **tercer nivel** es una consolidación de las mediciones (archivo .csv), en forma de base de datos (f, E1, E2, E3...E246) donde se registran todos los datos de magnitud y frecuencia exportados desde el software. Esta estructura facilita la trazabilidad y gestión eficiente del volumen de datos generado, para cálculos y análisis futuros.

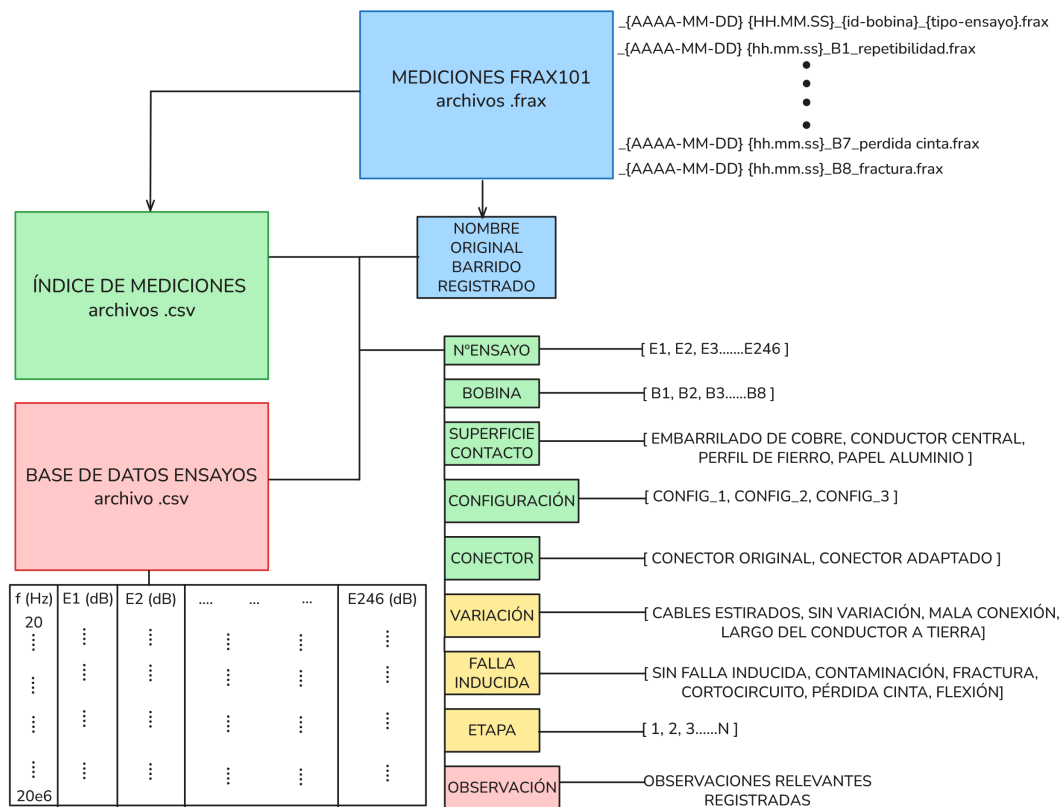


Figura 4.38: Estructura y flujo general de base de datos

#### 4.6.2. Cantidad total de mediciones realizadas

La base de datos experimental contempla un total de 246 ensayos (E1-E246) distribuidos entre las diferentes categorías de análisis. La matriz experimental incluye:

- **Casos base:** 40 mediciones.
- **Casos de validación:** 91 mediciones para repetibilidad y variabilidad instrumental.
- **Casos de falla inducida:** 115 mediciones en etapas graduales de severidad

#### 4.6.3. Consolidación de protocolos experimentales

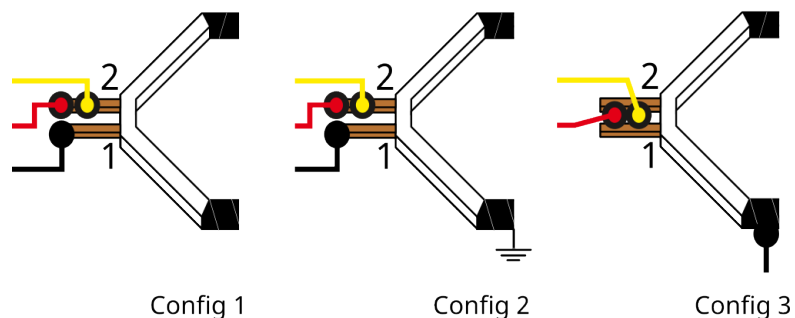
El proceso de medición en el laboratorio contempló un volumen significativamente superior a las 246 mediciones en la base de datos final. La fase inicial del trabajo de laboratorio incluyó múltiples sesiones de familiarización con el instrumento FRAX101, pruebas de conectividad, validación de configuraciones de software y ensayos fallidos que convergieron en la definición de los protocolos descritos en este capítulo.

# Capítulo 5

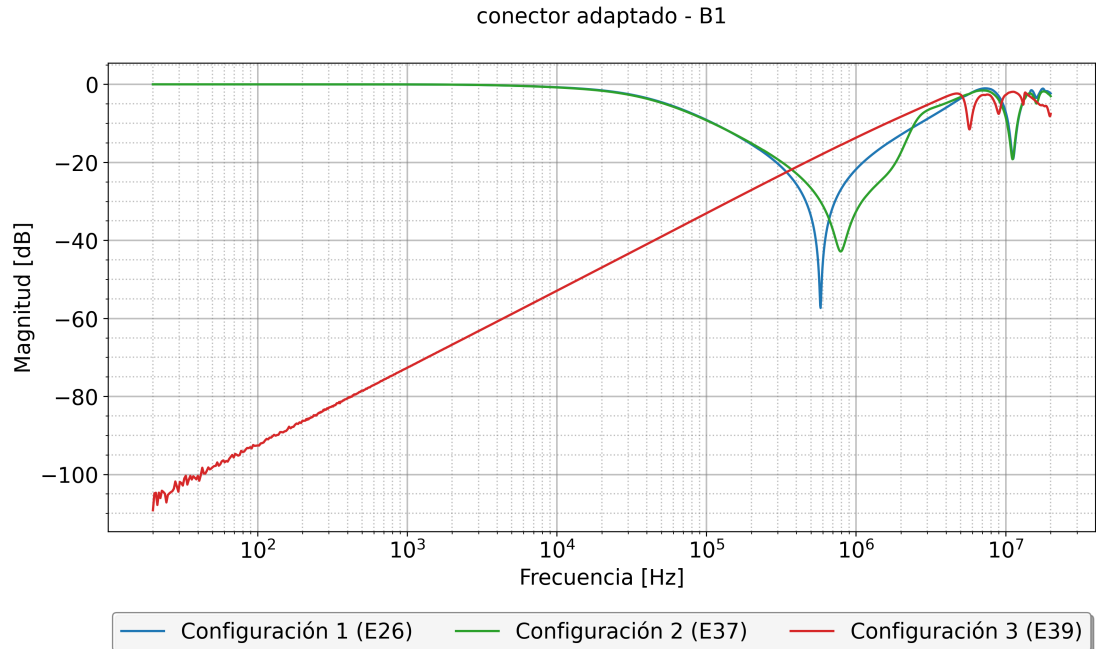
## Caracterización visual y análisis de sensibilidad de la medición

### 5.1. Caracterización visual de respuesta FRA

La figura 5.2 muestra una comparación preliminar de la bobina B1, medida bajo las tres configuraciones de conexión establecidas en el Capítulo 4 y resumidas en la figura 5.1. La Configuración 1 corresponde a la medición directa entre terminales, mientras que la Configuración 2 incorpora la conexión del aislamiento principal a tierra. Por su parte, la Configuración 3 implementa una conexión puramente capacitiva establecida entre los terminales y el aislamiento principal del sistema.



**Figura 5.1:** Esquemas de configuración de medida  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.2:** Curvas de respuesta a la frecuencia - comparación entre configuraciones de conexión

Las probetas sometidas a ensayos de validación se evalúan empleando exclusivamente contacto de ranura con embarrilado de cobre, estableciendo así un protocolo estandarizado para la obtención de resultados comparables. La metodología experimental incorpora conectores adaptados como elemento estándar de medición. Esta configuración se mantiene constante para el conjunto de ensayos, exceptuando las evaluaciones específicas destinadas al análisis comparativo del comportamiento ante diferentes sistemas de conexión.

En función de la respuesta a la frecuencia obtenida de la probeta inicial, se procede a la identificación y caracterización de las zonas distintivas para el conjunto de bobinas ensayadas. Se obtiene que las bobinas evaluadas muestran respuestas similares en su comportamiento frecuencial, a pesar de ser distintas, las cuales se caracterizan según los criterios establecidos a continuación.

### 5.1.1. Zonas de frecuencia característica - Configuración 1

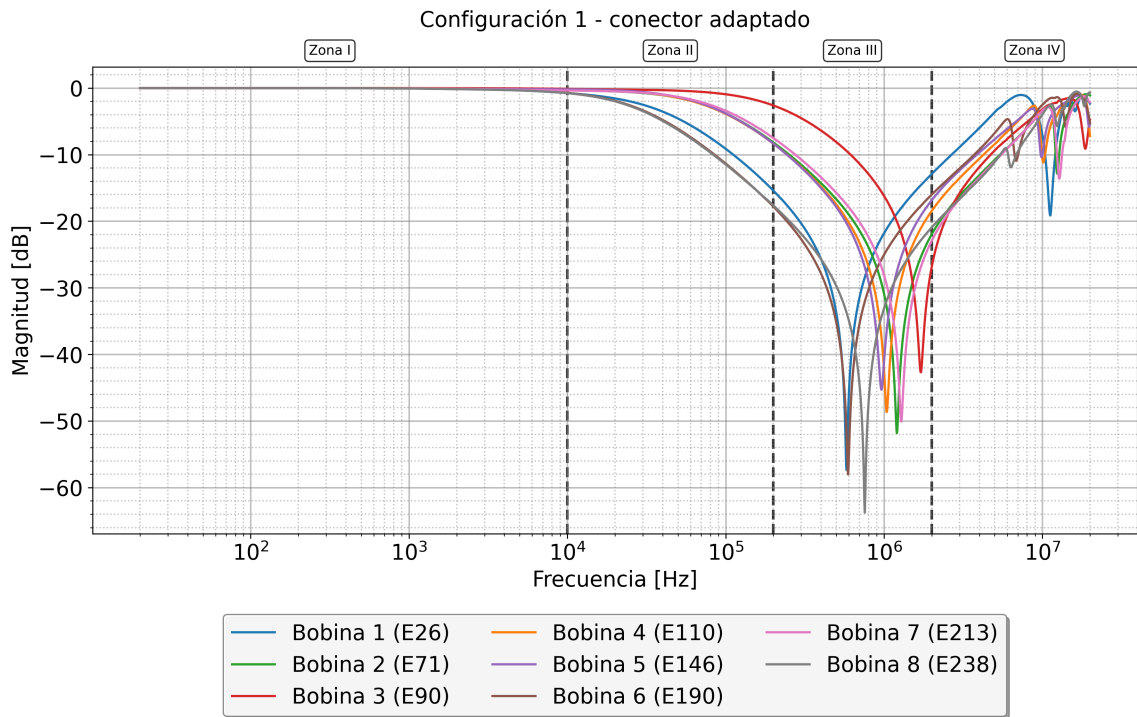


Figura 5.3: Curvas de respuesta a la frecuencia - configuración 1

La figura 5.3 presenta las curvas de respuesta en frecuencia medidas para la configuración 1 en las ocho probetas ensayadas. El análisis de estos resultados permite identificar cuatro zonas distintivas.

- **Zona I - Inductiva:** El punto donde comienza la atenuación es común para todas las bobinas medidas y se presenta aproximadamente a los 10 kHz. Se evidencia como posible zona a considerar útil para normalizar diferencias mecánicas severas en la bobina al presentar poca variabilidad entre probetas de distintas dimensiones y clases de aislación. En su respuesta predomina la inductancia de los devanados.
- **Zona II - Interacción:** Entre 10 kHz y 200 kHz se observa una transición gradual donde comienzan a manifestarse las primeras interacciones entre inductancia y capacitancia serie. Las curvas mantienen un comportamiento similar entre probetas.
- **Zona III - Resonancia principal:** El rango comprendido entre 200 kHz y 2 MHz muestra la mayor variabilidad entre bobinas, manifestando una resonancia principal definida en aproximadamente 1 MHz. Esta zona, correspondiente al tamaño de una década frecuencial, se utiliza para analizar el punto de inflexión más significativo de la respuesta del sistema.
- **Zona IV - Altas frecuencias:** Por encima de 2 MHz el comportamiento se vuelve predominante capacitivo, con múltiples resonancias secundarias. Se observan diferencias significativas entre probetas, por lo que en esta zona se pretende determinar el límite

interpretable, considerando que es donde influye mayormente la configuración del sistema de medición.

### 5.1.2. Zonas de frecuencia característica - Configuración 2

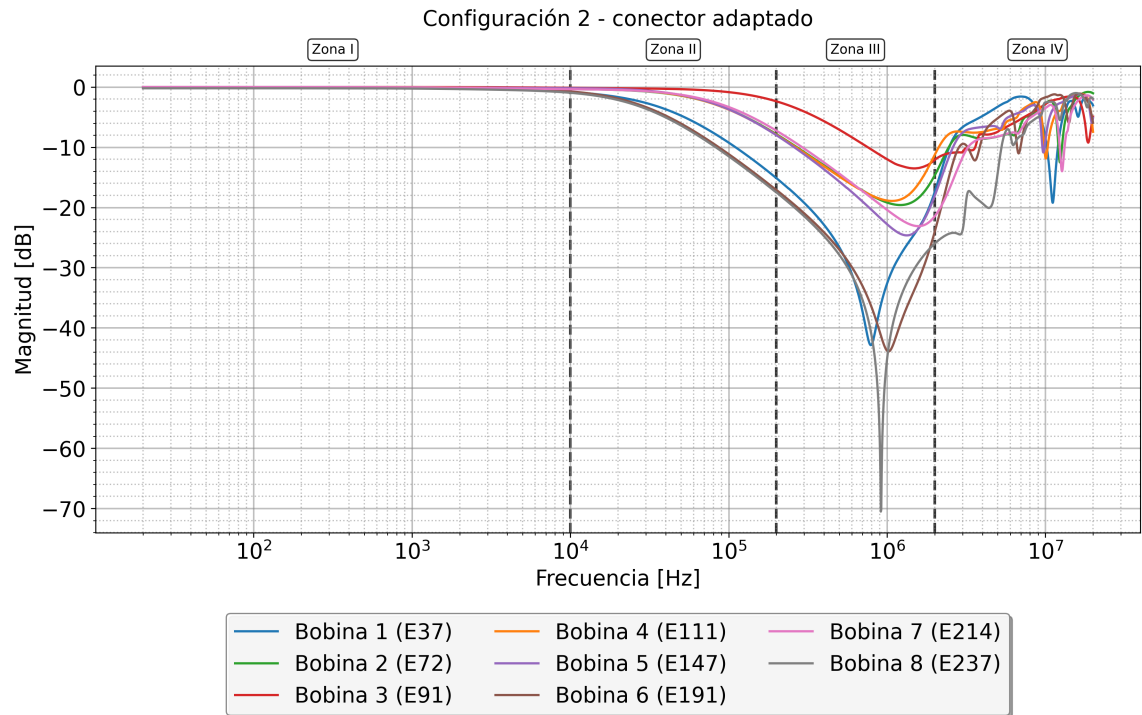


Figura 5.4: Curvas de respuesta a la frecuencia - configuración 2

- **Zona I - Inductiva:** Similar comportamiento a la configuración 1, la conexión a tierra del aislamiento principal no afecta significativamente esta zona de bajas frecuencias.
- **Zonas II - III:** La influencia del camino adicional de corriente, generado por la conexión de capacitancia a tierra, produce una menor atenuación de la respuesta en la zona de interacción y se acentúa en la zona de resonancia principal. Este fenómeno ocasiona un desplazamiento del punto de resonancia hacia frecuencias mayores.
- **Zona IV - Altas frecuencias:** Las altas frecuencias muestran un comportamiento similar a la configuración 1, pero con menor atenuación leve debido al efecto de la capacitancia a tierra.

### 5.1.3. Resonancias Características - Configuraciones 1 y 2

En la tabla 5.1 se presenta una tabla comparativa de las magnitudes y frecuencias de resonancias para las configuraciones 1 y 2.



- **Zona III - Altas frecuencias:** Por encima de 2 MHz se observa una transición hacia un comportamiento más complejo, con aparición de resonancias menores.

### 5.1.5. Comportamiento atípico de probetas (caso B8)

- Se visualiza un comportamiento atípico en la bobina B8 para las tres configuraciones ensayadas, lo cual se tiene en cuenta para siguientes análisis. Este comportamiento evidencia la influencia que tiene la falta del proceso de fabricación, el curado de la bobina, en la respuesta obtenida. Se documenta que entre las configuraciones 1 y 2 la resonancia principal no se atenúa como en los demás casos, sino que al contrario se acentúa, además se obtiene menor desplazamiento hacia las altas frecuencias. En la configuración 3 se diferencia notablemente de las demás probetas, marcando un comportamiento clave para detectar problemas de fabricación en el proceso de impregnación o deterioro mecánico externo.

## 5.2. Análisis de estabilidad ante factores experimentales

### 5.2.1. Sensibilidad a configuración de cables coaxiales

La evaluación de la sensibilidad frente a variaciones en la disposición de cables coaxiales representa un aspecto fundamental para determinar la confiabilidad del método FRA. De acuerdo con el documento Cigre TB 812, las modificaciones en la geometría de la configuración del cableado introducen impedancias parasitarias, consecuencia del acoplamiento electromagnético, que comprometen la reproducibilidad de las mediciones, especialmente en la zona de altas frecuencias donde predomina el comportamiento capacitivo.

A continuación se describen las principales consideraciones tomadas en este ensayo.

- **Configuración cables enrollados:** Los cables coaxiales se mantienen en disposición enrollada, como se muestra en la figura . Se considera este como el estado de referencia.
- **Configuración cables estirados:** Los cables se extienden de manera parcial, como se muestra en la figura 5.6. En este caso se tuvieron limitaciones de espacio para estirar completamente los cables, por lo que el estiramiento máximo fue llevar la probeta fuera de la cabina blindada, una distancia aproximada de 15 metros.
- Cada configuración se evalúa manteniendo constantes los demás parámetros experimentales: conectores adaptados, embarrilado de cobre según el protocolo establecido en la sección 4.3.
- Para futuras mediciones, se establece como disposición de referencia la configuración con cables enrollados, debido a las limitaciones espaciales del laboratorio. No obstante, la metodología ideal de medición requiere el tendido completo de los conductores, conforme a las guías técnicas vigentes.



**Figura 5.6:** Disposición cables enrollados.



**Figura 5.7:** Disposición cables estirados.

La figura 5.8 presenta una gráfica FRA representativa de la medición de sensibilidad correspondiente a la configuración 1 y bobina B1. El comportamiento se describe según las zonas establecidas en la sección 5.1, desarrollándose el siguiente análisis.

### Configuración 1

- **Zona I - Inductiva:** Las diferencias entre configuraciones son mínimas, con desviaciones inferiores a 2 *dB* en el límite de zona. La zona permanece inalterada ante variaciones en la disposición de cables.
- **Zona II - Interacción:** Se observan variaciones mínimas en el comportamiento general. La probeta B5 (figura A.1) registra la mayor desviación en esta zona específica, aunque menor. No obstante, dicho comportamiento no constituye un patrón representativo del conjunto.
- **Zona III - Resonancia principal.** Esta zona se observa inalterada. La única probeta que presenta una desviación perceptible en su resonancia principal es la probeta B6 (figura A.2), que con cables estirados presenta un desplazamiento vertical atenuado.
- **Zona IV - Altas frecuencias:** Las diferencias se intensifican a partir de aproximadamente 5 MHz. Los probetas B1 y B5 registran las variaciones más significativas en términos visuales; sin embargo, estas fluctuaciones corresponden a magnitudes reducidas en decibeles. Este comportamiento evidencia una estabilidad satisfactoria para la configuración analizada respecto a la disposición de conductores, especialmente considerando que esta zona de frecuencias constituía el rango donde se anticipaban las mayores variaciones según los fundamentos teóricos.
- **Observaciones probeta B8.** La probeta B8 (figura A.3), caracterizada por la ausencia de proceso de curado, se mantiene dentro de la tendencia observada en el conjunto de bobinas evaluadas. Las variaciones registradas resultan prácticamente imperceptibles en la totalidad de las bandas de frecuencia analizadas.
- **Observaciones probetas B2 y B3.** De igual forma las probetas B2 y B3, las cuales se recibieron con falla en el aislamiento principal, se mantienen con la misma tendencia, por lo que se concluye que la falla no es susceptible a la sensibilidad de cables.

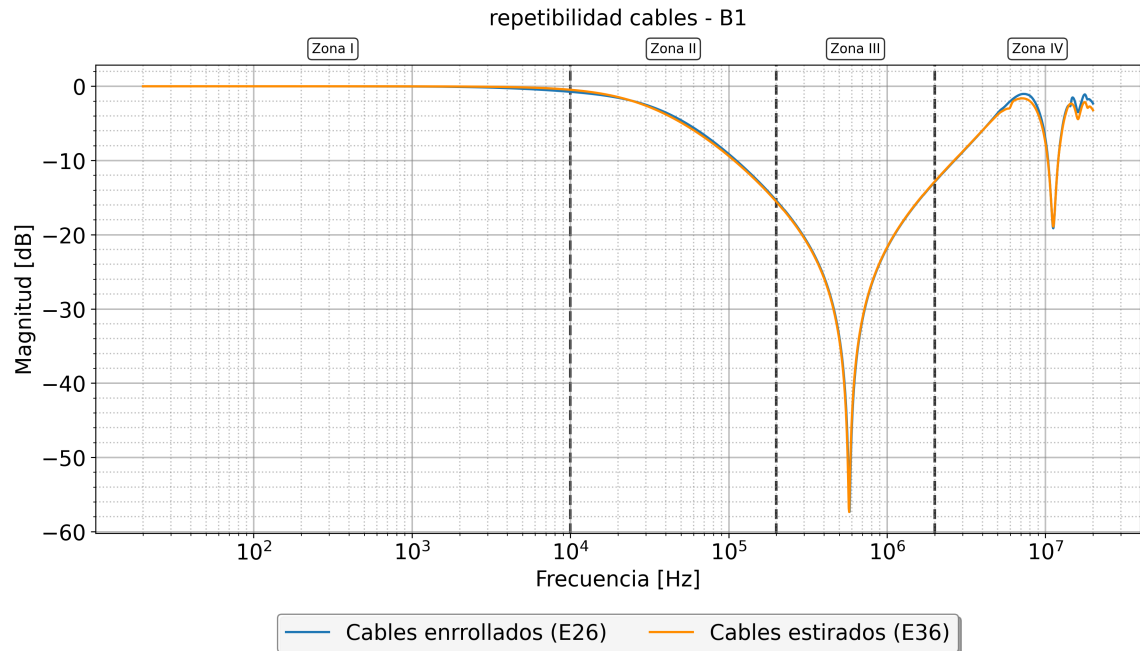


Figura 5.8: FRA - configuración 1 - sensibilidad de cables - B1

## Configuración 2

Con respecto a la configuración 2 se tienen las siguientes observaciones de la figura 5.9:

- **Zona I - Inductiva:** Al igual que la configuración 1, permanece inalterada.
- **Zona II - Interacción:** En la probeta B5 de la figura 5.9 se visualiza variación, sin embargo no es la tendencia general, la cual permanece inalterada en todos los demás casos analizados.
- **Zona III - IV.** En estas zonas se observa la mayor variación para todas las probetas medidas. Esta configuración se considera reproducible hasta aproximadamente 1 MHz. En estas bandas de frecuencia la probeta B8, la cual es la probeta de control respecto al aislamiento principal, describe una atenuación vertical de sus resonancias principal en la configuración de cables estirados, sin tener desplazamiento horizontal.

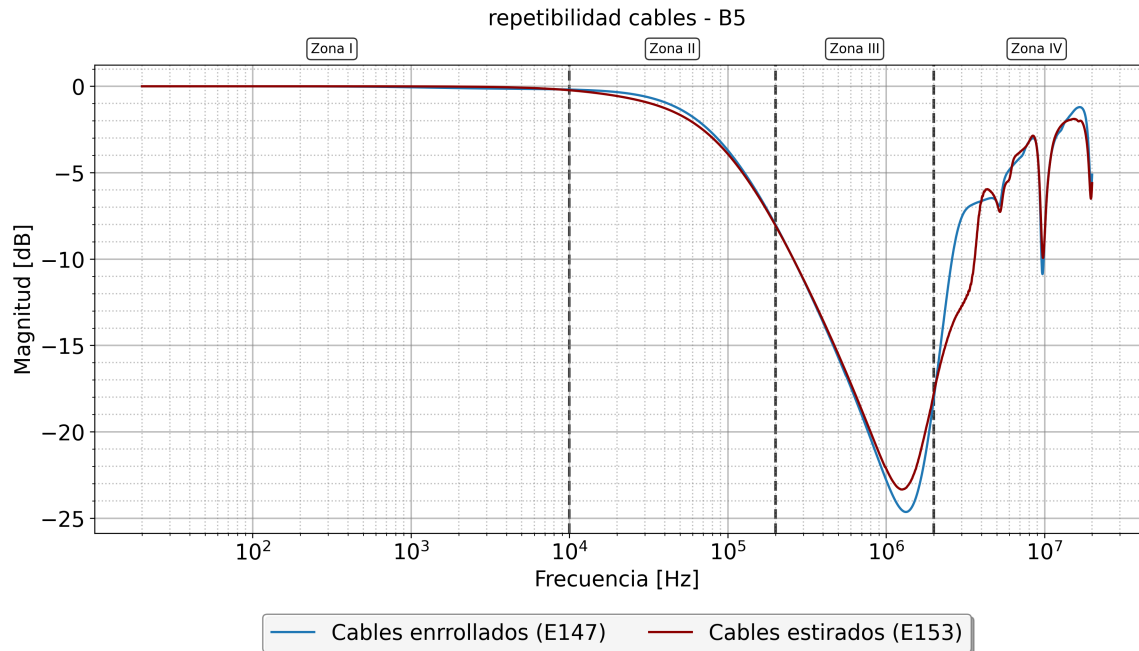


Figura 5.9: FRA - configuración 2 - sensibilidad de cables - B5

### Configuración 3

A continuación se analiza la configuración 3 que se muestra en la figura 5.10.

- **Zona I - Oscilante:** Esta zona presenta variaciones leves. El ejemplo de la probeta B8 mostrado es el que presenta mayor variabilidad. Esta banda muestra baja repetibilidad ya el orden de magnitud es cercano al rango dinámico del instrumento por lo que siempre se verá afectado.
- **Zona II - Lineal:** Esta banda de frecuencias se muestra prácticamente inalterable por lo que se considera de repetibilidad apta para futuras comparaciones en el diagnóstico. El único caso que discrepa es el de la probeta B5 que tiene leves variaciones en esta zona.
- **Zona III - Altas frecuencias:** Este zona mantiene variaciones en todas las probetas medidas, sin embargo el nivel de repetibilidad es mayor que el de la zona I al tener menor nivel de ruido considerando el bajo nivel de atenuación, menor a 20 dB.

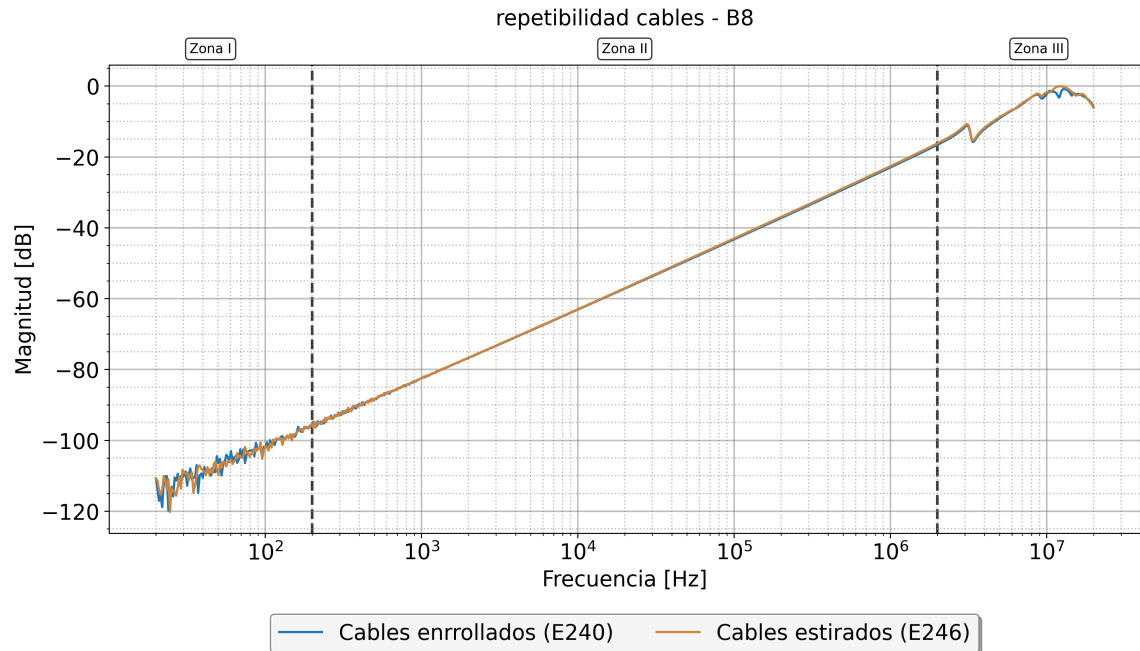


Figura 5.10: FRA - configuración 3 - sensibilidad de cables - B8

### 5.2.2. Evaluación de sistemas de conexión (conectores)

La sensibilidad a la variación de los conectores, como se menciona en el capítulo 4, se origina en la necesidad de adaptar el sistema de medición al contexto del tipo de probeta ensayada. La comodidad y maniobrabilidad durante la conexión y desconexión, junto con la estabilidad en el montaje de la bobina, resultan fundamentales para la implementación de este sistema. Esta comparación se utiliza, además, como método para evaluar la variabilidad de la prueba FRA ante la disminución del apriete, sujeción o calidad de la conexión, representada físicamente por la resistencia de contacto. En las figuras 5.11 y 5.12 se observa que ambos métodos de conexión emplean conectores de pantallas tipo malla, debido a que los originales del instrumento FRAX101 presentan excesivo peso o longitud insuficiente para alcanzar la toma a tierra del laboratorio. Adicionalmente, estos conectores originales comprometen la estabilidad de la probeta sobre la mesa de trabajo.

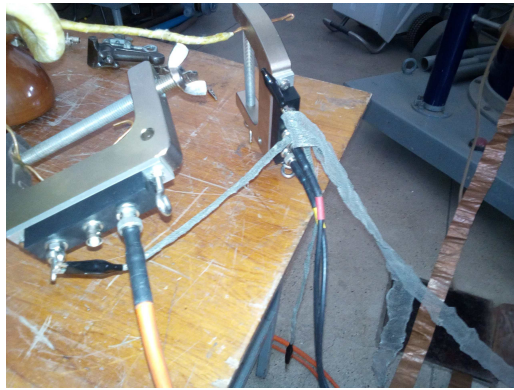


Figura 5.11: Sistema de medición con conector original.



Figura 5.12: Sistema de medición con conector adaptado.

### Configuración 1

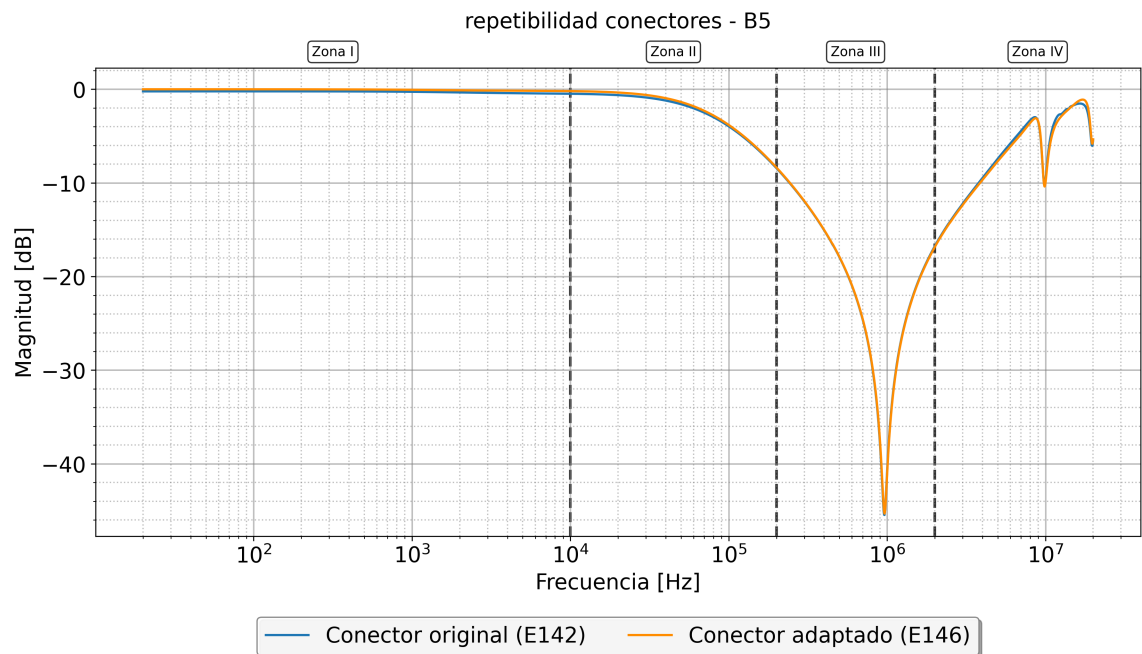


Figura 5.13: FRA - configuración 1 - sensibilidad conectores - B5

- **Zona I - II:** Se detecta una diferencia menor a 1 dB entre los conectores, la cual permanece constante en ambas zonas evaluadas. Este comportamiento resulta coherente con la prueba de cero decibel efectuada al inicio del procedimiento, donde la configuración con el conector adaptado presenta menor atenuación que el conector original.
- **Zona III - Resonancia principal:** No se observan diferencias visuales en esta zona

para las probetas analizadas. La zona presenta alta estabilidad frente a la variación del conjunto conector-cables.

- Zona IV - Altas frecuencias:** En esta zona se presenta escasa variación, con excepción de las probetas B4 y B7 (figuras A.4 y A.5), donde se detectan mayores fluctuaciones. Este tipo de sensibilidad mantiene menor variabilidad que la correspondiente a la disposición de cables. No se evidencia desplazamiento, únicamente atenuación de la curva para la configuración con conector original.

## Configuración 2

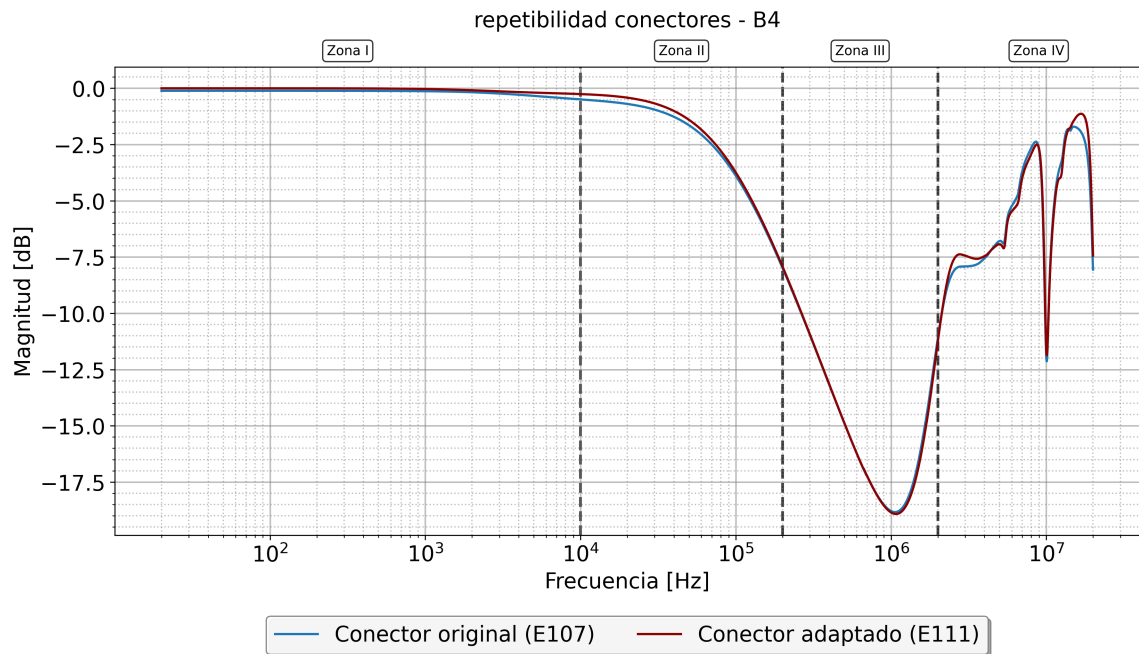


Figura 5.14: FRA - configuración 2 - sensibilidad conectores - B4

- Zona I - II:** En comparación con la configuración 1, la variación en estas zonas se incrementa levemente, evidenciándose más la atenuación en el comportamiento con el conector original.
- Zona III - Resonancia principal:** Se identifica como la zona más estable frente a la variación de conectores cuando se realiza el aterrizamiento del aislamiento principal. Zona de resonancia principal no es susceptible a la variación de la resistencia de contacto.
- Zona IV - Altas frecuencias:** El rango de las altas frecuencias presenta la variación más visible, sin mostrar desplazamiento, aunque se evidencia una notable atenuación en la medición del conector original respecto al adaptado.

El análisis cuantitativo de la configuración II se aborda como falla inducida de aterrizamiento de aislamiento principal en el Capítulo 6.

**Configuración 3**

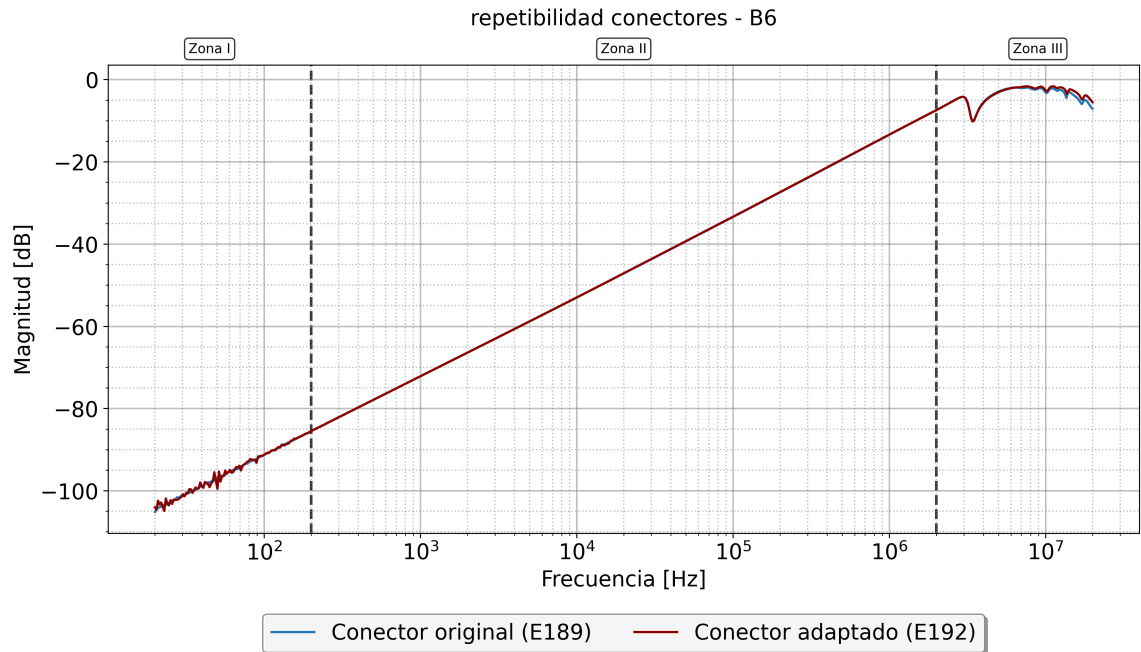


Figura 5.15: FRA - configuración 3 - sensibilidad conectores - B6

- **Zona I - Oscilante:** Zona que aparentemente no exhibe variaciones notables; sin embargo, al presentar un comportamiento con componente de ruido, se considera no utilizable para diagnóstico debido a la influencia del rango dinámico cercano a 130 dB.
- **Zona II - Lineal:** Zona completamente estable ante la variación de conectores.
- **Zona III - Altas frecuencias:** En este rango de frecuencias, al igual que en las configuraciones 1 y 2, se detecta menor variabilidad que en la prueba de sensibilidad de cables.

# Capítulo 6

## Análisis de patrones de falla

### 6.1. Superficie de contacto de ranura

Con el fin de simular las condiciones de instalación de la bobina en la ranura, se proponen los siguientes casos de sensibilidad. Las bobinas B1, B3 y B6 se someten a las siguientes variaciones de la superficie de contacto:

#### 6.1.1. Embarrilado de cobre

Se aplica un embarrilado con conductor de cobre desnudo y filamentado y se conectan ambas piernas de la bobina en el centro. Las vueltas del conductor se realizan con un espaciamiento de 3 a 5 *cm* aproximadamente, como muestra la figura 6.1.

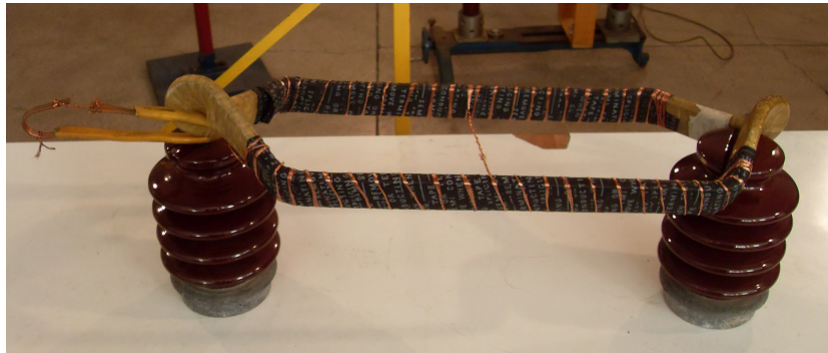


Figura 6.1: Montaje de bobina con embarrilado de cobre

#### 6.1.2. Conductor central

Las piernas de la bobina solo quedan unidas por un conductor de cobre desnudo en la parte central, como muestra la figura 6.2. Esta configuración es prácticamente la ausencia de superficie de contacto.



Figura 6.2: Montaje de bobina unión de conductor central

### 6.1.3. Papel aluminio

Las piernas de la bobina son envueltas con papel aluminio (*foil*) y unidas mediante un conductor de cobre central, como muestra la figura 6.3.



Figura 6.3: Montaje bobina con papel aluminio

#### 6.1.4. Perfiles de hierro

Mediante prensas se fijan dos perfiles en ángulo recto en cada una de las piernas de la bobina unidas en el centro a través de un conductor de cobre. Cada perfil tiene 40 *mm* de lado y un espesor de 3 *mm*, como se ilustra en la figura 6.4.



Figura 6.4: Montaje bobina con perfiles de hierro

#### 6.1.5. Núcleo de hierro laminado

Se montan tres núcleos de transformador de forma equidistante en cada pierna de la bobina. Estos núcleos son hechos de laminas de acero esmaltado. Se conectan todos mediante un conductor de cobre.



Figura 6.5: Montaje de bobina con en núcleo de hierro laminado

Nota: Esta configuración solo se realizó con la bobina B1, por motivos de disponibilidad del laboratorio.

### 6.1.6. Caracterización del FRA según superficie de ranura

#### 6.1.6.a. Configuración 1

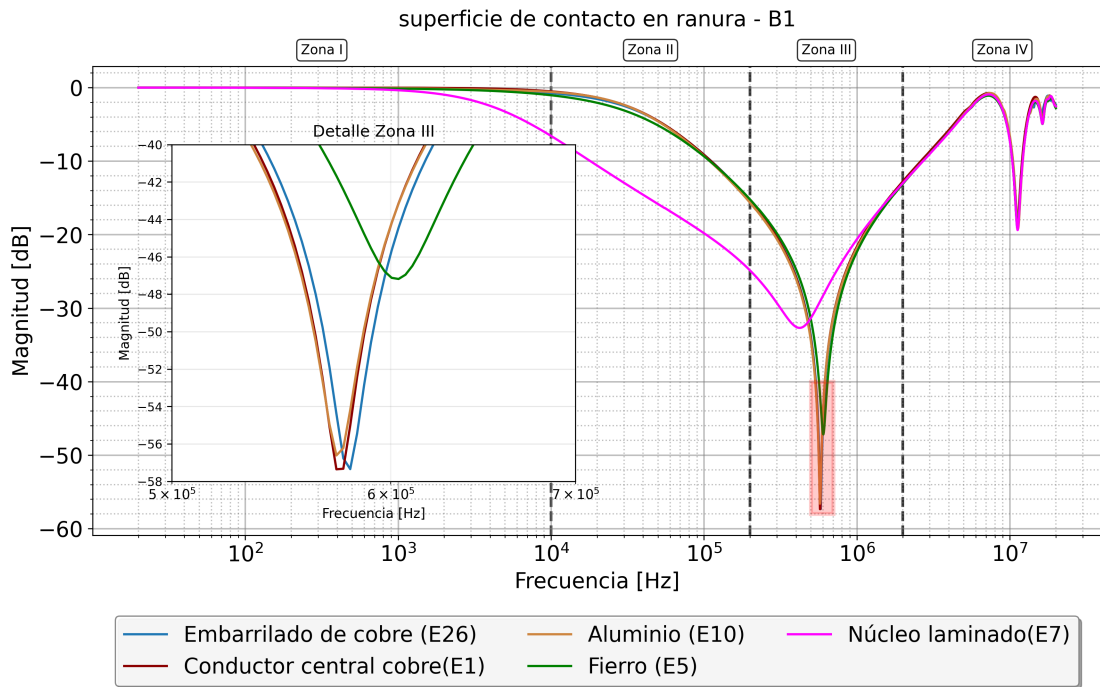


Figura 6.6: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 1 - B1

En el gráfico 6.6 se observa la comparación de la respuesta en frecuencia para el análisis de sensibilidad del material de superficie de contacto de ranura simulado. Se evidencian diferencias mínimas entre el embarrilado de cobre (referencia), el conductor central y el papel aluminio. Las variaciones más significativas se presentan con los perfiles y núcleos de hierro laminado. Los perfiles de hierro generan un desplazamiento vertical que reduce la atenuación de la señal y un leve desplazamiento horizontal hacia las frecuencias altas. En contraste, el núcleo de hierro laminado produce un desplazamiento hacia las frecuencias bajas, que se relaciona con el incrementando de la inductancia efectiva del sistema. En la figura A.7 del anexo se realiza la comparación para la probeta B6 y se detecta el mismo comportamiento, la superficie de perfiles de hierro desplaza la curva verticalmente en unos 10 dB aproximadamente. Se destaca poca variabilidad en la zona IV de altas frecuencias.

La respuesta de la probeta B3, presentada en la figura A.6 del anexo, constituye una anomalía en la medición de sensibilidad. Las curvas de comparación se alejan considerablemente de la referencia establecida. Esta bobina presenta una falla en su aislamiento principal, según se indica en la sección 4.5.1 y se evidencia en la **figura XX**. Por esta razón, se considera que los materiales de simulación de ranura durante el ensayo establecieron contacto en la zona de las espiras, generando esta respuesta anómala. Los análisis posteriores compararán estos resultados con la respuesta de cortocircuito de bobina.

6.1.6.b. Configuración 2

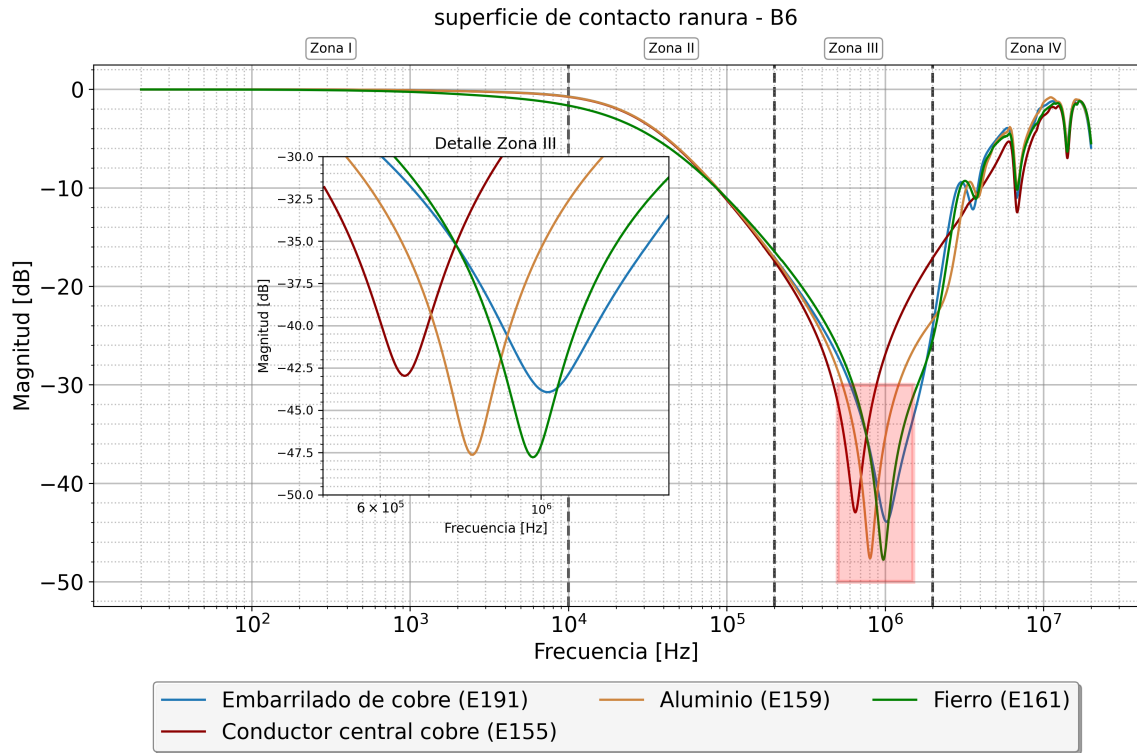


Figura 6.7: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 2 - B6

En la figura 6.7 se observa que la configuración 2 de medición amplifica la visualización de la variación entre los materiales evaluados, generando mayor sensibilidad visual en la detección de anomalías. En este escenario, la bobina aterrizada aumenta la interacción con el aislamiento principal, provocando que las propiedades de los materiales y el nivel de contacto reflejen sus diferencias mediante el desplazamiento de la frecuencia principal hacia la zona inductiva. El embarrilado de cobre representa el contacto más homogéneo, seguido por el hierro y el aluminio que, debido a sus imperfecciones microscópicas, no establece contacto en toda el área, reflejando una disminución del contacto. Finalmente, el conductor central representa prácticamente cero contacto con la ranura. Se concluye que mientras menos contacto en la ranura la respuesta se va deslizando hacia la zona de las bajas frecuencias.

6.1.6.c. Configuración 3

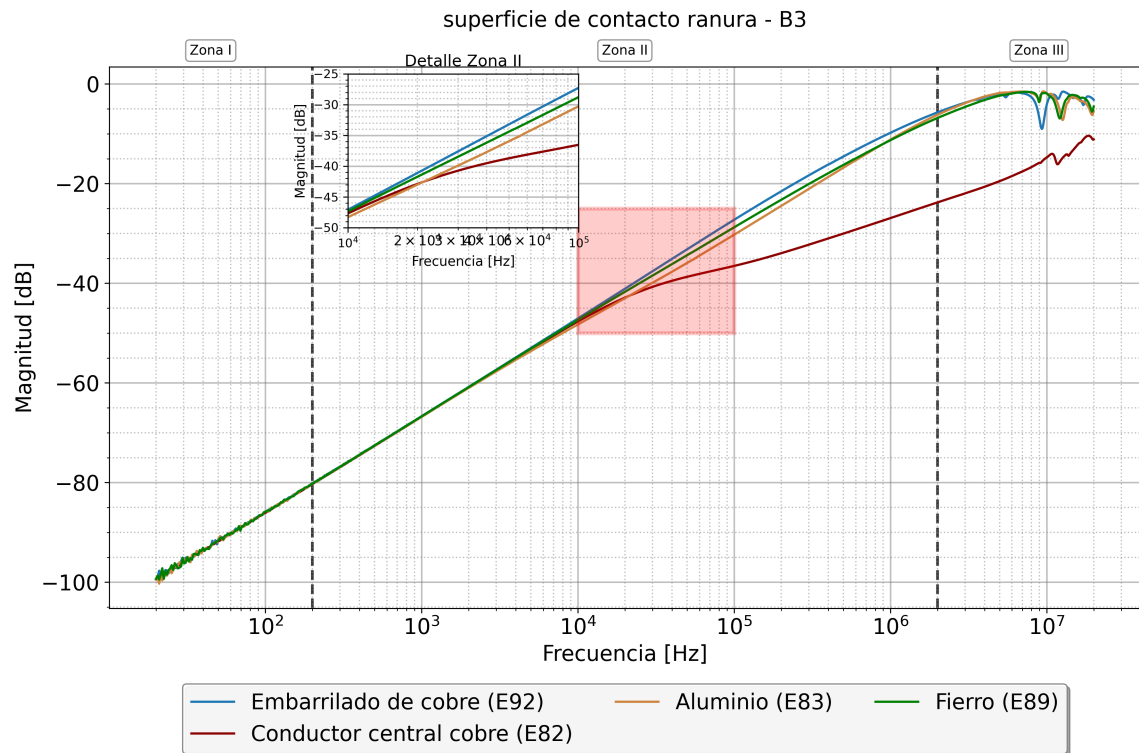


Figura 6.8: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 3 - B3

La figura 6.8 ilustra la curva FRA para la configuración de medición 3. Las tres probetas presentan el mismo patrón de comportamiento (figuras A.10 y A.11), evidenciando escasa variación entre los materiales evaluados. El único caso que se diferencia corresponde al conductor central, lo cual indica que la medición se efectúa directamente sobre la cinta semiconductora, provocando un punto de inflexión que modifica la pendiente en la zona lineal. El caso de conductor central representa una distribución no uniforme extrema del contacto de ranura, lo que puede reflejar en el diagnóstico un deterioro localizado en la bobina.

## 6.2. Fallas que afectan la topología del circuito de medición

### 6.2.1. Falla aislamiento principal a tierra

La figura 6.9 presenta la comparación entre las respuestas de las configuraciones 1 y 2, correspondientes a la conexión de la bobina a tierra. Ambas configuraciones han sido descritas y empleadas como objeto de estudio en la mayoría de las sensibilidades analizadas. Desde la perspectiva de falla, se observa que el patrón se caracteriza por un desplazamiento hacia las altas frecuencias, impactando principalmente las zonas III y IV. La única excepción corresponde al caso de la bobina B8, que debido a deficiencias en el proceso de fabricación presenta una respuesta de falla a tierra que atenúa aún más su resonancia principal, en lugar de suavizar la curva (ver figura A.12) como se observa en las demás probetas con aislamiento principal curado.

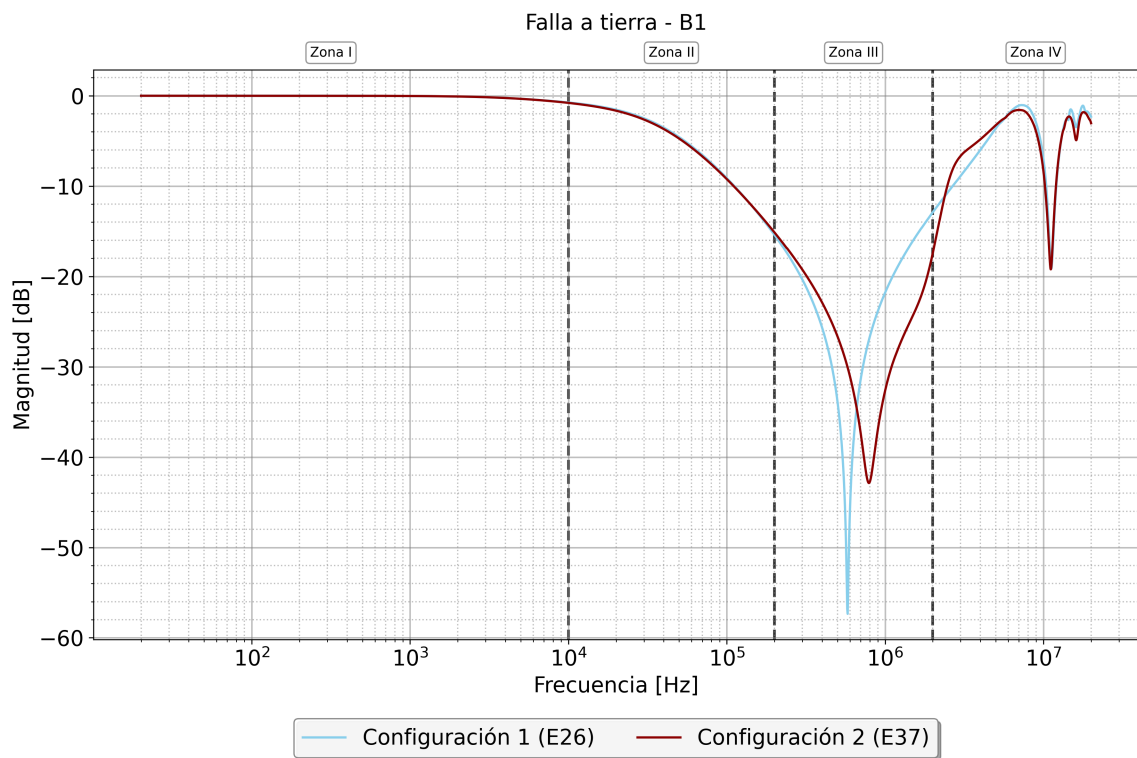


Figura 6.9: Comparación FRA falla a tierra - B1

### 6.2.2. Cortocircuito entre vueltas

Para realizar la prueba de cortocircuito se desprende una sección de aislamiento principal en la bobina, dejando a la vista las vueltas de cobre. Luego se sueldan pequeños conductores a cada una de las hebras de la bobina. El objetivo de este ensayo es emular el deterioro del aislamiento entre vueltas o hebras [5].

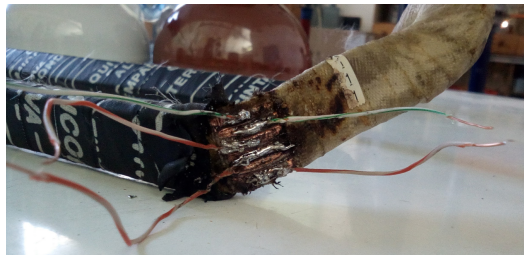
El ensayo consta de dos partes:

1. Se realizan cortocircuitos entre hebras consecutivas mediante conductores de baja resistencia ( $\approx 0$ ). Se identifican 6 vueltas por lo que las etapas que se miden son las

siguientes:

- Etapa 1: Cortocircuito entre vueltas 1-2.
- Etapa 2: Cortocircuito entre vueltas 2-3.
- Etapa 3: Cortocircuito entre vueltas 3-4.
- Etapa 4: Cortocircuito entre vueltas 4-5.
- Etapa 5: Cortocircuito entre vueltas 5-6.

2. Se repite el procedimiento anterior pero mediante una resistencia de  $4.5\Omega$ .



**Figura 6.10:** Bobina dispuesta con seis bornes cortocircuitables.



**Figura 6.11:** Ejemplo de cortocircuito con resistencia de  $4.5\Omega$ .

En la figura 6.10 se presenta el patrón de falla correspondiente al cortocircuito sin resistencia entre hebras para la probeta B3. Se corrobora la falla preexistente en la bobina B3 al momento de su recepción, detectándose que el cortocircuito se localiza entre las vueltas 4 y 6. La gráfica muestra que la respuesta para las etapas 4 y 5 resulta idéntica. Además, en la figura 6.11, donde se aplica el cortocircuito con resistencia, la respuesta permanece inalterada para ambas etapas. El patrón de falla en la prueba de cortocircuito disminuye la atenuación de la respuesta de manera progresiva conforme se conecta cada par consecutivo de hebras. A diferencia de la falla de aislamiento principal a tierra mostrada en la figura 6.9, en el cortocircuito entre hebras se conserva la forma de la curva debido a que se mantiene la topología del sistema, variando únicamente la relación R-L. En contraste, la falla externa a tierra presenta desplazamiento acompañado de deformación, dado que la energía privilegia el camino de baja impedancia  $C_g$ , reduciendo así la interacción de la capacitancia serie  $C_s$ .

Por otra parte, esta medición también explica el comportamiento anómalo del ensayo de superficie de contacto de ranura en la probeta B3, que presenta falla de cortocircuito entre hebras. Como se observa en la figura A.6, la atenuación idéntica de 25 dB en todos los materiales de contacto indica que existe una interacción entre cinta semiconductora y la falla expuesta del aislamiento principal, estableciendo un camino eléctrico equivalente, lo cual hace que el cortocircuito preexistente domine la respuesta FRA y que las diferencias entre materiales pasen a un segundo plano.

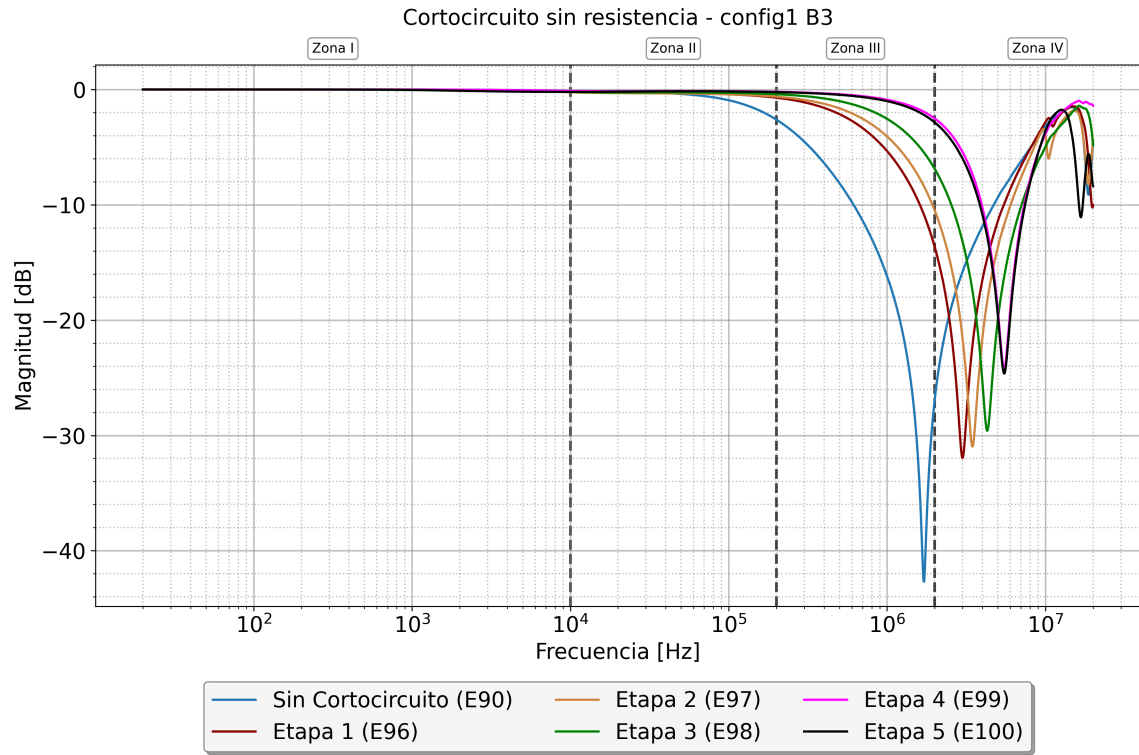


Figura 6.12: Comparación FRA cortocircuito entre vueltas sin resistencia - configuración 1 - B3

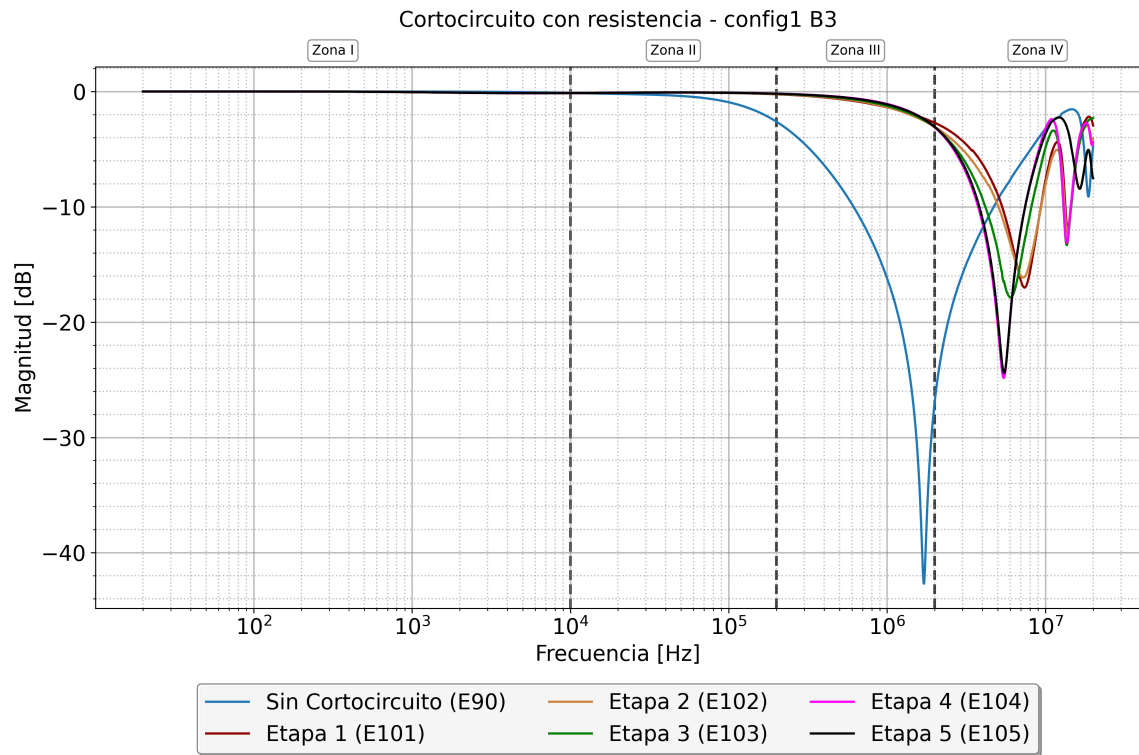


Figura 6.13: Comparación FRA cortocircuito entre vueltas con resistencia - configuración 1 - B3

### 6.3. Fallas que modifican las propiedades dieléctricas

#### 6.3.1. Contaminación superficial

Mediante un conductor de cobre desnudo enrollado en los extremos de la bobina, se emula la posible contaminación en dichas zonas, ya que al encontrarse fuera de las ranuras es más propensa a este tipo de fenómeno. En las figuras 6.14 y 6.14 se muestran las dos etapas simuladas, en donde la primera es realizando la simulación en el lado de terminales y la segunda etapa es con ambos terminales.



**Figura 6.14:** Emulación de contaminación superficial *grading*.



**Figura 6.15:** Emulación de contaminación superficial terminales.

6.3.1.a. Configuración 1

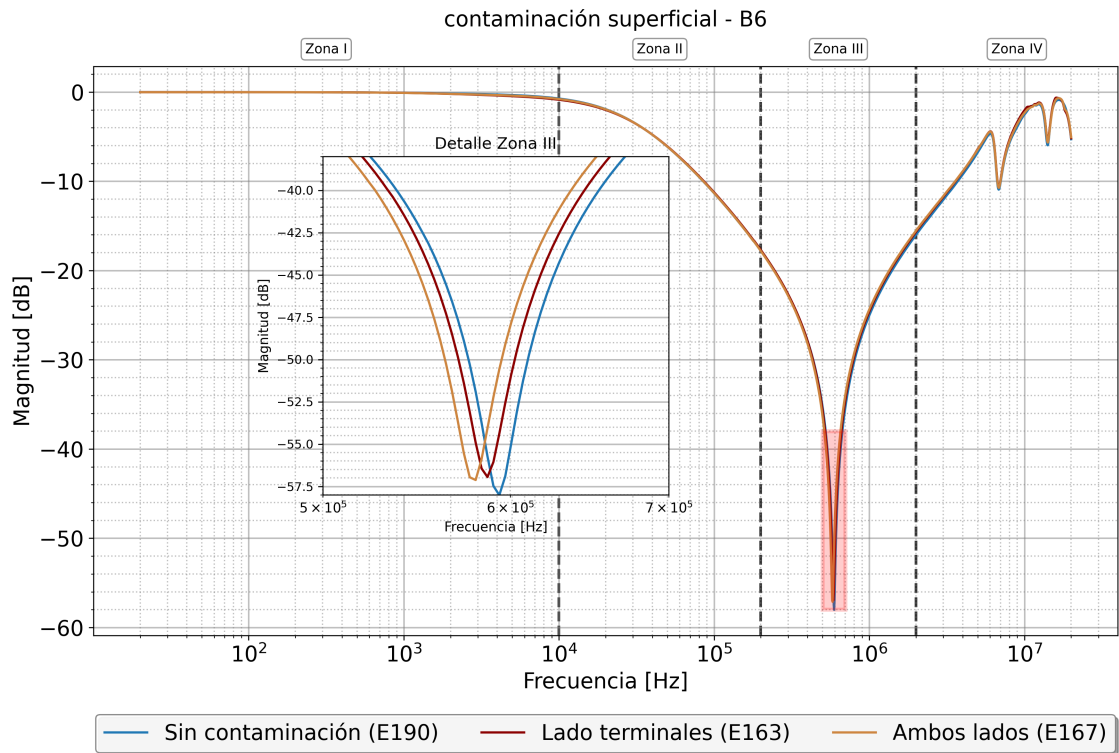


Figura 6.16: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 1 - B6

Se observa en la 6.16 que la variación entre etapas simuladas es mínima para este tipo de ensayo. Si se analiza la respuesta en detalle, se puede visualizar que la magnitud de atenuación se es prácticamente idéntica y solo existe un pequeño desplazamiento hacia las bajas frecuencias. La mayor variación detectada de forma visual se presenta en la zona de la resonancia principal.

6.3.1.b. Configuración 2

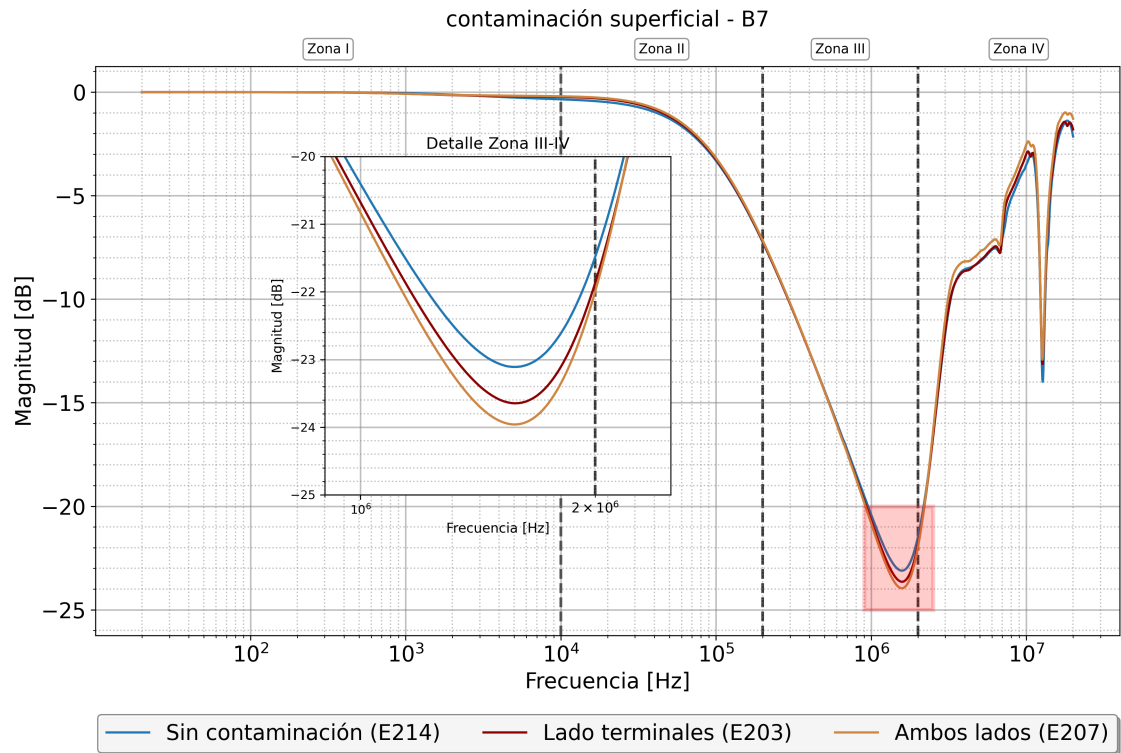
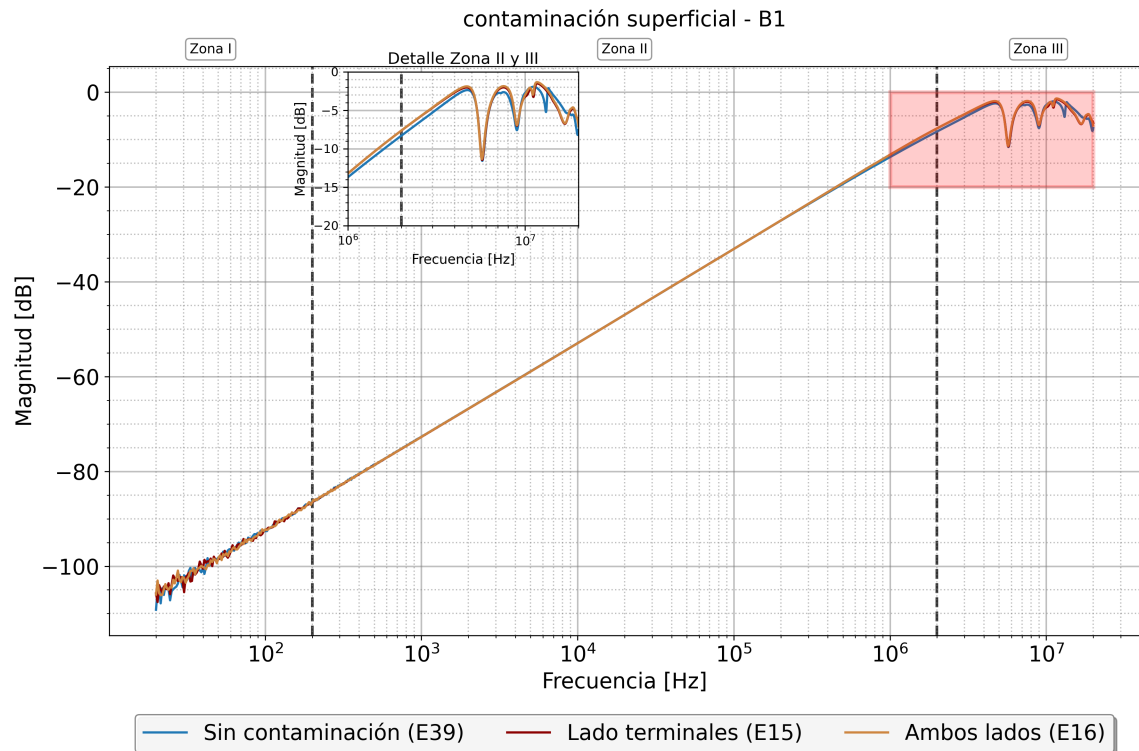


Figura 6.17: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 2 - B7

En la figura 6.17 se observa que la variación de desplazamiento vertical es menor a 1 dB en la zona III de resonancia principal. En la zona de altas frecuencias se detecta desplazamiento de mayor atenuación en el caso de contaminación en ambos lados de la probeta.

### 6.3.1.c. Configuración 3



**Figura 6.18:** Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 3 - B1

La configuración 3 de la figura 6.18 presenta baja variación ante este tipo de ensayo, al igual que la configuración 1. El principal hallazgo se observa en las altas frecuencias, lo cual no implica directamente variación causada por la contaminación, ya que corresponde a una zona experimental de alta incertidumbre, por lo que se verifica mediante el análisis cuantitativo de la sección siguiente.

### 6.3.2. Pérdida de cinta semi-conductora

Este ensayo representa el deterioro progresivo de la cinta semi-conductora ubicada entre la bobina y la ranura del estator. Se realiza la medición FRA para las siguientes etapas:

Para la probeta B8 las etapas presentan la siguiente progresión:

- Etapa 1: Desprendimiento del 12,5 % de la cinta semi-conductora.
- Etapa 2: Desprendimiento del 25 % de la cinta semi-conductora.
- Etapa 3: Desprendimiento del 50 % de la cinta semi-conductora.
- Etapa 4: Desprendimiento del 75 % de la cinta semi-conductora.
- Etapa 5: Desprendimiento del 100 % de la cinta semi-conductora.

Para las bobinas B2 y B5 se realizan más etapas intermedias considerando 8 etapas de desprendimiento de cinta semiconductora.

**Nota:** Una consideración importante para el uso de este material de recubrimiento es que la cinta se encuentra en estado usado, ya que proviene de materiales disponibles en el laboratorio utilizados en pruebas anteriores.



**Figura 6.19:** Perdida de cinta semi-conductora - Etapas del ensayo

La figura 6.19 muestra el proceso empleado en el laboratorio para simular este fenómeno en cada una de las 3 probetas sometidas a esta condición.

6.3.2.a. Configuración 1

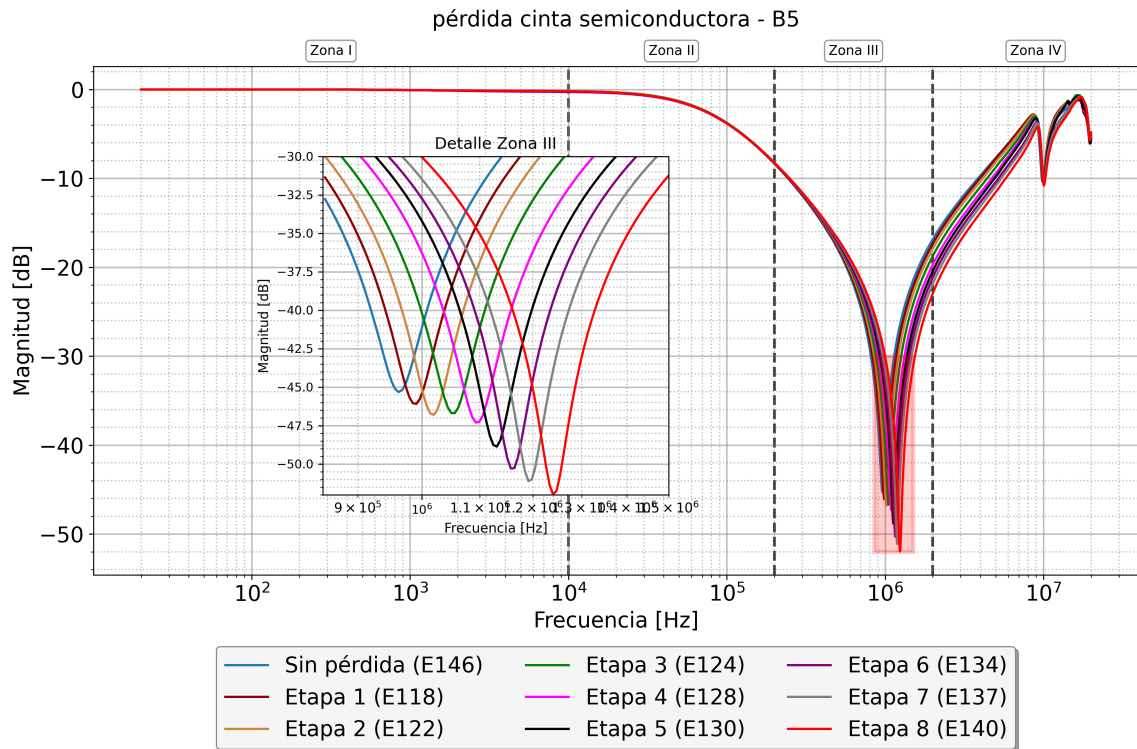


Figura 6.20: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 1 - B5

La figura 6.20 muestra un patrón claro de desplazamiento progresivo de la curva hacia las altas frecuencias, acompañado de mayor atenuación de la respuesta a medida que se retira la cinta. La respuesta de la bobina B2 presentada en la figura A.19 exhibe el mismo patrón. La bobina B8, en cambio, en la figura A.20 presenta un patrón invertido en la progresión de la falla, donde la curva se desplaza hacia las bajas frecuencias disminuyendo la atenuación. Respecto al grado de severidad o variación entre etapas, se observa que el desplazamiento entre etapas es mínimo, considerando que se retira una parte considerable de la cinta.

6.3.2.b. Configuración 2

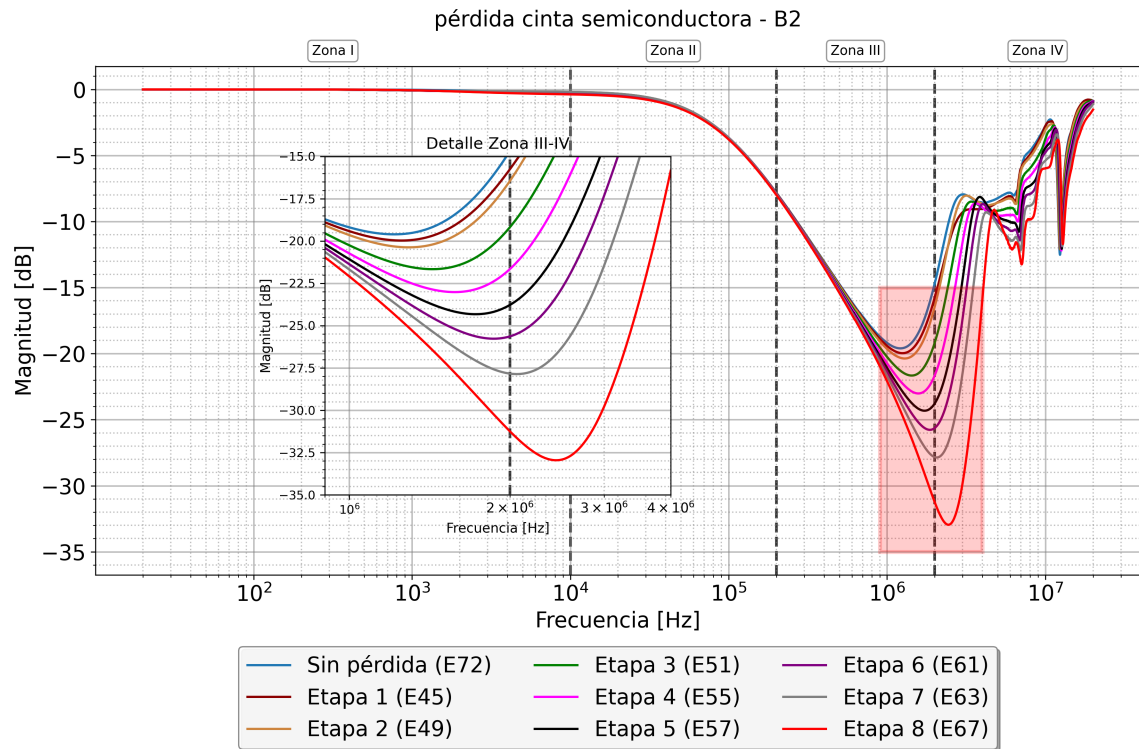
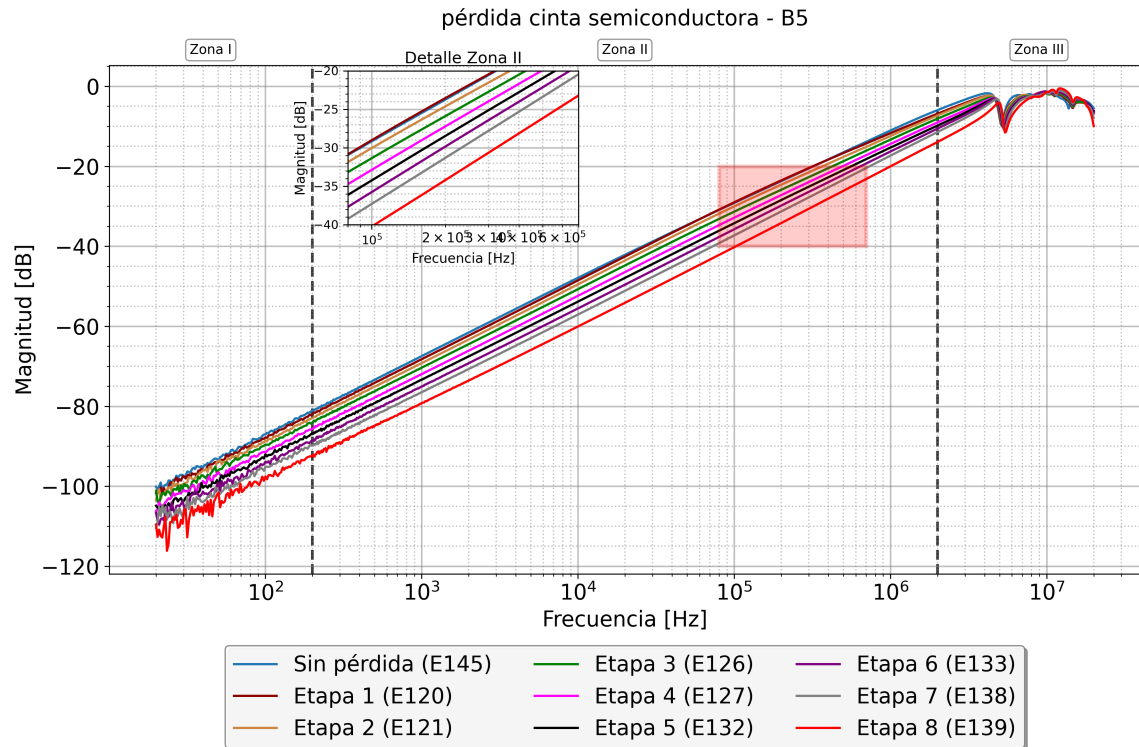


Figura 6.21: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 2 - B2

En la evaluación mediante la configuración 2, se identifican tres comportamientos distintos que caracterizan diferentes estados del sistema de aislamiento principal. La probeta B2 en la figura 6.21 muestra un comportamiento homogéneo y progresivo de la severidad del deterioro inducido. La probeta B5 en la figura A.21 repite el mismo patrón desde la etapa 1 a la 7, sin embargo en la etapa 8 se presenta una atenuación crítica de aproximadamente 20 dB en la resonancia principal, lo que evidencia que existe un deterioro dieléctrico que impide el control de campo ante la ausencia de cinta protectora. Por otro lado la probeta B8 muestra en la figura A.22 un comportamiento distinto al esperado en relación a B2 y B5. La probeta B8 manifiesta una tendencia invertida ante el deterioro y no es progresiva en relación a la severidad, lo que confirma las diferencias con una bobina con su proceso de fabricación completo.

### 6.3.2.c. Configuración 3



**Figura 6.22:** Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 3 - B5

La evaluación mediante configuración 3 caracteriza un sistema capacitivo puro en donde el deterioro progresivo de la cinta semiconductor se manifiesta a través de la disminución de la pendiente en la respuesta a medida que aumenta el deterioro. Contrario al comportamiento observado en la configuración 2, donde la probeta B5 manifestó una atenuación crítica de 20 dB en la resonancia principal durante la etapa 8, la configuración 3 no presenta dicha alteración. Esto indica que el umbral de deterioro está asociado a la interacción inductivo-capacitivo.

En la configuración 3 se observa que el punto de convergencia de las curvas en la zona de altas frecuencias varía entre las probetas analizadas. La probeta B2 (figura A.23) presenta convergencia hacia las altas frecuencias, mientras que la probeta B5 (figura 6.22) muestra convergencia más próxima a la zona II. Por su parte, la probeta B8 (figura A.24) no sigue este patrón, conservando el paralelismo entre las etapas posterior a su resonancia principal.

## 6.4. Fallas que alteran la geometría

### 6.4.1. Fractura del aislamiento principal

Se ejecuta un corte diagonal en la bobina para simular una fractura en el aislamiento principal. La profundidad del corte permite la visualización del cobre interno, como se presenta en las figuras 6.23 y 6.24, correspondientes a dos etapas de daño. La primera

etapa consiste en la realización de un corte de aislamiento en un extremo de la bobina, mientras que la segunda etapa involucra la ejecución de otro corte en el extremo opuesto.



Figura 6.23: Emulación de fractura de aislamiento principal de bobina.



Figura 6.24: Embarrilado de cobre sobre aislamiento dañado.

### 6.4.1.a. Configuración 1

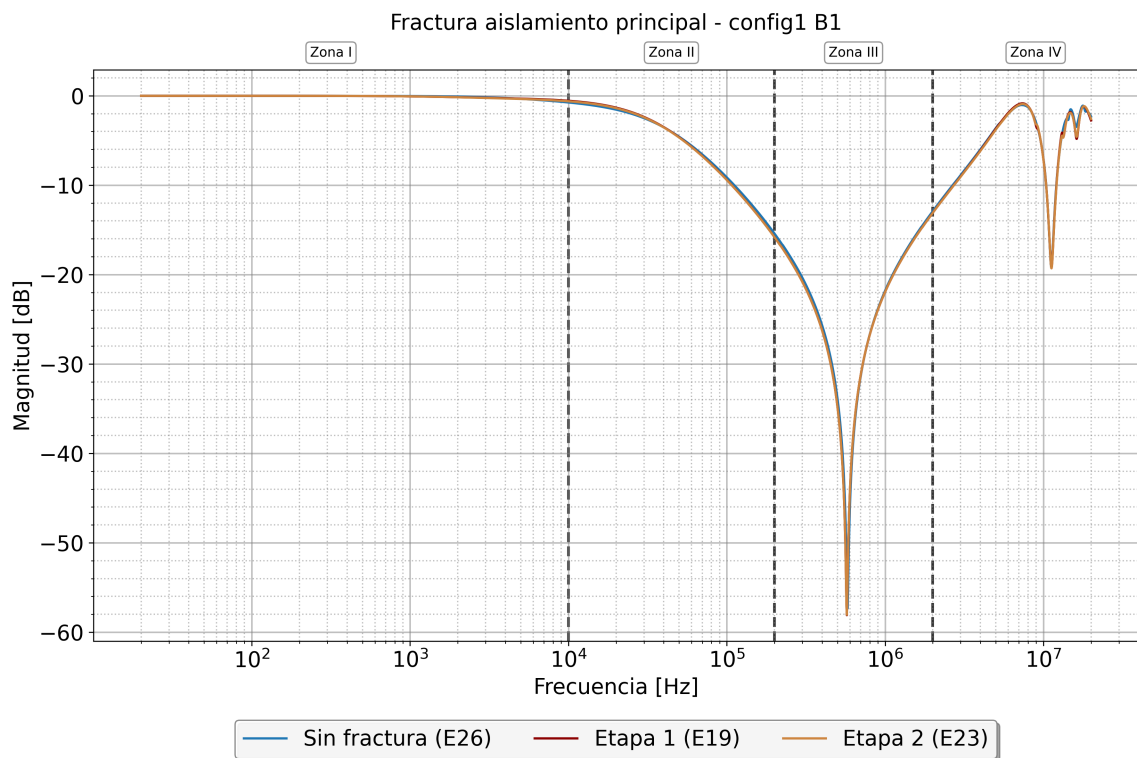


Figura 6.25: Comparación FRA fractura de aislamiento principal - configuración 1 - B1

La figura 6.25 presenta la respuesta en frecuencia para la sensibilidad a la fractura en la configuración 1. La variación resulta imperceptible, lo cual indica que la respuesta de la configuración 1 no presenta susceptibilidad a la fractura en ninguna de las dos etapas de daño inducido.

### 6.4.1.b. Configuración 2

La figura 6.26 presenta la respuesta en frecuencia para la configuración 2, donde se observa un aumento en la atenuación de la curva a medida que se incrementa el nivel de daño. No existe desplazamiento horizontal ni vertical de la curva, conservándose la forma y modificándose únicamente el mínimo global. Se observan pequeñas fluctuaciones en la frontera entre las zonas III y IV.

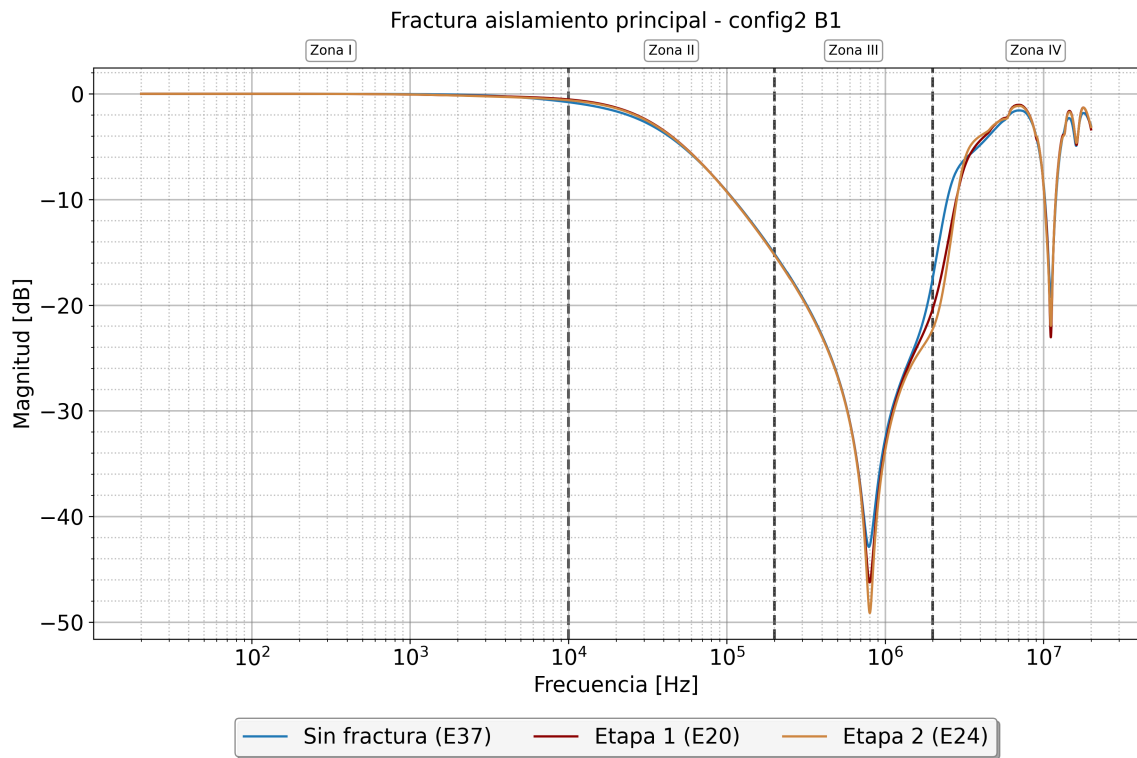


Figura 6.26: Comparación FRA fractura de aislamiento principal - configuración 2 - B1

### 6.4.1.c. Configuración 3

La figura 6.27 presenta las curvas FRA comparativas para la configuración 3, donde se observa que la variación resulta imperceptible en ambas etapas respecto a la referencia sana, comportamiento similar al observado en la configuración 1.

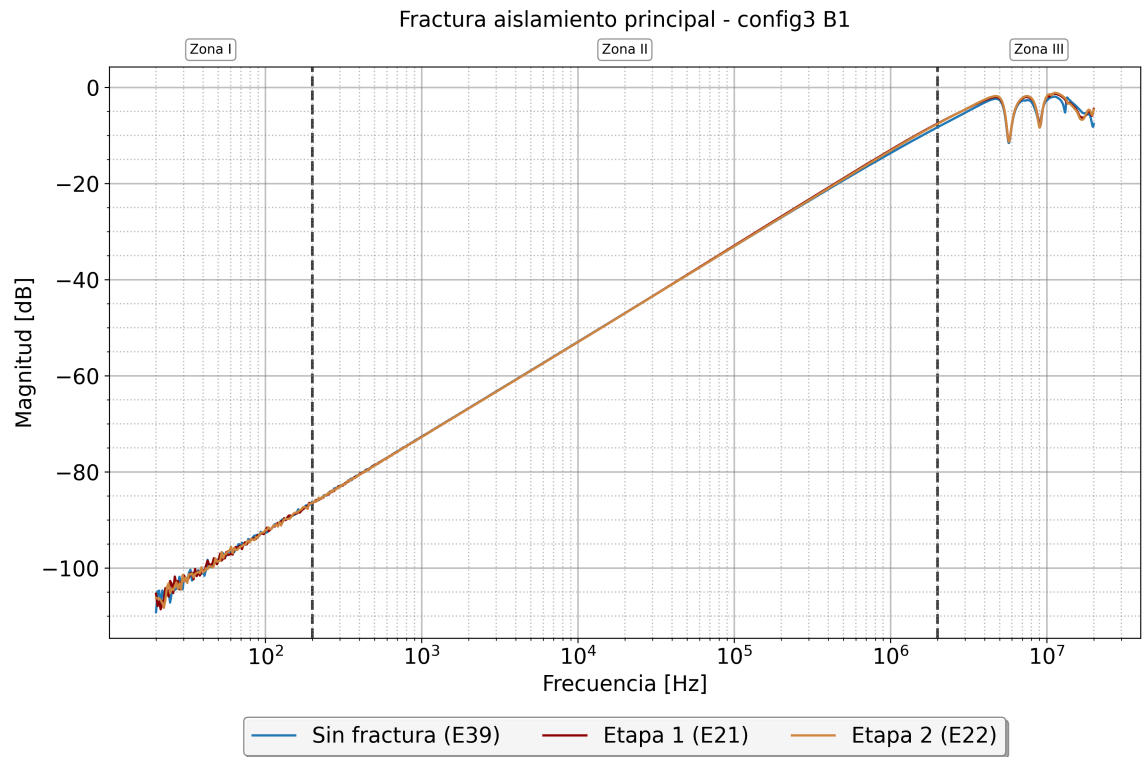


Figura 6.27: Comparación FRA fractura de aislamiento principal - configuración 3 - B1

### 6.4.2. Flexión de bobina

Se utiliza una prensa para someter la bobina a flexión en dos direcciones: hacia el interior y hacia el exterior del centro, como se muestra en las figuras 6.28 y 6.29 respectivamente. Esta sensibilidad simula la flexión que podrían experimentar los devanados ante la deformación causada por altas corrientes de falla.



Figura 6.28: Bobina sometida a flexión interior.



Figura 6.29: Bobina sometida a flexión exterior.

#### 6.4.2.a. Configuración 1

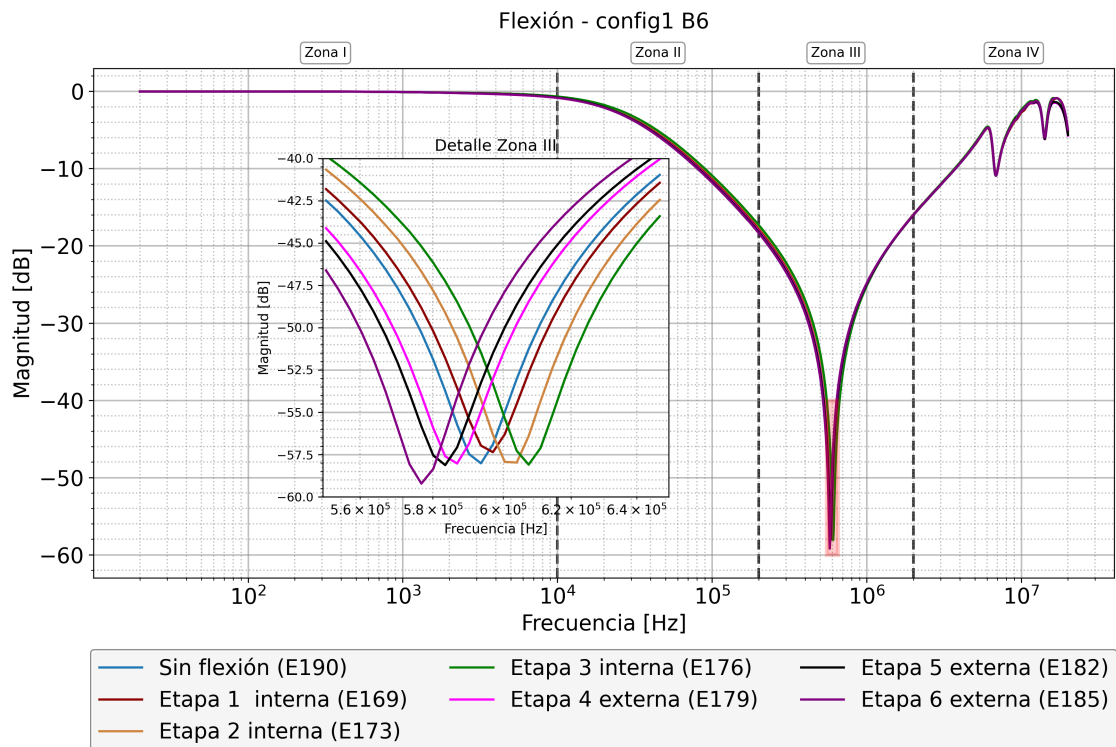


Figura 6.30: Comparación FRA flexión - configuración 1 - B6

La gráfica 6.30 presenta el patrón de falla ante la flexión en la bobina para la configuración 1. El nivel de variación de las curvas resulta muy bajo; en el detalle comparativo se observa que el incremento de la deformación interna se caracteriza por un desplazamiento horizontal hacia las altas frecuencias. Contrariamente, la deformación exterior se manifiesta como un desplazamiento hacia las bajas frecuencias a medida que aumenta el nivel de severidad de la falla mecánica.

**6.4.2.b. Configuración 2**

En la figura 6.31 se presenta el patrón de falla ante la flexión para la configuración 2, en donde se observa que la tendencia progresiva de la configuración 1 no se mantiene. Este comportamiento sugiere que la conexión a tierra del aislamiento principal interfiere con detección de la severidad de la falla.

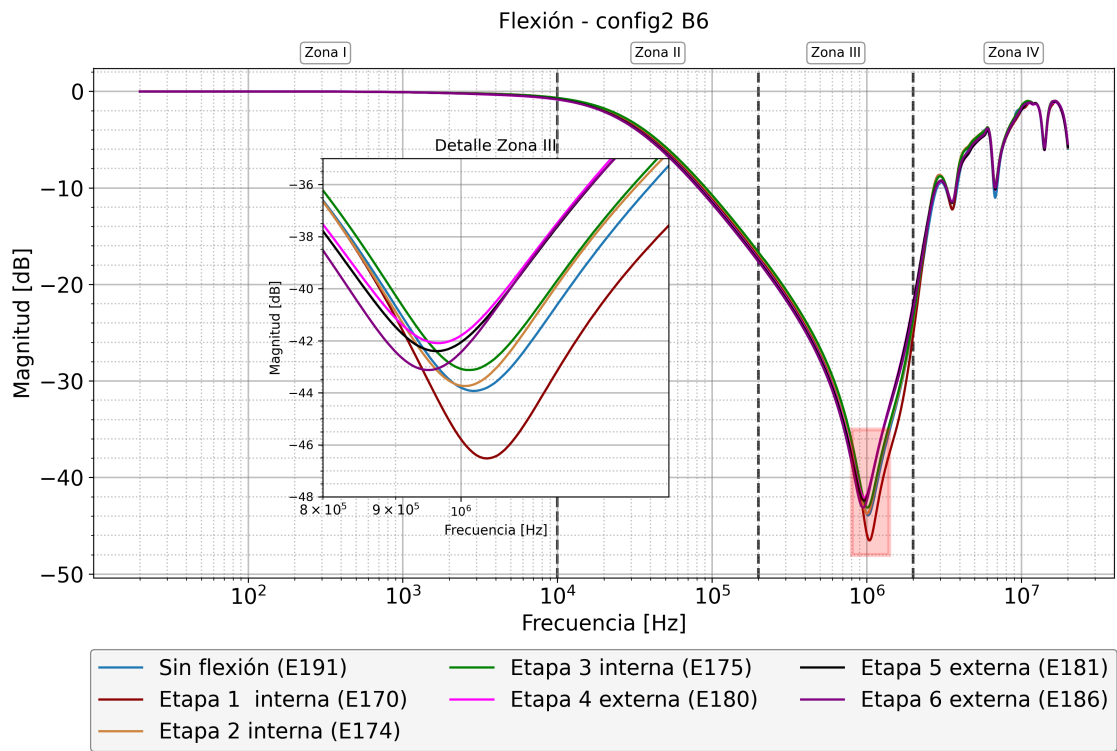


Figura 6.31: Comparación FRA flexión - configuración 2 - B6

**6.4.2.c. Configuración 3**

En la figura 6.32 se muestra la comparación del FRA respecto al ensayo de flexión de bobina para la configuración 3. Esta configuración muestra sensibilidad prácticamente nula ante los daños por flexión aplicados. Todas las curvas están superpuestas, haciendo imperceptible la diferenciación entre etapas de severidad.



## 6.5. Cálculo de indicadores numéricos

### Pre-análisis

Se documenta en el Anexo D, el pre-análisis que se debe tomar en cuenta para la selección y comparación mediante varios indicadores. En la sección D.2 se deben considerar los criterios de redundancia matemática, redundancia por correlación y estabilidad ante variaciones. En el anexo se muestra una selección de indicadores que cumplen dichos criterios.

#### 6.5.1. Elección del indicador CCF

Para garantizar objetividad en la interpretación de resultados FRA, se emplean indicadores numéricos que cuantifican las diferencias entre curvas de referencia y mediciones posteriores. El coeficiente de correlación de *Pearson* (CCF), el cual se describe en la sección 2.8.5, proporciona valores específicos que eliminan la subjetividad del análisis visual, permitiendo establecer umbrales cuantitativos de aceptación. Además, este coeficiente es el más utilizado en la documentación investigada, y a pesar de sus desventajas, se considera el indicador de referencia.

#### 6.5.2. Criterio de comparación mediante ventanas de frecuencia fijas

Se utilizan ventanas de frecuencia fijas en lugar de deslizantes para asegurar la comparación directa entre mediciones y facilitar la identificación de bandas críticas específicas donde cada tipo de falla manifiesta mayor sensibilidad. La metodología de ventanas fijas simplifica la implementación práctica y reduce la variabilidad interpretativa. Se implementan ventanas fijas proporcionales a la cantidad de puntos de cada década, considerando ventanas de 1/5 de cada década. En total 30 ventanas de frecuencia para todo el ancho de banda. Además se realiza el relacionamiento respectivo con las zonas de análisis cualitativo descritas en el Capítulo 5. Las tablas con el detalle de las ventanas de frecuencia se documentan la sección D.1 del anexo.

#### 6.5.3. Tablas de resultados del indicador CCF

En el Anexo B se presentan los valores calculados del indicador CCF para todos los casos de sensibilidad estudiados. Con base en estos cálculos y el análisis visual descrito en las secciones previas, se desarrollan las observaciones y el análisis de los resultados obtenidos en el estudio.

Para interpretación de las tablas se utilizan los rangos de la tabla 2.5 donde valores entre 0.98 y 1 se considera aceptable, entre 0.96 y 0.98 se considera como valores ambiguos que requieren revisión, y bajo 0.96 se consideran valores no correlacionados que identifican falla.

## 6.6. Rangos afectados en ensayos de sensibilidad del FRA

### 6.6.1. Zonas de frecuencias no interpretables

Respecto a los resultados del Anexo B, la tabla 6.1 sintetiza los rangos no interpretables identificados. Se considera rango no interpretable aquel donde el CCF presenta valores inferiores a 0.96, producto de la variación introducida por la disposición de los cables coaxiales. Se observa que la influencia de estos cables incide en frecuencias extremas para las configuraciones 1 y 3, mientras que la configuración 2 afecta rangos intermedios. Estas bandas de frecuencia identificadas se comparan con los casos de sensibilidad presentados en los análisis posteriores, con el objetivo de detectar si los rangos afectados por la disposición de los cables coinciden con las frecuencias alteradas por las fallas inducidas.

La sensibilidad en las bajas frecuencias (Zona I) se asocia principalmente a los siguientes factores:

- **Baja densidad de puntos.** Según lo indicado en la figura 4.19 se configuran 100 puntos en la primera década, lo que afecta considerablemente la cantidad de datos por ventana de frecuencia para calcular el indicador CCF.
- **Sensibilidad del indicador CCF en bajas frecuencias.** En las figuras D.4, D.5 y D.6, se muestra que la sensibilidad promedio en la zona I es alta, incluido el indicador CCF, lo que genera un rango de incertidumbre.

Respecto a la sensibilidad en altas frecuencias, los resultados calculados muestran que, aunque las referencias técnicas señalan en la tabla 2.3 que la zona interpretable en devanados de transformadores se considera hasta 1 MHz, este rango se extiende en el caso de bobinas preformadas. Esto se fundamenta en la menor influencia de efectos capacitivos parásitos presentes en transformadores, como se indica en la sección 2.5.4.

Se indica en cada tabla de análisis el valor del CCF máximo y mínimo, junto con la diferencia entre  $CCF_{max}$  y  $CCF_{min}$  para cuantificar la severidad de la variación en cada rango de frecuencias.

Configuración	Bobina	Rango no interpretable	CCF Mínimo	CCF Máximo	$\Delta$ Máx-Mín
CONFIG_1	B1	20.0-502.4 Hz	0.277	0.901	0.624
		12.6-20.0 MHz	0.941	0.941	0
	B2	20.0-502.4 Hz	0.164	0.896	0.732
	B3	20.0-796.2 Hz	0.457	0.935	0.478
	B4	20.0-796.2 Hz	0.115	0.936	0.821
		12.6-20.0 MHz	0.946	0.946	0
	B5	20.0-796.2 Hz	0.133	0.895	0.762
		12.6-20.0 MHz	0.901	0.901	0
B6	20.0-502.4 Hz	0.087	0.909	0.822	
B7	20.0-796.2 Hz	0.086	0.959	0.873	
	20.0-502.4 Hz	-0.083	0.945	1.028	
B8	20.0-502.4 Hz	-0.083	0.945	1.028	
	12.6-20.0 MHz	0.946	0.946	0	
CONFIG_2	B1	20.0-502.4 Hz	0.224	0.933	0.709
		3.2-5.0 MHz	0.926	0.926	0
	B2	20.0-502.4 Hz	-0.144	0.871	1.015
		3.2-8.0 MHz	-0.536	0.894	1.43
	B3	20.0-796.2 Hz	0.455	0.945	0.49
		3.2-5.0 MHz	0.833	0.833	0
	B4	20.0-796.2 Hz	0.149	0.952	0.803
		2.0-5.0 MHz	0.638	0.914	0.276
	B5	20.0-796.2 Hz	0.076	0.945	0.869
		3.2-5.0 MHz	0.957	0.957	0
		12.6-20.0 MHz	0.951	0.951	0
	B6	20.0-502.4 Hz	-0.018	0.913	0.931
		796.2 kHz-1.3 MHz	0.904	0.904	0
		3.2-5.0 MHz	0.739	0.739	0
	B7	20.0-796.2 Hz	0.172	0.959	0.787
		1.3-2.0 MHz	0.895	0.895	0
		3.2-8.0 MHz	0.829	0.857	0.028
	B8	20.0-502.4 Hz	0.407	0.905	0.498
2.0-20.0 MHz		0.068	0.895	0.827	
CONFIG_3	B1	20.0-126.2 Hz	0.576	0.928	0.352
		8.0-20.0 MHz	0.435	0.935	0.5
	B2	20.0-126.2 Hz	0.615	0.959	0.344
		8.0-12.6 MHz	-0.538	-0.538	0
	B3	20.0-50.2 Hz	0.903	0.949	0.046
		5.0-8.0 MHz	0.844	0.844	0
	B4	12.6-20.0 MHz	0.834	0.834	0
		20.0-79.6 Hz	0.789	0.935	0.146
	B5	8.0-20.0 MHz	0.841	0.875	0.034
		20.0-79.6 Hz	0.818	0.946	0.128
	B6	8.0-20.0 MHz	0.101	0.727	0.626
		20.0-126.2 Hz	0.784	0.958	0.174
	B7	8.0-20.0 MHz	0.750	0.930	0.18
		20.0-79.6 Hz	0.725	0.955	0.23
B8	8.0-20.0 MHz	0.015	0.647	0.632	
	20.0-502.4 Hz	0.049	0.925	0.876	
B8	20.0-502.4 Hz	0.049	0.925	0.876	
	8.0-12.6 MHz	0.483	0.483	0	

Tabla 6.1: Rangos no interpretables por configuración y bobina - influencia disposición de cables

### 6.6.2. Influencia de los conectores

La tabla 6.2 muestra los rangos afectados según la evaluación del indicador CCF. Para esta sensibilidad, algunos rangos de frecuencia se superponen a los intervalos no interpretables de la tabla 6.1, por lo que se incorpora una columna de rangos efectivos que representa la diferencia entre el rango afectado en la respuesta FRA y el intervalo que afectan los cables coaxiales.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	ΔMáx-Mín
Conectores	CONFIG.1	B1	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	5.0-8.0 MHz	0.310	0.898	0
			5.0-8.0 MHz			0.952	0.952	
		12.6-20.0 MHz	0.620	0.620				
		B2	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz	No detecta	0.200	0.849	
		B4	20.0-317.0 Hz	20.0-796.2 Hz   12.6-20.0 MHz	No detecta	-0.242	0.867	
			12.6-20.0 MHz			0.907	0.907	
		B5	20.0-200.0 Hz	20.0-796.2 Hz   12.6-20.0 MHz	No detecta	0.180	0.864	
		B6	20.0-126.2 Hz	20.0-502.4 Hz	No detecta	-0.185	0.808	
	B7	20.0-502.4 Hz	20.0-796.2 Hz	No detecta	-0.293	0.945		
	B8	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	No detecta	-0.019	0.923		
	CONFIG.2	B2	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   3.2-8.0 MHz	No detecta	0.462	0.926	
			3.2-5.0 MHz			0.486	0.486	
		B4	20.0-317.0 Hz	20.0-796.2 Hz   2.0-5.0 MHz	12.6-20.0 MHz	0.162	0.879	0
			12.6-20.0 MHz			0.921	0.921	
		B5	20.0-200.0 Hz	20.0-796.2 Hz   3.2-5.0 MHz   12.6-20.0 MHz	No detecta	-0.031	0.950	
		B6	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   796.2 kHz - 1.3 MHz   3.2-5.0 MHz	No detecta	0.232	0.897	
		B7	20.0-317.0 Hz	20.0-796.2 Hz   1.3-2.0 MHz   3.2-8.0 MHz	No detecta	-0.146	0.771	
			1.3-2.0 MHz			0.934	0.934	
	3.2-8.0 MHz	0.918	0.938					
	B8	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   2.0-20.0 MHz	No detecta	-0.225	0.899		
	12.6-20.0 MHz	0.924	0.924					
	CONFIG.3	B2	20.0-31.7 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-12.6 MHz	No detecta	0.793	0.793	
			5.0-2-79.6 Hz			0.936	0.936	
			8.0-12.6 MHz			0.826	0.826	
		B4	20.0-79.6 Hz	20.0-79.6 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.779	0.942	
		B5	20.0-79.6 Hz	20.0-79.6 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.895	0.932	
			8.0-20.0 MHz			0.874	0.910	
		B6	20.0-79.6 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	5.0-8.0 MHz	0.768	0.816	
	5.0-12.6 MHz	0.899	0.943	0.044				
	B7	8.0-20.0 MHz	20.0-79.6 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.867	0.911		

**Tabla 6.2:** Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a variación de conectores

En la configuración 1, solo la bobina B1 presenta detección fuera de los límites donde influyen los cables coaxiales, mientras que en las demás probetas los rangos se ubican en la zona no interpretable. La configuración 2 muestra una situación similar para la bobina B4 y la configuración 3 para la bobina B6. Estas detecciones de variación del indicador mantienen valores bajos de severidad, además de ser cercanos al valor umbral de 0.96. Se concluye que la sensibilidad por conectores no influye significativamente en la medición, dado que se superpone en la mayoría de los casos a la variabilidad introducida por los cables coaxiales.

### 6.6.3. Influencia de superficie de contacto de ranura

En la tabla 6.3 se muestran los resultados de rangos de detección efectivos que aporta la sensibilidad de superficie de contacto con ranura.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	ΔMáx-Mín	Resonancia MHz
Superficie Contacto Ranura	CONFIG.1	B1	20.0-502.4 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	317.0-796.2 kHz	0.155	0.953	0.29	0.580
			317.0-796.2 kHz			0.521	0.813		
			12.6-20.0 MHz			0.890	0.918		
		B3	20.0-796.2 Hz	20.0-796.2 Hz	8.0-79.6 kHz   1.3-20.0 MHz	0.050	0.897	1.91	1.712
			8.0-79.6 kHz			-0.999	0.910		
			1.3-20.0 MHz			-0.978	0.788		
	B6	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz	502.4-796.2 kHz	0.390	0.953	0.00	0.594	
		502.4-796.2 kHz			0.436	0.436			
		20.0-502.4 Hz			-0.009	0.957			
	CONFIG.2	B1	20.0-502.4 Hz	20.0-502.4 Hz   3.2-5.0 MHz	317.0-796.2 kHz   1.3-3.20 MHz   12.6-20.0 MHz	-0.986	0.894	1.88	0.792
			317.0-796.2 kHz			0.892	0.959		
			1.3-8.0 MHz			0.898	0.949		
		B3	20.0-796.2 Hz	20.0-796.2 Hz   3.2-5.0 MHz	5.0-79.6 kHz   1.3-3.2 MHz   5.0-20.0 MHz	0.061	0.865	1.93	1.508
			5.0-79.6 kHz			-0.998	0.935		
			1.3-20.0 MHz			-0.951	0.936		
	B6	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   796.2 kHz - 1.3 MHz   3.2-5.0 MHz	502.4 - 796.2 kHz   2.0-3.2 MHz   5.0-20.0 MHz	0.118	0.943	1.30	1.020	
		502.4 kHz - 1.3 MHz			-0.519	0.777			
		2.0-5.0 MHz			0.822	0.947			
	CONFIG.3	B1	20.0-317.0 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	3.2-8.0 MHz	0.353	0.958	1.65	
			3.2-20.0 MHz			-0.688	0.957		
			20.0-50.2 Hz			0.795	0.954		
		B3	20.0-50.2 Hz	20.0-50.2 Hz   5.0-8.0 MHz   12.6-20.0 MHz	8.0-12.6 MHz	-0.688	0.684	1.37	
			5.0-20.0 MHz			0.489	0.954		
			20.0-126.2 Hz			-0.489	0.954		
B6	20.0-126.2 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	2.0-8.0 MHz	-0.837	0.959	1.80			
	8.0-20.0 MHz								
	2.0-20.0 MHz								

Tabla 6.3: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a superficie de contacto de ranura

Se incluye en la columna final de la tabla la resonancia principal para cada bobina, para comparar si el rango de frecuencias afectado contiene este punto. Se observa en la tabla que el mayor nivel de severidad se presenta en la bobina B3 en las configuraciones 1 y 2. Las bobinas B1 y B6 registran la mayor severidad en el rango donde se encuentra la resonancia característica de la respuesta, mientras que la bobina B3 mantiene este valor máximo en un rango adyacente. Se identifica la configuración 3 como la más consistente respecto a los rangos de detección y el nivel de severidad de la sensibilidad ante la superficie de contacto a ranura.

### 6.6.4. Falla de cortocircuito entre vueltas y aislamiento a tierra

En la tabla 6.4 se presentan los resultados de los umbrales de detección efectivos para la sensibilidad al cortocircuito entre vueltas de la bobina B3. Se presenta un desplazamiento de la zona afectada entre el escenario con y sin resistencia. Al realizar un análisis conjunto con la curva de respuesta de la sección 6.2.2, se concluye que el ensayo con resistencia no representa el comportamiento de la falla y que el estado preexistente de la bobina enmascara los resultados. Se considera la falla sin resistencia como la más representativa, estableciendo el rango efectivo de detección en 1.3-12.6 MHz. El rango detectado por el CCF de 8-79.6 kHz no se identifica de forma visual en la gráfica.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	ΔMáx-Mín	Resonancia MHz	
Cortocircuito Con Resistencia	CONFIG.1	B3	20.0-796.2 Hz	20.0-796.2 Hz	5.0-50.2 kHz   1.3-20.0 MHz	0.072	0.898	1.812	1.712	
			5.0-50.2 kHz			-0.998	0.814			
			1.3-20.0 MHz			-0.991	0.955			
Cortocircuito Sin Resistencia			20.0-796.2 Hz	20.0-796.2 Hz	8.0-79.6 kHz   1.3-20.0 MHz	-0.108	0.942	1.952	1.922	
						8.0-79.6 kHz	-0.996			0.956
						1.3-20.0 MHz	-0.970			0.952

Tabla 6.4: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad cortocircuito entre vueltas

En la tabla 6.5 se presentan los resultados de rango efectivo de detección para la falla de

aislamiento a tierra. Excluyendo los umbrales donde las variaciones de los cables coaxiales contaminan la medición, se obtiene un rango de detección amplio que se confirma en el gráfico analizado en la sección 6.2.1. Se destaca que valores altos de variación entre min-max de CCF, lo cual se considera relativo a la severidad de la falla, concuerda con las bobinas B2 y B3, las cuales presentan falla preexistente.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	ΔMáx-Mín	Resonancia MHz
Falla Aislamiento a tierra	CONFIG.1	B1	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	502.4-796.2 kHz	0.322	0.896	0	0.580
			502.4-796.2 kHz			-0.709	-0.709		
			12.6-20.0 MHz			0.905	0.905		
		B2	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz	796.2 kHz - 2.0 MHz   3.2-8.0 MHz	0.320	0.890	0.006	1.205
			796.2 kHz - 2.0 MHz			0.860	0.866		
			3.2-8.0 MHz			-0.435	0.882		
		B3	20.0-796.2 Hz	20.0-796.2 Hz	1.3-5.0 MHz	0.304	0.909	1.036	1.712
			1.3-5.0 MHz			-0.077	0.959		
			20.0-317.0 Hz			-0.429	0.956		
		B4	796.2 kHz - 5.0 MHz	20.0-796.2 Hz   12.6-20.0 MHz	796.2 kHz - 5.0 MHz	0.817	0.955	0.138	1.038
			20.0-126.2 Hz			0.191	0.902		
			796.2 kHz - 2.0 MHz			-0.299	0.903		
		B5	3.2-12.6 MHz	20.0-796.2 Hz   12.6-20.0 MHz	796.2 kHz - 2.0 MHz   3.2-12.6 MHz	0.912	0.959	1.202	0.963
			20.0-200.0 Hz			0.015	0.956		
			502.4 kHz - 1.3 MHz			-0.563	-0.428		
		B6	3.2-5.0 MHz	20.0-502.4 Hz	502.4 kHz - 1.3 MHz   3.2-5.0 MHz	0.905	0.905	0	0.594
			20.0-200.0 Hz			0.073	0.934		
			796.2 kHz - 2.0 MHz			0.089	0.944		
		B7	3.2-8.0 MHz	20.0-796.2 Hz	796.2 kHz - 2.0 MHz   3.2-8.0 MHz	0.885	0.900	0.015	1.284
			20.0-200.0 Hz			0.297	0.960		
			502.4 kHz - 1.3 MHz			0.404	0.942		
		B8	2.0-12.6 MHz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	502.4 kHz - 1.3 MHz   2.0-12.6 MHz	0.074	0.945	0.871	0.756
			502.4 kHz - 1.3 MHz			0.404	0.942		
			20.0-200.0 Hz			0.297	0.960		

Tabla 6.5: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a falla de aislamiento principal a tierra

### 6.6.5. Sensibilidad a la contaminación y degradación de cinta semiconductor

En la tabla 6.6 se presentan los resultados de rangos efectivos de detección para la sensibilidad a la contaminación superficial de extremos de bobina. En este escenario, las configuraciones 1 y 2 mantienen un patrón más estable para las bobinas B1 y B2 medida. Los valores de CCF mínimo y máximo no presentan diferencias significativas, por lo que se considera una perturbación difícil de detectar a menos que se realicen mediciones periódicas en el tiempo, situación que corresponde al caso desarrollado en el laboratorio. En la configuración 3, el rango de detección se superpone totalmente con la influencia que incorpora la variación de los cables coaxiales, por lo que no existe umbral de detección específico.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	$\Delta$ Máx-Mín
Contaminación Superficial	CONFIG.1	B1	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	502.4-796.2 kHz	0.310	0.892	0.582
			502.4-796.2 kHz			0.905	0.938	0.033
			12.6-20.0 MHz			0.877	0.931	0.054
		B6	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz	502.4-796.2 kHz	0.192	0.959	0.767
			502.4-796.2 kHz			0.911	0.911	0
			20.0-317.0 Hz			-0.038	0.959	0.997
	B7	20.0-317.0 Hz	20.0-796.2 Hz	No detecta	0.172	0.936	0.764	
		12.6-20.0 MHz			0.894	0.930	0.036	
		20.0-126.2 Hz			0.405	0.805	0.4	
	CONFIG.2	B1	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   3.2-5.0 MHz	5.0-20.0 MHz	0.172	0.912	0.74
			12.6-20.0 MHz			0.487	0.949	0.462
			20.0-126.2 Hz			0.613	0.930	0.317
		B6	20.0-126.2 Hz	20.0-502.4 Hz   796.2 kHz - 1.3 MHz   3.2-5.0 MHz	No detecta	0.802	0.953	0.151
			796.2 kHz - 1.3 MHz			0.655	0.918	0.263
			8.0-20.0 MHz			0.739	0.946	0.207
	B7	20.0-200.0 Hz	20.0-796.2 Hz   1.3-2.0 MHz   3.2-8.0 MHz	No detecta	-0.455	0.674	1.129	
		20.0-126.2 Hz			0.487	0.949	0.462	
		8.0-20.0 MHz			0.613	0.930	0.317	
CONFIG.3	B1	20.0-126.2 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.802	0.953	0.151	
		8.0-20.0 MHz			0.655	0.918	0.263	
		20.0-79.6 Hz			0.739	0.946	0.207	
	B6	20.0-79.6 Hz	20.0-79.6 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.739	0.946	0.207	
		8.0-20.0 MHz			-0.455	0.674	1.129	
		8.0-20.0 MHz			-0.455	0.674	1.129	

Tabla 6.6: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a contaminación superficial

En la tabla 6.7 se presentan los resultados de sensibilidad a la pérdida o degradación de la cinta semiconductor. Se evidencia la configuración 2 como la más óptima para la detección, debido al amplio rango donde se manifiesta la perturbación y la consistencia del nivel de severidad  $\Delta$ max-min, tanto gráfica como numéricamente mediante el cálculo del CCF. Por otro lado, las configuraciones 1 y 3 reconocen numéricamente la diferencia conocida de la bobina B8, la cual no sigue el patrón de severidad de la degradación al presentar valores considerablemente inferiores a las demás bobinas.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	$\Delta$ Máx-Mín	
Cinta Semiconductor	CONFIG.1	B2	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz	796.2 kHz - 2.0 MHz   8.0-20.0 MHz	-0.084	0.896	0.98	
			796.2 kHz - 2.0 MHz			-0.414	0.957	1.371	
			8.0-20.0 MHz			-0.146	0.943	1.089	
		B5	20.0-126.2 Hz	20.0-796.2 Hz   12.6-20.0 MHz	796.2 kHz - 1.3 MHz   8.0-12.6 MHz	-0.165	0.943	1.108	
			796.2 kHz - 1.3 MHz			-0.550	0.918	1.468	
			8.0-20.0 MHz			0.811	0.951	0.14	
		B8	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	502.4-796.2 kHz   5.0-12.6 MHz	0.039	0.924	0.885	
			502.4-796.2 kHz			-0.265	0.821	1.086	
			5.0-20.0 MHz			0.476	0.945	0.469	
		CONFIG.2	B2	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   3.2-8.0 MHz	1.3-3.2 MHz	-0.258	0.906	1.164
				1.3-20.0 MHz			-0.972	0.945	1.917
				20.0-200.0 Hz			0.225	0.953	0.728
	B5		1.3-20.0 MHz	20.0-796.2 Hz   3.2-5.0 MHz   12.6-20.0 MHz	1.3-3.2 MHz   5.0-12.6 MHz	-0.776	0.955	1.731	
			20.0-200.0 Hz			0.216	0.928	0.712	
			796.2 kHz - 1.3 MHz			-0.507	0.618	1.125	
	CONFIG.3	B2	2.0-20.0 MHz	20.0-126.2 Hz   8.0-12.6 MHz	3.2-8.0 MHz	-0.262	0.955	1.217	
			20.0-200.0 Hz			0.186	0.958	0.772	
			3.2-20.0 MHz			-0.635	0.942	1.577	
		B5	20.0-126.2 Hz	20.0-79.6 Hz   8.0-20.0 MHz	3.2-8.0 MHz	0.361	0.951	0.59	
			3.2-20.0 MHz			-0.476	0.940	1.416	
			20.0-317.0 Hz			-0.054	0.944	0.998	
	B8	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   8.0-12.6 MHz	2.0-8.0 MHz	0.026	0.958	0.932		
		2.0-20.0 MHz			0.026	0.958	0.932		
		2.0-20.0 MHz			0.026	0.958	0.932		

Tabla 6.7: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a degradación de cinta semiconductor

### 6.6.6. Sensibilidad a la fractura de aislamiento y flexión de bobina

En la tabla 6.8 se presentan los resultados para la sensibilidad ante la fractura de aislamiento principal de bobina. Para las dos etapas de perturbación simuladas en el laboratorio se observa que en la configuración 1 los rangos de detección se superponen completamente con los intervalos donde influye la variación de los cables coaxiales. La configuraciones 2 y 3 presentan un rango de detección, pero se considera despreciable considerando el bajo valor de  $\Delta$ max-min y la criticidad de la falla inducida. Se concluye que las fallas localizadas puntuales no se detectan para el tipo de probeta medido. Una hipótesis

que explica la poca sensibilidad, es que la severidad de la falla no fuera suficiente para generar diferencias significativas en la curva FRA. Otro factor es que la documentación del indicador CCF lo caracteriza como no sensible ante desplazamientos verticales, lo cual se presenta precisamente en esta falla.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	$\Delta$ Máx-Mín
Fractura Aislamiento	CONFIG.1	B1	20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   12.6-20.0 MHz	No detecta	0.240	0.908	0.668
			12.6-20.0 MHz			0.917	0.940	0.023
	CONFIG.2		20.0-317.0 Hz	20.0-502.4 Hz   3.2-5.0 MHz	2.0-3.2 MHz	0.217	0.942	0.725
			2.0-3.2 MHz			0.960	0.960	0
	CONFIG.3		20.0-200.0 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	126.2-200.0 Hz	0.481	0.950	0.469
			12.6-20.0 MHz			0.539	0.632	0.093

Tabla 6.8: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad fractura de aislamiento principal

En la tabla 6.9 se presentan los resultados del caso de sensibilidad para la flexión de bobina. Las configuraciones 2 y 3 muestran superposición de rangos de detección con aquellos influenciados por los cables coaxiales. La configuración 1 detecta rangos efectivos, aunque tanto la sensibilidad de flexión interna como externa presentan valores bajos de  $\Delta$ max-min, lo cual dificulta la detección de esta falla y puede presentar enmascaramiento por otra perturbación predominante.

Tipo Sensibilidad	Configuración	Bobina	Rango afectado (sensibilidad)	Rango no interpretable (cables)	Rango efectivo	CCF Mínimo	CCF Máximo	$\Delta$ Máx-Mín
Flexión Interna	CONFIG.1	B6	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz	502.4-796.2 kHz	0.133	0.958	0.825
			502.4-796.2 kHz			0.904	0.956	0.052
	CONFIG.2		20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   796.2 kHz - 1.3 MHz   3.2-5.0 MHz	No detecta	0.293	0.959	0.666
			796.2 kHz - 1.3 MHz			0.955	0.955	0
	CONFIG.3		20.0-126.2 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.593	0.953	0.36
			8.0-20.0 MHz			0.400	0.950	0.55
Flexión Externa	CONFIG.1	B6	20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz	502.4-796.2 kHz	0.252	0.948	0.696
			502.4-796.2 kHz			0.887	0.952	0.065
	CONFIG.2		20.0-200.0 Hz	20.0-502.4 Hz   796.2 kHz - 1.3 MHz   3.2-5.0 MHz	No detecta	0.287	0.939	0.652
			796.2 kHz - 1.3 MHz			0.520	0.667	0.147
	CONFIG.3		20.0-126.2 Hz	20.0-126.2 Hz   8.0-20.0 MHz	No detecta	0.495	0.920	0.425
			8.0-20.0 MHz			0.425	0.795	0.37

Tabla 6.9: Rangos de frecuencia característicos - sensibilidad a flexión de bobina

## 6.7. Caracterización por configuración de medición

### 6.7.1. Configuración 1 - Inductiva

▪ **Ventajas:**

- Muestra clara sensibilidad ante fallas topológicas, como lo es el cortocircuito entre vueltas y de aislamiento principal a tierra. Se visualizan claramente las diferencias de atenuación progresiva. El patrón de cambio de la curva es mayor a 10 dB por lo que es totalmente detectable.

▪ **Desventajas:**

- Configuración insensible a la detección de fallas que varían la geometría, como son la fractura de aislamiento principal y flexión. Se comprueba lo descrito en la referencia Cigré TB 812, que indica que el CCF es insensible a desplazamientos verticales, lo cual ocurre en la falla de fractura (tabla B.1). En la falla de flexión

se obtiene una alerta solo en la etapa 2 y 3 (tabla B.16). Se debe considerar la evaluación con otro indicador no redundante.

### 6.7.2. Configuración 2 - Inductiva a tierra

#### ■ Ventajas:

- Amplifica variaciones mediante conexión a tierra, generando diferencias superiores a Configuración 1 para fallas equivalentes.
- Presenta sensibilidad progresiva clara con variaciones CCF en pérdida de cinta semiconductora. Permite monitoreo de evolución temporal del deterioro.

#### ■ Desventajas:

- La conexión a tierra del aislamiento introduce variabilidad adicional en indicadores CCF debido a la calidad de dicha conexión a tierra. Esto se verifica en la falla de flexión en donde no se mantiene la tendencia progresiva. Esta configuración de conexión requiere protocolos estrictos de aterrizamiento para que los resultados sean reproducibles.

### 6.7.3. Configuración 3 - Capacitiva

#### ■ Ventajas:

- Demuestra menor sensibilidad a disposición de cables y conectores en relación a la variabilidad del CCF, proporcionando mediciones más estables y siendo más reproducible que las demás conexiones.

#### ■ Desventajas:

- Al manifestar valores de CCF como alertas de falla en rangos de altas frecuencias, algunas fallas pueden enmascarse en la zona donde hay más incertidumbre.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Se ha realizado un estudio de sensibilidad de la técnica de diagnóstico para fallas mecánicas en el aislamiento de máquinas eléctricas, denominada “Análisis de respuesta en frecuencia”, aplicada a bobinas preformadas de máquinas rotatorias de media tensión. Se recopilan las referencias técnicas con prácticas desarrolladas para transformadores de potencia y se adaptan las metodologías experimentales de laboratorio y análisis numérico para determinar el comportamiento de las respuestas ante distintas variaciones y sensibilidades asociadas tanto a la variabilidad inherente de la medición como a fallas inducidas, con el objetivo de estudiar y caracterizar patrones. Del trabajo realizado se puede extraer las siguientes conclusiones.

### 7.1. Trabajo en el laboratorio

- El estudio del FRA se orientó a evaluar sensibilidades ante diferentes modificaciones en la medición, lo que no permite determinar la repetibilidad real de la técnica. Para establecer dicha repetibilidad se requiere ejecutar múltiples mediciones consecutivas de cada probeta, manteniendo invariables las condiciones del sistema de medición, incluyendo la disposición de cables, la posición del instrumento y las condiciones ambientales.
- La variación de la disposición de los cables coaxiales se desarrolló exitosamente, obteniéndose diferencias menores entre en las curvas. Se recomienda utilizar cables de menor longitud para controlar adecuadamente la posición y el estiramiento, facilitando además el transporte dentro del laboratorio, especialmente en espacios reducidos.
- Se valida exitosamente la adaptación de los conectores pequeños para bobinas preformadas, mejorando la resistencia de contacto mediante las prensas. Esta validación se confirma a través de la prueba de cero decibel, donde el conector alcanza mayor aproximación al cero que los conectores originales del instrumento.
- El método de aterrizar las pantallas de los cables coaxiales con conductores tipo malla no se considera la forma más óptima ni estable para realizar este procedimiento, dado que se presentaron problemas de desconexiones involuntarias y cruces de conductores que invalidaron las mediciones en múltiples ocasiones, requiriendo su repetición. Además no siempre fue posible utilizar el mismo largo de conexión hacia la toma a

tierra del laboratorio, debido a los cambios de posición requeridos para medir ciertas configuraciones en las probetas.

- En la configuración 2, donde se conecta el aislamiento principal a tierra, se recomienda establecer una normalización adecuada para el procedimiento de conexión a tierra. Aunque se emplea consistentemente el mismo conductor con igual longitud, no se verifica si resulta preferible utilizar el conductor estirado o en otra disposición específica, ni se determina la influencia de su longitud en los resultados.
- El uso de bobinas y cintas semiconductoras “recicladas” representó un grado de incertidumbre no cuantificable, dado que visualmente no se determinó la calidad del aislamiento ni el nivel de deterioro real de las bobinas. Se detectaron fallas visibles únicamente en las bobinas B2 y B3, las cuales se documentaron. Solo la falla de la bobina B3 resultó determinante para condicionar el ensayo de cortocircuito entre vueltas.

## 7.2. Resultados experimentales

### 7.2.1. Generales

- Las gráficas FRA obtenidas para la bobina preformada de máquina rotatoria en las configuraciones 1 y 2 se caracterizan por su simplicidad, presentando una sola resonancia característica y predominio resistivo-inductivo, comportamiento que prevalece en la mayor parte del ancho de banda. Estas gráficas difieren significativamente de aquellas estudiadas en transformadores, debido a las diferencias en la complejidad del sistema dieléctrico.
- Las tres configuraciones de conexión propuestas modifican la función de transferencia característica del sistema. Esto permite aislar parcial y totalmente la influencia de los elementos inductivos y capacitivos de cada bobina para analizar el comportamiento de la respuesta en frecuencia.
- Aunque se miden bobinas distintas entre sí, no provenientes del mismo proceso de fabricación en serie, se logran caracterizar en zonas comunes correspondientes a los puntos de inflexión de las curvas, relacionados con el comportamiento e interacción R-L-C. Se definen rangos característicos para cada configuración de conexión: cuatro zonas para las configuraciones 1 y 2, y tres zonas para la configuración 3.
- El indicador CCF demuestra efectividad para detectar fallas topológicas severas (cortocircuito, degradación de cinta semiconductor) pero presenta limitaciones significativas en fallas que varían la geometría de la probeta como es la fractura de aislamiento y flexión. Se recomienda su uso complementario con otros indicadores no redundantes, especialmente para fallas que generan desplazamientos verticales en la respuesta FRA.
- Se considera el análisis de sensibilidad de cables coaxiales como el más relevante, ya que permite identificar los umbrales de frecuencia que no proporcionan información confiable para la interpretación, al presentar indicadores CCF inferiores al rango establecido por las referencias técnicas investigadas. Estos rangos se distribuyen principalmente en los extremos del ancho de banda de la curva. El umbral en bajas

frecuencias permanece prácticamente constante en todas las bobinas medidas en las configuraciones 1 y 2, correspondiendo al rango 20-796 Hz. En la configuración 3, este umbral disminuye a 20-126.2 Hz. El umbral en altas frecuencias presenta mayor variabilidad según la configuración y bobina ensayada. Se establece como protocolo la identificación de estos rangos previo a la ejecución de pruebas posteriores.

- Para bobinas preformadas individuales se recomienda considerar mas puntos de medición por década en la zona de bajas frecuencias, con el fin de minimizar el umbral indicadores fuera de rango.
- El FRA demuestra una capacidad de diagnóstico complementaria a técnicas tradicionales como Tangente  $\delta$  y Surge test, siendo especialmente efectivo para detección temprana de degradación de cinta semiconductor no detectable por métodos convencionales.
- Se introduce un indicador de severidad de la falla el cual consiste entre la diferencia de entre el valor máximo y mínimo del indicador CCF, el cual resultó revelar falla severas cuando su valor es mayor que uno.
- El comportamiento diferente de la bobina B8 demostró que el FRA no detecta solo fallas, sino también diferencias de fabricación no visibles. Esta bobina respondió de forma inversa a lo esperado en las gráficas analizadas. Este hallazgo amplía las aplicaciones del FRA como herramienta de control de calidad.

### 7.2.2. Sensibilidades de la medición

- La sensibilidades de variación de cables coaxiales y conectores presentan diferencias mínimas entre las curvas revisadas, validándose la alta reproducibilidad de la técnica, especialmente en las configuraciones de conexión 1 y 3, que proporcionan mejores resultados de reproducibilidad para ambas sensibilidades.
- Las curvas obtenidas en la configuración 2 resultaron ser la más susceptibles a variaciones en el sistema de medición.
- Se valida la implementación del conector adaptado mediante las curvas, obteniéndose diferencias mínimas respecto al conector original.
- El ensayo de superficie de contacto evidencia que las variaciones en el material de ranura modifican significativamente la respuesta FRA, especialmente en presencia de materiales ferromagnéticos.

### 7.2.3. Sensibilidades a fallas inducidas

- Las fallas de aislamiento principal a tierra y cortocircuito entre vueltas de bobina preformada pueden prescindir del análisis con indicadores numéricos ya que por el nivel de criticidad son detectables exitosamente de forma visual.
- Las fallas que alteran la geometría de la probeta como la fractura del aislamiento y la flexión no fueron detectadas claramente. Se considera que no fueron lo suficientemente severas para provocar cambios relevantes en la respuesta en frecuencia.

- Las fallas de deterioro dieléctrico del sistema, como la simulación de deterioro de la cinta semiconductor protectora y la contaminación superficial de cabezales, requieren análisis con indicadores numéricos para revelar las diferencias entre etapas temporales. Solo se visualizan diferencias con múltiples cambios progresivos como se simuló en el laboratorio; sin embargo, la diferencia visual entre dos etapas consecutivas resulta mínima. La configuración 2 es la efectiva de visualización de este fenómeno de deterioro.

#### 7.2.4. Aportes del estudio

- Este trabajo establece una metodología de aplicación del FRA a bobinas preformadas individuales de máquinas rotatorias, adaptando exitosamente las prácticas desarrolladas para transformadores según Cigre TB 812. Se definen tres configuraciones de medición específicas (inductiva, inductiva a tierra y capacitiva) que permiten aislar y analizar diferentes aspectos del sistema dieléctrico.
- Se identifican y documentan patrones característicos de respuesta FRA para seis tipos de fallas en bobinas preformadas: cortocircuito entre vueltas, aislamiento principal a tierra, degradación de cinta semiconductor, contaminación superficial, fractura de aislamiento y flexión.
- Se determinan rangos de frecuencia característicos para bobinas preformadas que difieren de los establecidos para transformadores:
  - Zona no interpretable en bajas frecuencias.
  - Resonancia principal característica: 0.5-1.7 MHz
  - Zona de comportamiento capacitivo: >2 MHz

Estos rangos constituyen una referencia para futura estandarización.

- Se introduce y valida un indicador de severidad basado en la diferencia entre valores máximo y mínimo del CCF, estableciendo el umbral mayor a 1 como resultado de una falla de severidad crítica.
- Se establece un protocolo de selección de configuración basado en el tipo de falla sospechada:
  - Configuración 1: Mejor para fallas topológicas (cortocircuito, aislamiento a tierra)
  - Configuración 2: Mejor para detección de degradación dieléctrica progresiva.
  - Configuración 3: Reproducibilidad y estabilidad para análisis comparativo.
- Se desarrolla y valida un sistema de conectores adaptados específicamente para bobinas preformadas, mejorando la calidad de contacto y reproducibilidad respecto a los conectores estándar del FRAX101. Esta adaptación facilita la implementación práctica de la técnica en entornos industriales.
- Se desarrolla una metodología para selección de indicadores estadísticos basada en criterios de redundancia matemática, correlación estadística y sensibilidad por zona de frecuencia, proporcionando un marco reproducible para futuros estudios.

### 7.2.5. Trabajos futuros

- **Incremento significativo del tamaño muestral:** Realizar series de medición sobre un número estadísticamente representativo de bobinas preformadas ( $n > 50$  por tipo de falla) para establecer distribuciones de probabilidad de indicadores FRA y umbrales de detección con intervalos de confianza robustos.
- **Uniformidad de serie de fabricación:** Emplear bobinas preformadas pertenecientes a un mismo lote de producción, garantizando idénticas características geométricas, materiales aislantes, procesos de curado y tratamientos de impregnación, permitiendo atribuir variaciones de FRA exclusivamente a los tipos de falla introducidos experimentalmente.
- **Repetibilidad intra-bobina:** Realizar múltiples mediciones FRA sobre cada bobina en diferentes momentos temporales bajo condiciones ambientales controladas, cuantificando la variabilidad intrínseca del método y estableciendo límites de repetibilidad.
- **Ensayos en bobinas de máquinas reales en servicio:** Extender la metodología desarrollada a bobinas preformadas extraídas de máquinas rotatorias en operación industrial, correlacionando firmas FRA con historial operacional documentado y resultados de técnicas de diagnóstico tradicionales aplicadas previamente.
- **Protocolo de implementación en línea de producción:** Desarrollar procedimiento estandarizado de medición FRA como control de calidad al 100 % en proceso de fabricación de bobinas preformadas, incluyendo criterios de aceptación/rechazo.
- **Implementación de métodos alternativos de análisis FRA:** Evaluar la aplicabilidad de técnicas adicionales propuestas en CIGRÉ TB 812 que se dejaron fuera del alcance de este estudio, las cuales fueron descritas en la sección 2.8.

# Apéndice A

## Gráficas complementarias

### A.1. Medición - Sensibilidad a cables coaxiales

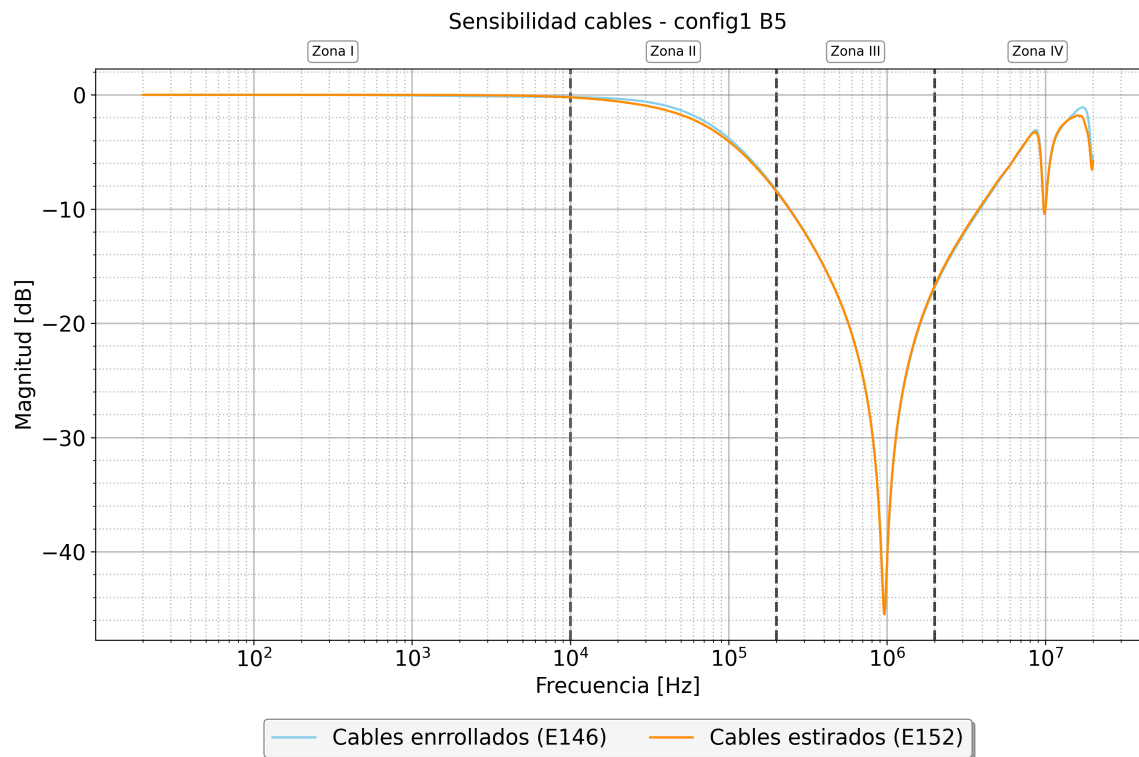


Figura A.1: Comparación FRA cables coaxiales - configuración 1 - B5

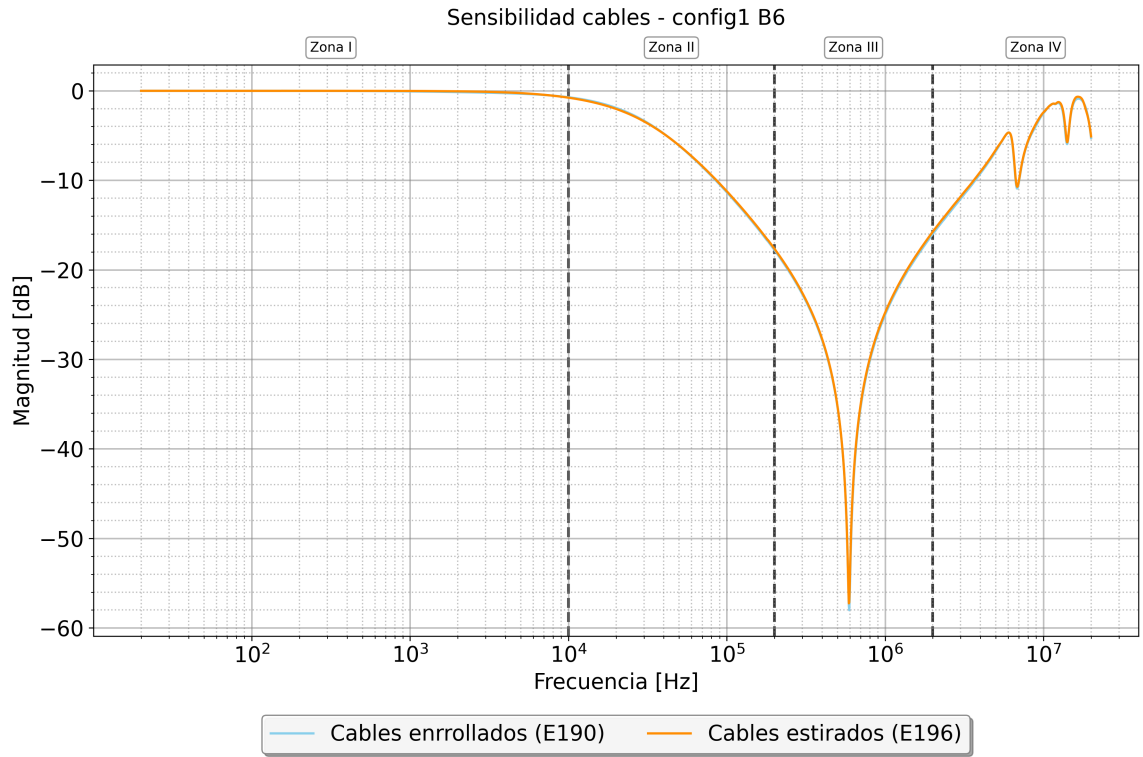


Figura A.2: Comparación FRA cables coaxiales - configuración 1 - B6

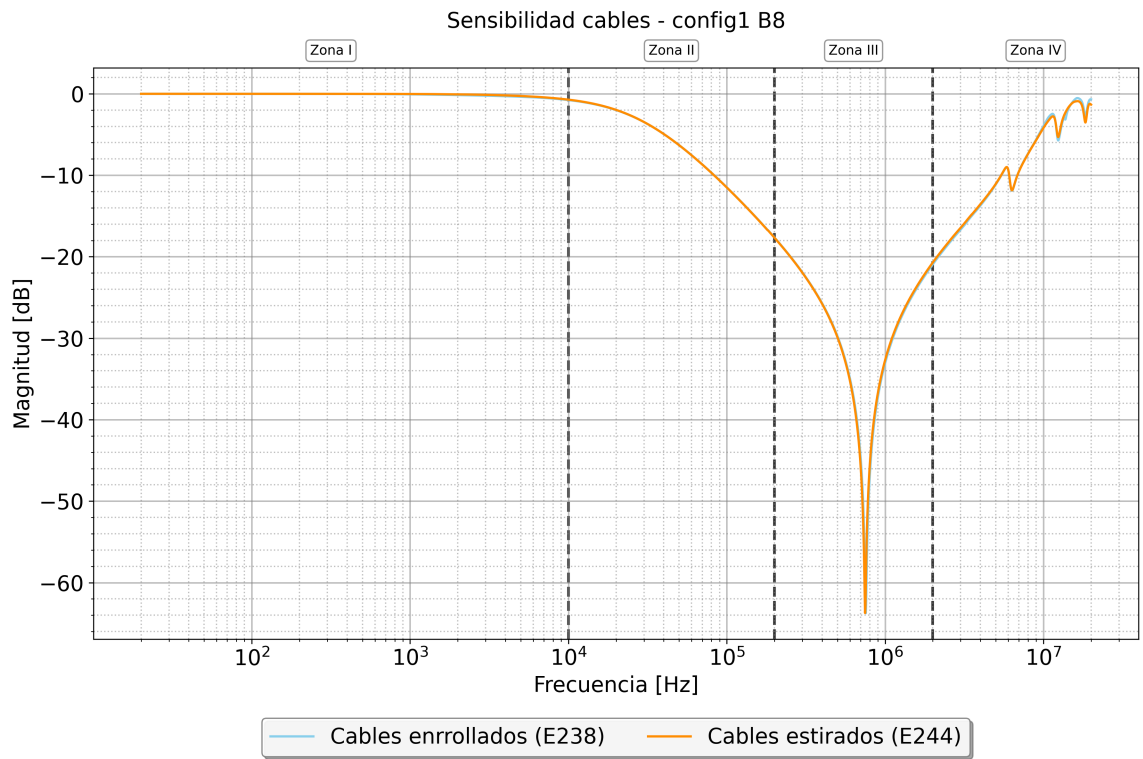


Figura A.3: Comparación FRA cables coaxiales - configuración 1 - B8

## A.2. Medición - Sensibilidad a tipo de conector

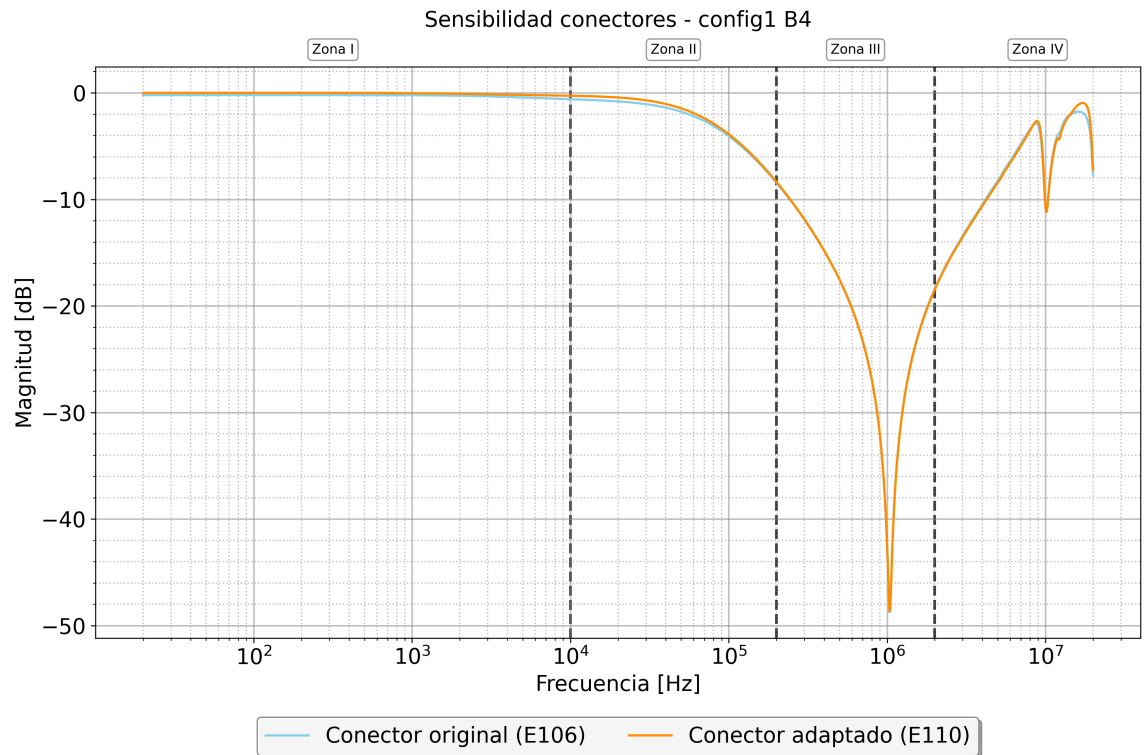
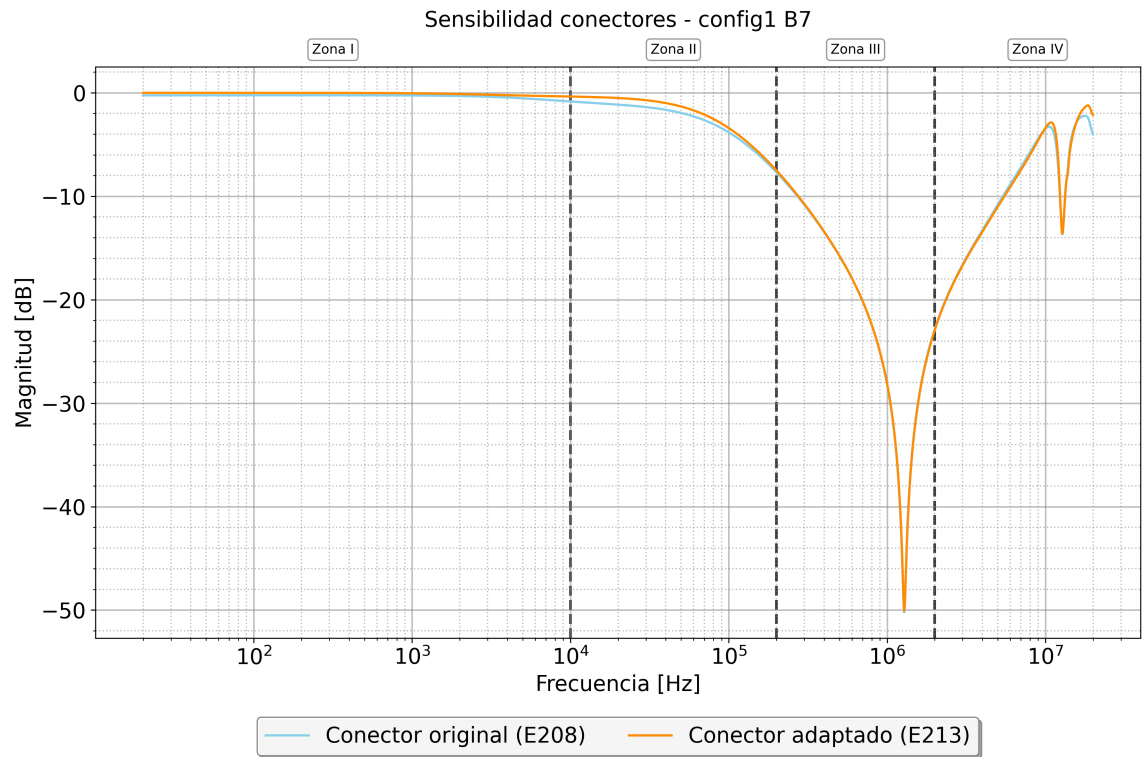


Figura A.4: Comparación FRA conectores - configuración 1 - B4



**Figura A.5:** Comparación FRA conectores - configuración 1 - B7

### A.3. Medición - Superficie de contacto de ranura

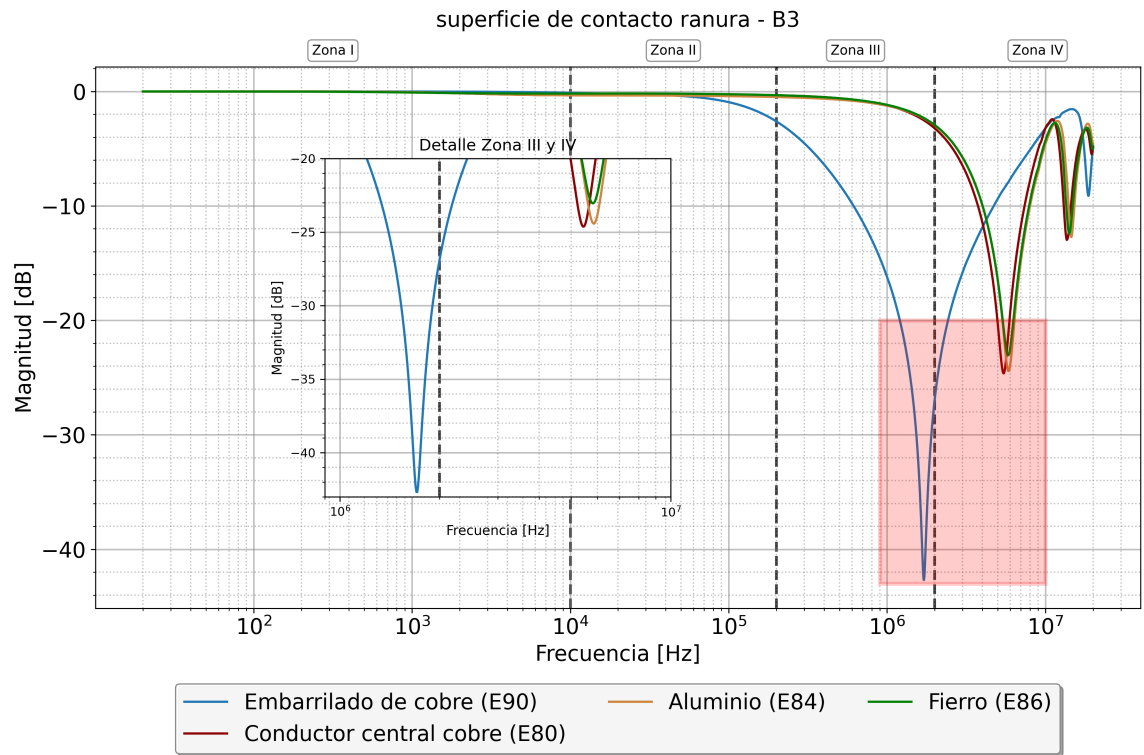


Figura A.6: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 1 - B3

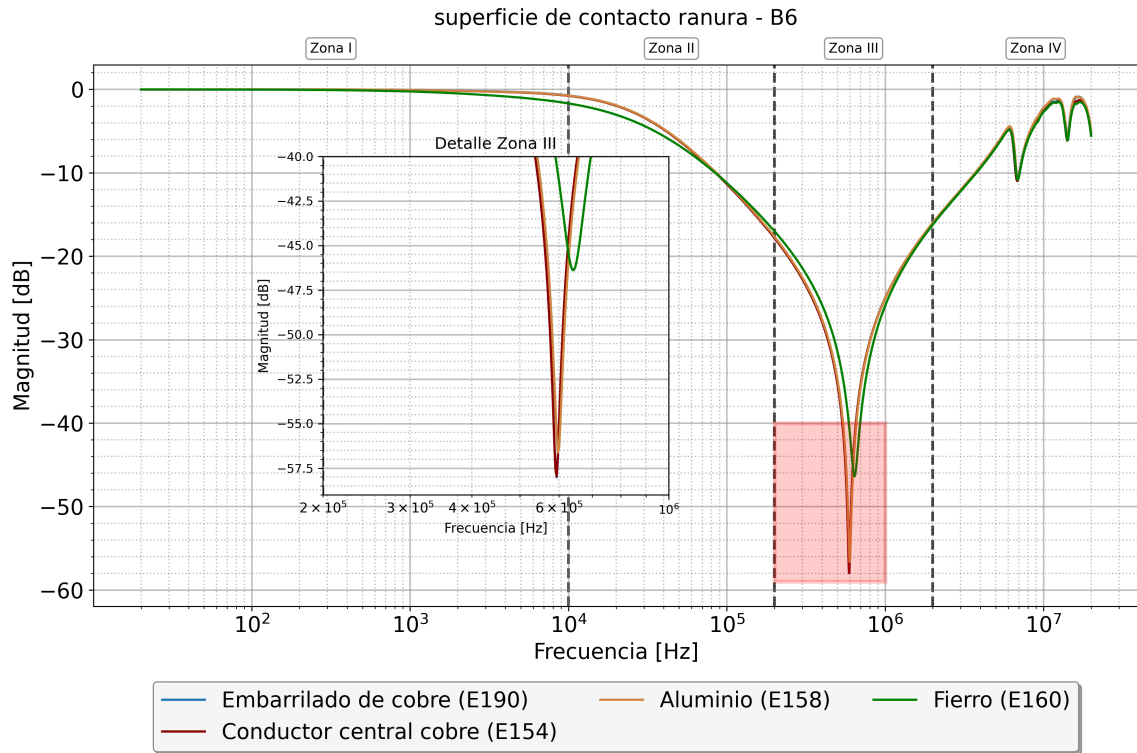


Figura A.7: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 1 - B6

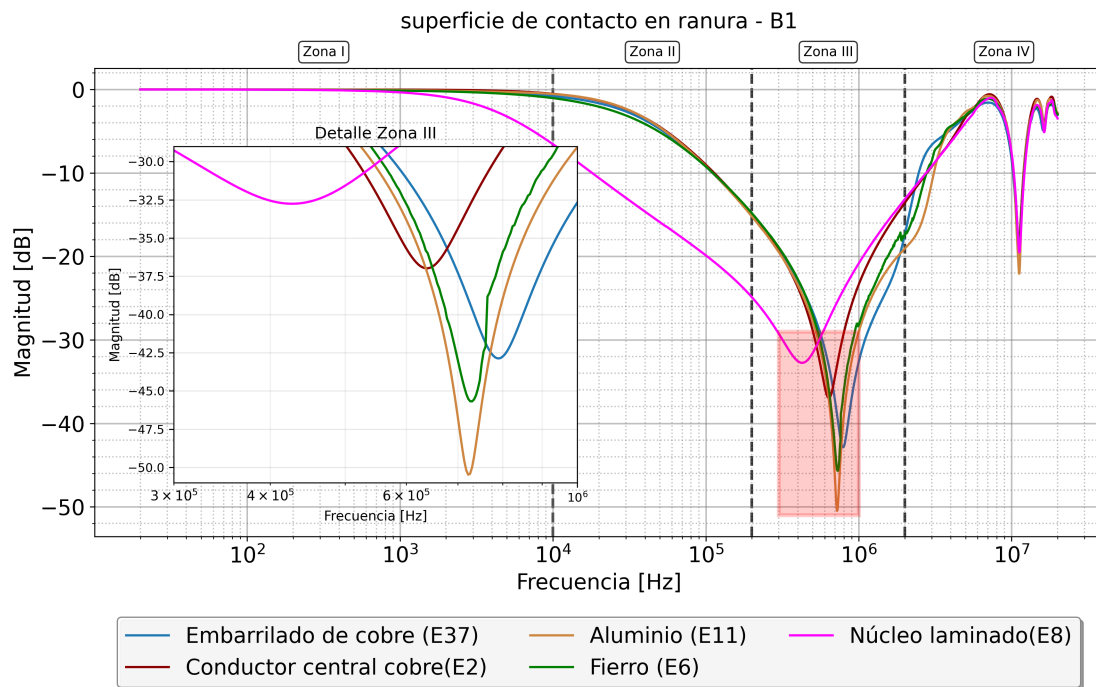


Figura A.8: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 2 - B1

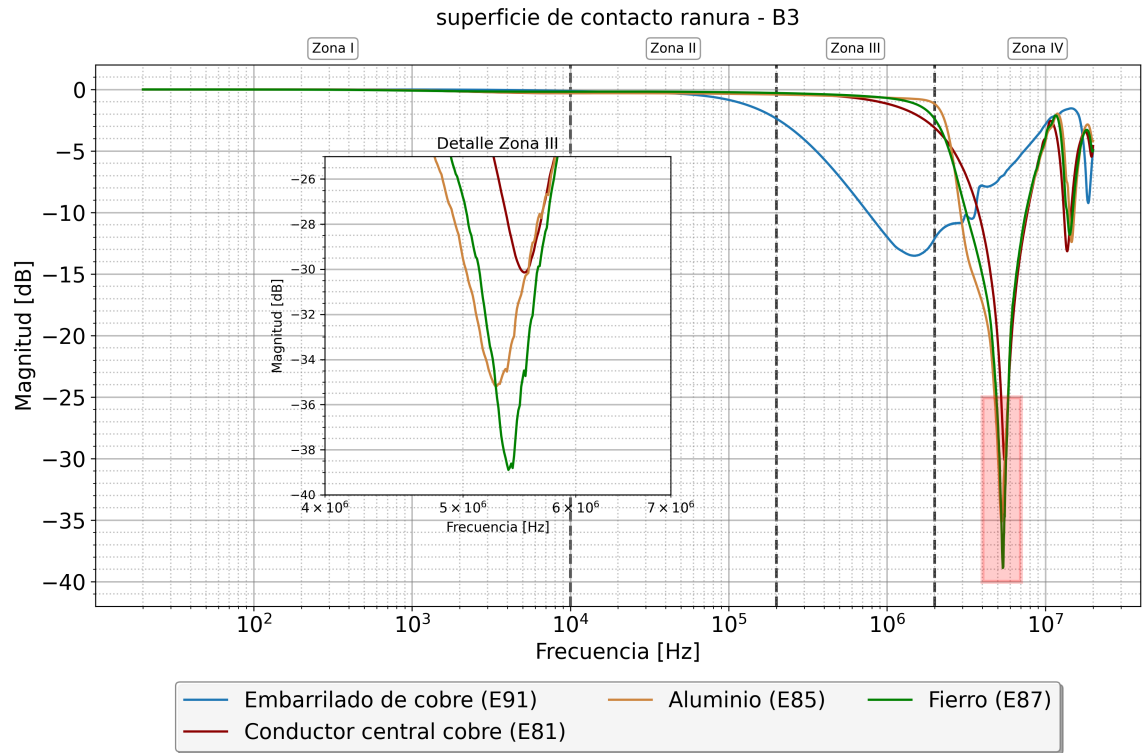


Figura A.9: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 2 - B3

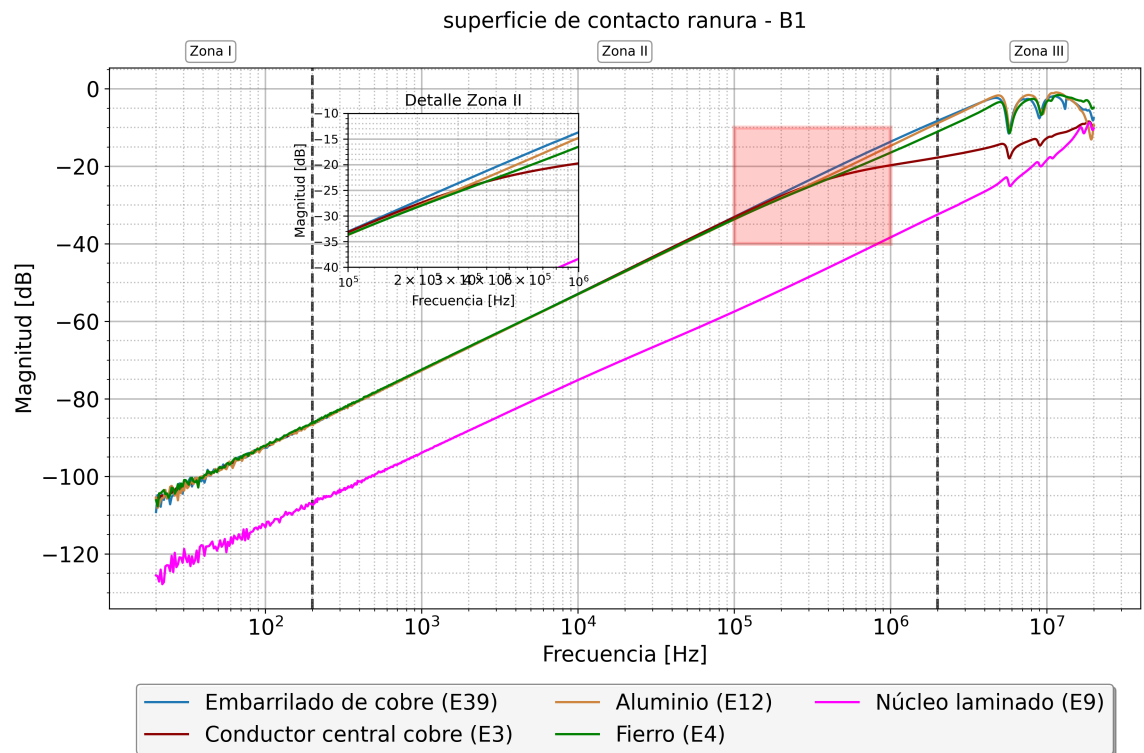


Figura A.10: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 3 - B1

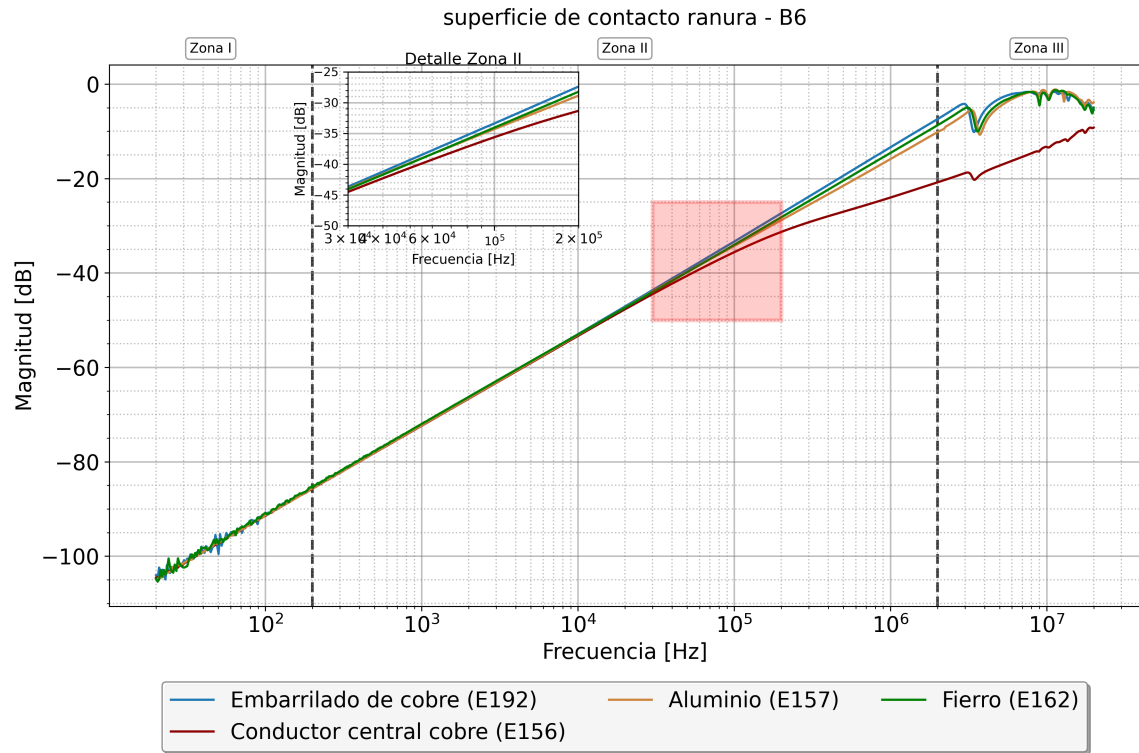


Figura A.11: Comparación FRA superficies de contacto de ranura - configuración 3 - B6

### A.4. Medición - Falla a tierra

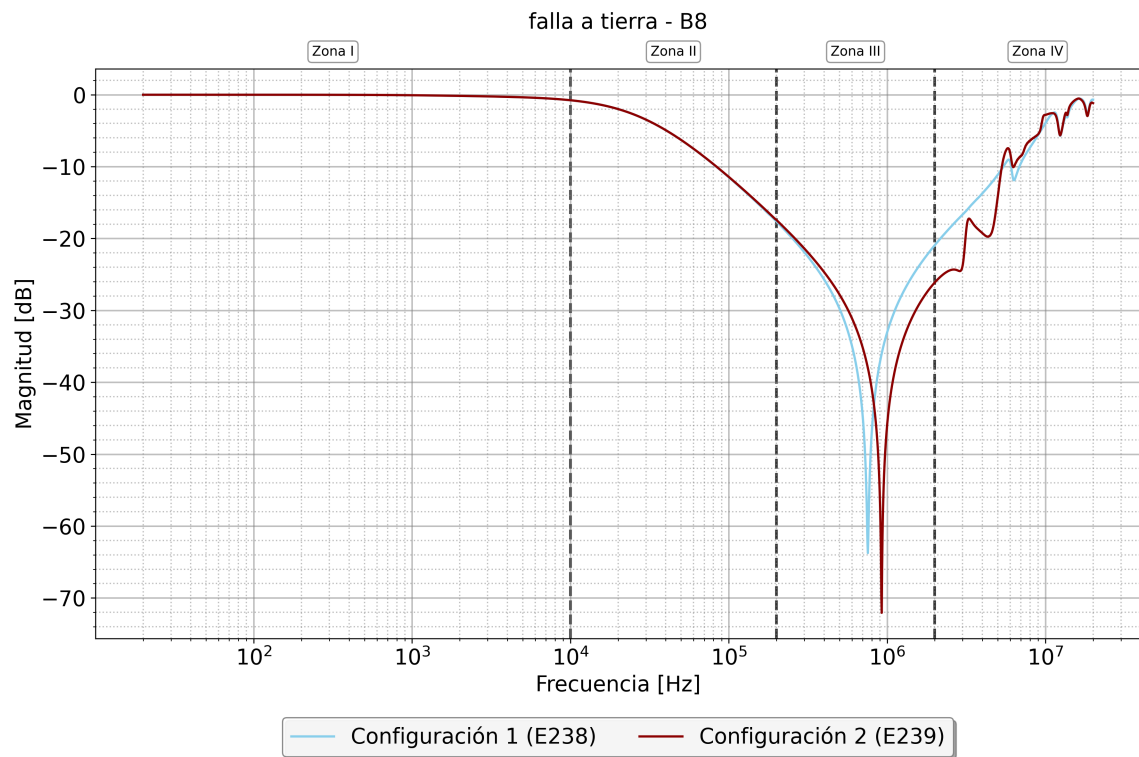
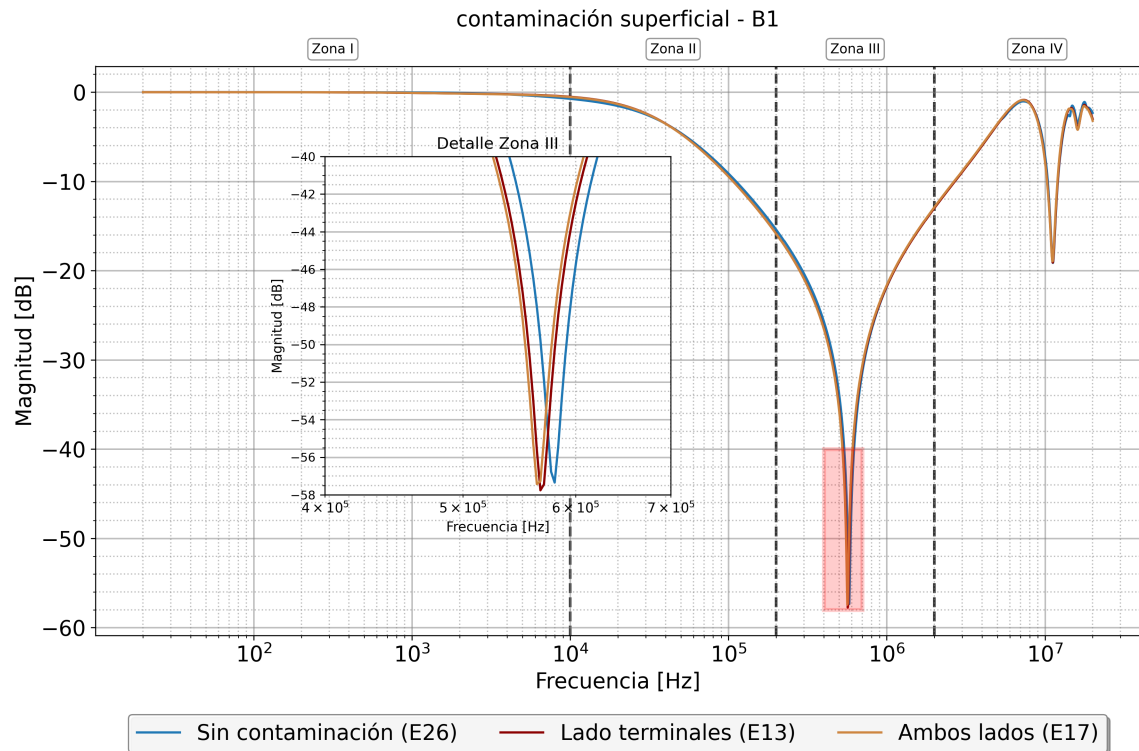


Figura A.12: Comparación FRA falla a tierra - B8

### A.5. Medición - Contaminación superficial



**Figura A.13:** Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 1 - B1

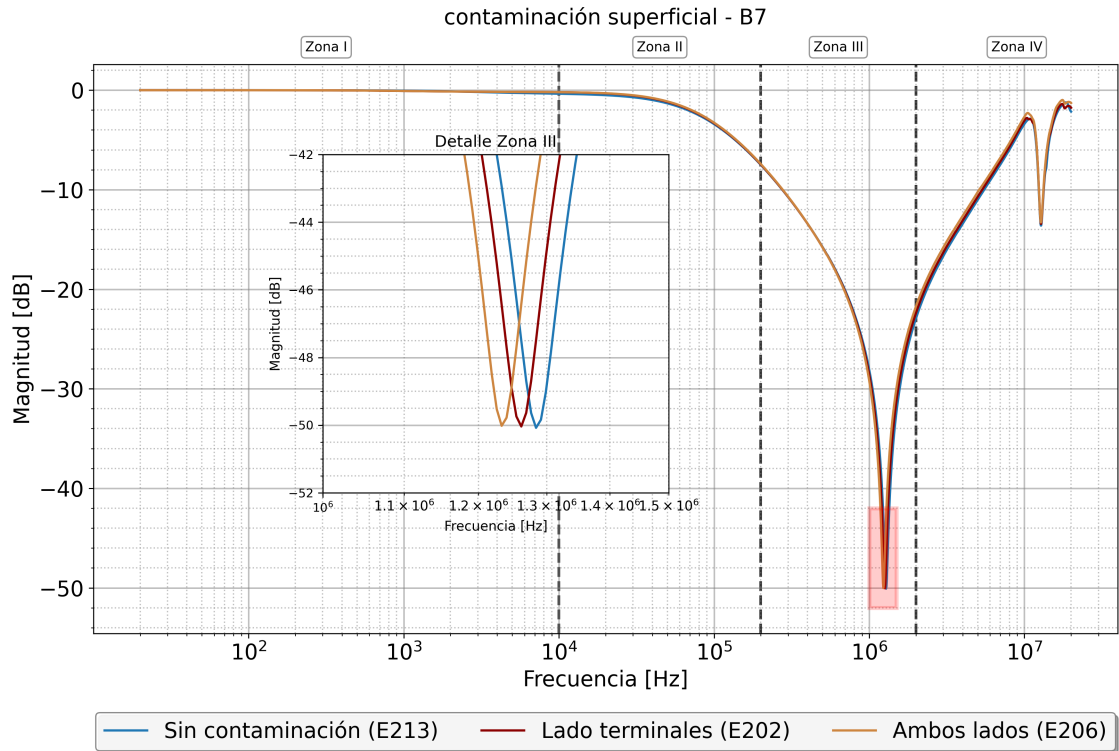


Figura A.14: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 1 - B7

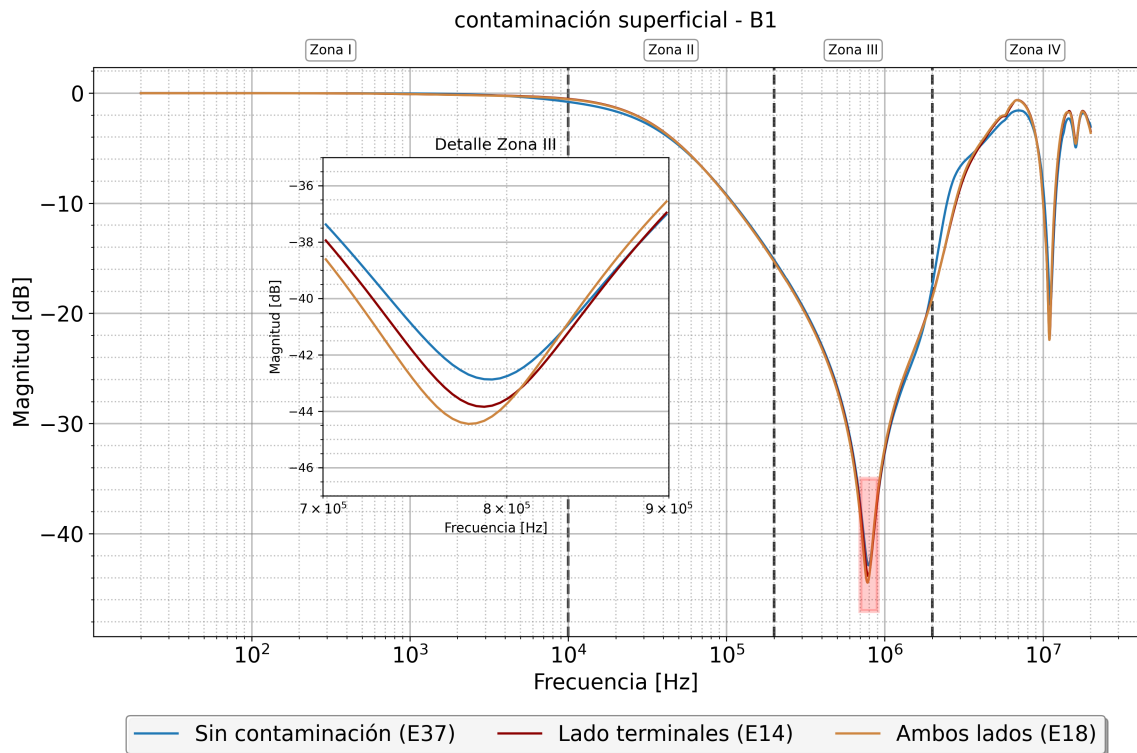


Figura A.15: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 2 - B1

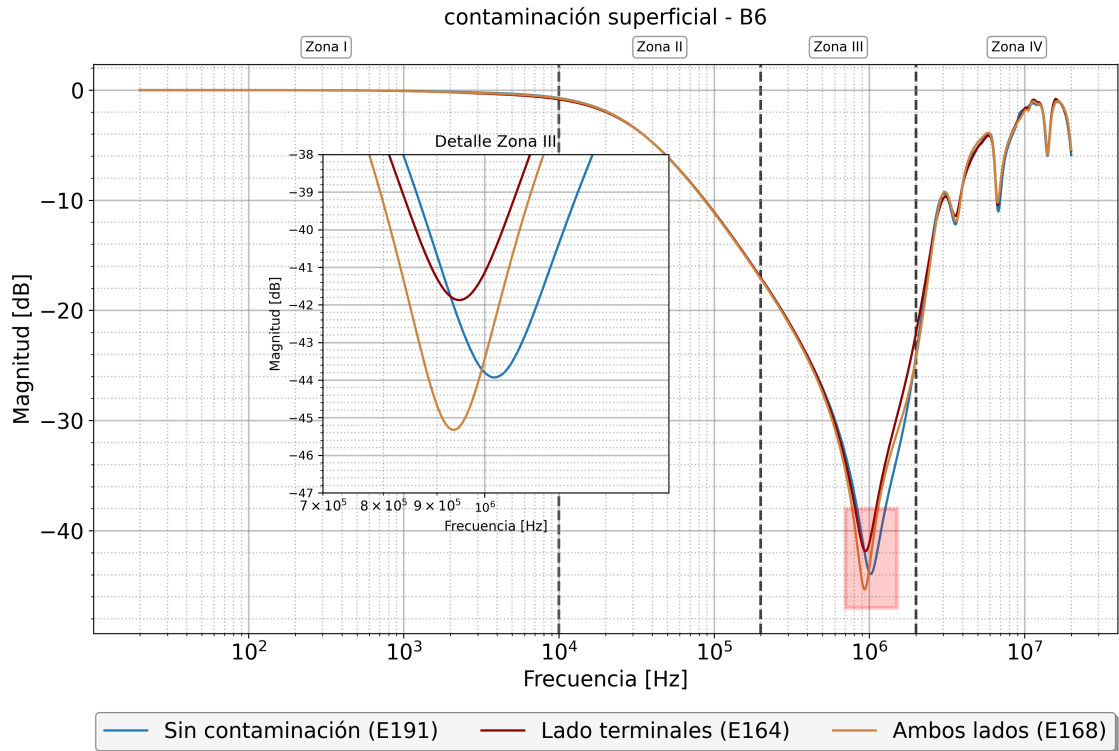


Figura A.16: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 2 - B6

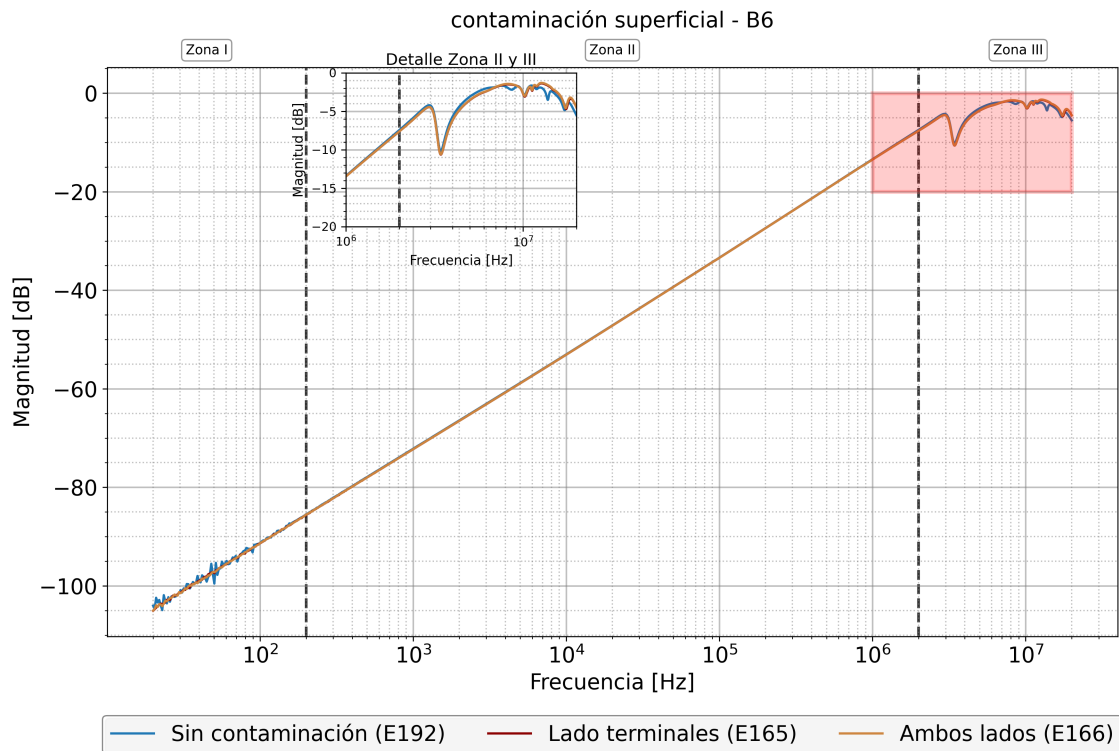


Figura A.17: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 3 - B6

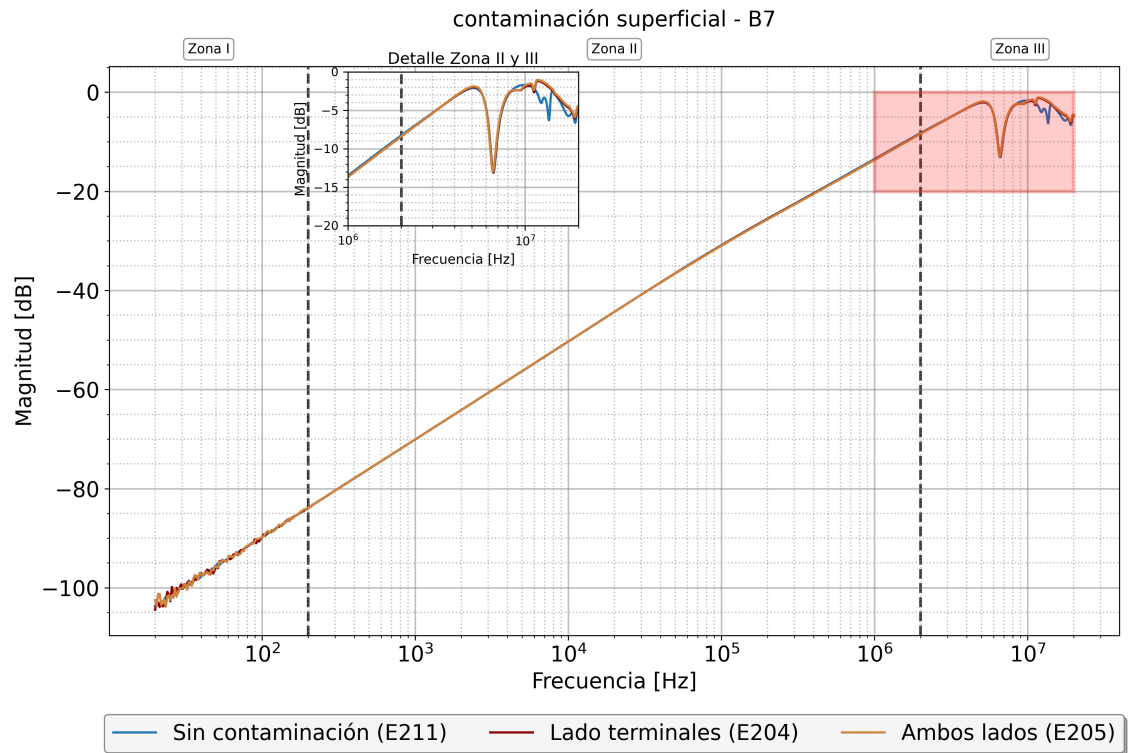


Figura A.18: Comparación FRA simulación de contaminación superficial - configuración 3 - B7

### A.6. Medición - Pérdida de cinta semiconductor

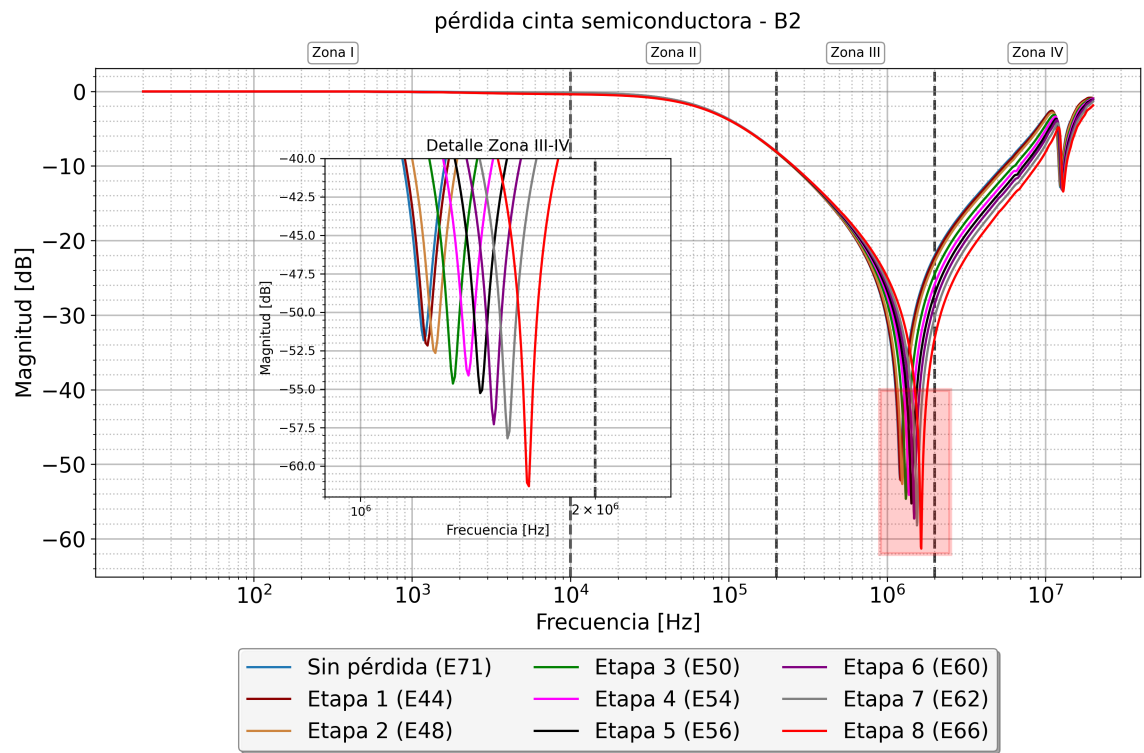


Figura A.19: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 1 - B2

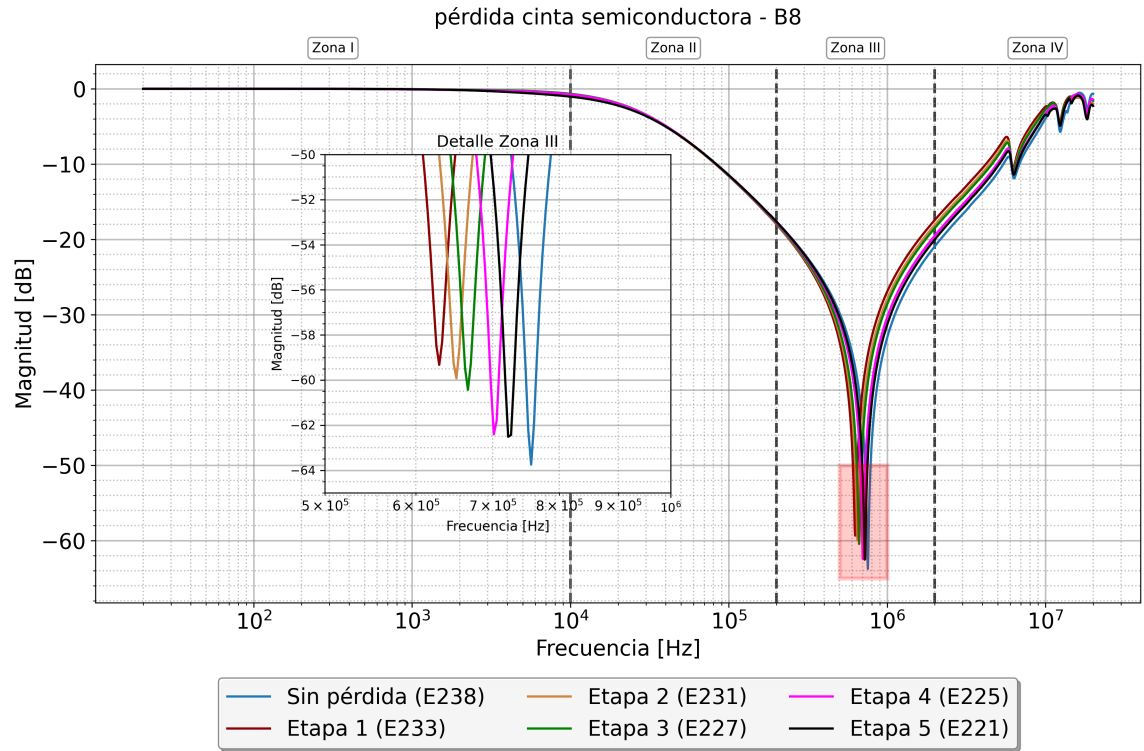


Figura A.20: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 1 - B8

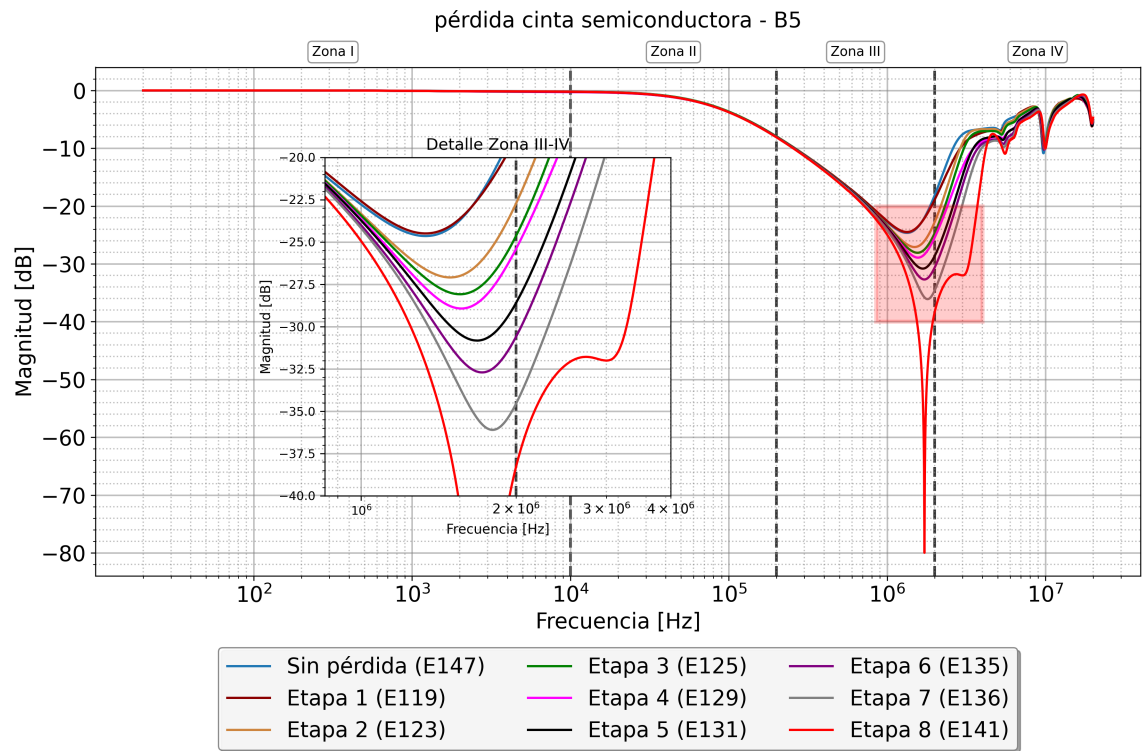


Figura A.21: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 2 - B5

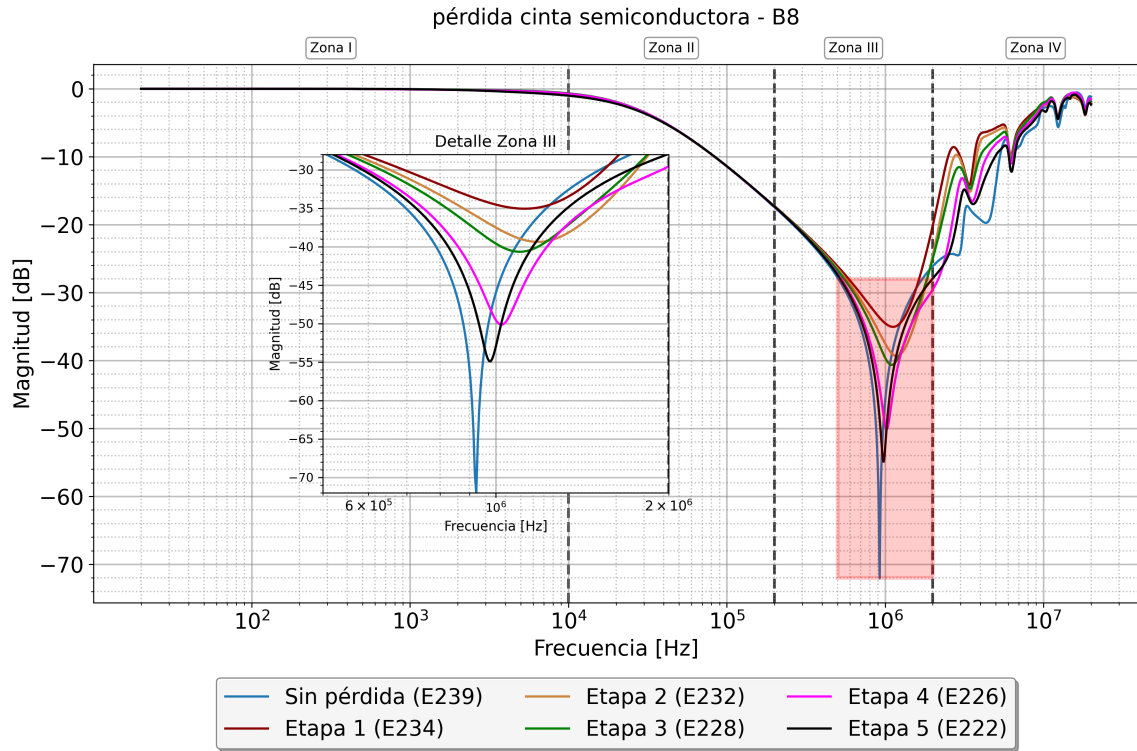


Figura A.22: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 2 - B8

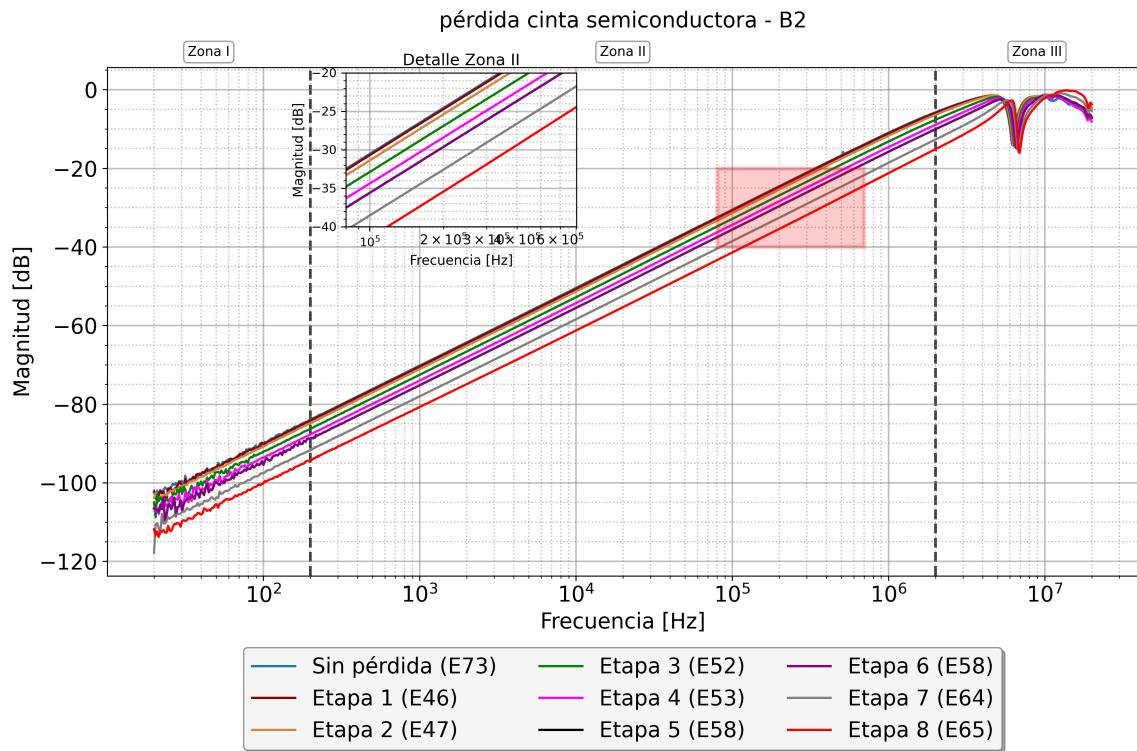


Figura A.23: Comparación FRA pérdida de cinta semiconductor - configuración 3 - B2



# Apéndice B

## Tablas de resultados - indicadores numéricos calculados

### B.1. Resultados indicadores - Bobina B1

Etiqueta Voltaje	Zona	Cable	Conector	Contaminación Rango 1	Contaminación Rango 2	Fractura Rango 1	Fractura Rango 2	Falla a tierra	Superficie CONDUCTOR CENTRAL	Superficie NUCLEO LAMINADO	Superficie PAPEL ALUMINIO	Superficie PERFIL DE FIERRO
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.596	0.372	0.594	0.561	0.485	0.418	0.720	0.605	0.359	0.617	0.403
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.277	0.310	0.310	0.557	0.240	0.309	0.322	0.373	0.208	0.155	0.233
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.710	0.882	0.849	0.647	0.753	0.769	0.622	0.802	0.796	0.850	0.785
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.693	0.791	0.756	0.763	0.843	0.794	0.750	0.506	0.572	0.726	0.567
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.556	0.835	0.873	0.878	0.870	0.891	0.830	0.749	0.773	0.864	0.781
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.808	0.868	0.892	0.886	0.908	0.905	0.896	0.843	0.877	0.914	0.879
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.901	0.980	0.982	0.985	0.985	0.987	0.967	0.953	0.981	0.988	0.980
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.981	0.998	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.987	0.996	0.998	0.995
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.997	0.999	0.997	0.998	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.999	1.000	0.995	0.996	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	0.998	0.999
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	0.998	0.998	0.997	0.998	1.000	1.000	1.000	0.997	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	0.999	1.000	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	0.999	1.000	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.997	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.997	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.995	1.000	0.521	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	0.993	0.994	0.938	0.905	0.980	0.979	-0.709	0.990	0.645	0.988	0.813
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.996	1.000	0.998	1.000	1.000
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.988	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.978	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	0.982	0.952	0.999	0.998	1.000	0.999	0.981	0.999	0.999	0.999	0.998
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	1.000	0.993	0.998	0.994	0.999	0.999	0.989	1.000	0.999	0.990	0.998
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.941	0.820	0.931	0.877	0.917	0.940	0.905	0.890	0.909	0.918	0.906

Tabla B.1: Umbrales de sensibilidad CCF - B1 - Configuración 1

Etiqueta Ventana	Zona	Cable	Contaminación Etapa 1	Contaminación Etapa 2	Fractura Etapa 1	Fractura Etapa 2	Superficie CONDUCTOR CENTRAL	Superficie NUCLEO LAMINADO	Superficie PAPEL ALUMINIO	Superficie PERFIL DE FIERRO
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.224	0.433	0.172	0.219	0.217	0.407	0.067	0.509	-0.009
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.226	0.426	0.233	0.383	0.534	0.526	0.273	0.372	0.287
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.579	0.719	0.567	0.527	0.466	0.703	0.614	0.569	0.670
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.591	0.806	0.851	0.809	0.770	0.808	0.700	0.797	0.694
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.610	0.790	0.855	0.813	0.860	0.650	0.780	0.879	0.795
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona II	0.704	0.996	0.933	0.940	0.942	0.851	0.901	0.932	0.990
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.933	0.974	0.977	0.976	0.979	0.957	0.968	0.974	0.967
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.986	0.994	0.995	0.996	0.996	0.989	0.995	0.996	0.994
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.998	0.997	0.998	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	1.000	0.995	0.995	0.996	0.998	1.000	1.000	0.996	0.999
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	1.000	0.998	0.997	0.997	0.997	1.000	1.000	0.996	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	0.999	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	0.999	0.999	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.997	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	1.000
DSV3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	0.996	0.990	-0.032	-0.986	0.894	0.877
DSV4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	0.998	1.000	0.999	0.999	0.994	0.997	0.989	0.998	0.996
DSV5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	0.999	0.995	0.996	0.994	0.983	0.986	0.990	0.978	0.953
DSV1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	0.994	0.981	0.982	0.974	0.960	0.978	0.977	0.892	0.966
DSV2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	0.926	0.993	0.993	0.985	0.969	1.000	1.000	0.959	0.959
DSV3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	0.997	0.980	0.984	0.975	0.970	0.991	0.988	0.945	0.997
DSV4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.999	0.979	0.970	0.994	0.996	0.999	0.986	0.995	0.993
DSV5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.973	0.930	0.894	0.965	0.974	0.917	0.926	0.898	0.949

Tabla B.2: Umbrales de sensibilidad CCF - B1 - Configuración 2

Etiqueta Ventana	Zona	Cable	Contaminación Etapa 1	Contaminación Etapa 2	Fractura Etapa 1	Fractura Etapa 2	Superficie CONDUCTOR CENTRAL	Superficie NUCLEO LAMINADO	Superficie PAPEL ALUMINIO	Superficie PERFIL DE FIERRO
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.576	0.487	0.647	0.481	0.581	0.684	0.563	0.353	0.636
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.579	0.586	0.682	0.845	0.694	0.734	0.439	0.755	0.628
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.926	0.868	0.902	0.874	0.848	0.945	0.592	0.926	0.887
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.928	0.948	0.949	0.950	0.936	0.978	0.890	0.945	0.961
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.982	0.982	0.965	0.970	0.950	0.982	0.931	0.958	0.970
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona II	0.987	0.995	0.991	0.990	0.989	0.995	0.957	0.990	0.990
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona II	0.993	0.997	0.993	0.994	0.994	0.997	0.978	0.991	0.993
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona II	0.998	0.999	0.998	0.998	0.999	0.999	0.994	0.998	0.999
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona II	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
DSV3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
DSV4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV1 (2.0-3.2 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DSV2 (3.2-5.0 MHz)	Zona III	0.999	0.998	0.999	1.000	1.000	0.957	0.962	0.990	0.976
DSV3 (5.0-8.0 MHz)	Zona III	0.997	0.997	0.994	0.999	0.998	0.932	0.687	0.930	0.954
DSV4 (8.0-12.6 MHz)	Zona III	0.935	0.920	0.930	0.983	0.988	0.854	0.660	0.708	0.707
DSV5 (12.6-20.0 MHz)	Zona III	0.435	0.613	0.640	0.632	0.539	-0.667	-0.688	0.852	0.863

Tabla B.3: Umbrales de sensibilidad CCF - B1 - Configuración 3





Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Superficie CONDUCTOR CENTRAL	Superficie PAPEL ALUMINIO	Superficie PERFIL DE FIERRO
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.903	0.932	0.878	0.795
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.949	0.954	0.950	0.940
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.990	0.992	0.961	0.963
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.995	0.996	0.984	0.991
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.997	0.997	0.993	0.994
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona II	0.998	0.998	0.997	0.998
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona II	0.999	0.999	0.998	0.998
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	0.999	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	0.999	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona III	1.000	0.999	1.000	1.000
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona III	0.997	0.990	0.994	0.994
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona III	0.844	0.123	0.684	0.344
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona III	0.990	0.242	-0.353	-0.430
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona III	0.834	-0.688	-0.373	-0.178

Tabla B.9: Umbrales de sensibilidad CCF - B3 - Configuración 3

### B.4. Resultados indicadores - Bobina B4

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector	Falla a tierra
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.115	-0.242	0.193
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.298	-0.095	-0.429
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.704	0.506	0.644
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.711	0.478	0.792
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.306	0.691	0.773
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.654	0.867	0.956
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.824	0.972	0.986
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.936	0.992	0.997
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.992	0.999	0.999
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.998	0.999	1.000
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	0.997	0.999	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	0.993	0.998	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	0.996	1.000	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	0.998	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	0.997	0.999	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	0.999	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	0.999
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000	0.988
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	0.998	0.999	0.817
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	1.000	1.000	0.955
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	0.903
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	0.915
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	0.988
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.997	0.993	0.987
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.946	0.907	0.961

Tabla B.10: Umbrales de sensibilidad CCF - B4 - Configuración 1

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.545	0.162
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.149	0.239
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.764	0.502
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.718	0.864
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.606	0.633
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.817	0.879
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.830	0.977
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.952	0.994
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.992	0.999
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.999	0.999
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	0.997	0.999
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	0.993	0.998
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	0.997	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	0.997
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	0.997	0.999
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	0.999	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	0.968	0.989
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	0.999	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	0.914	0.999
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	0.638	0.981
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	0.962	0.999
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.996	0.996
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.984	0.921

Tabla B.11: Umbrales de sensibilidad CCF - B4 - Configuración 2







### B.7. Resultados indicadores - Bobina B7

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector	Contaminación Etapa 1	Contaminación Etapa 2	Falla a tierra
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.086	-0.293	0.293	0.695	0.344
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.193	0.473	0.246	-0.038	0.073
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.749	-0.219	0.816	0.699	0.759
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.720	0.001	0.844	0.793	0.934
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.362	0.426	0.944	0.931	0.898
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.670	0.775	0.952	0.959	0.967
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.833	0.945	0.994	0.993	0.992
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.959	0.993	0.998	0.997	0.999
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.990	0.999	0.997	0.997	1.000
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.999	0.999	0.995	0.995	1.000
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	0.998	0.997	0.997	0.998	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	0.996	0.997	0.999	0.999	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	0.998	0.999	0.997	0.997	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	0.999	0.994	0.996	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	0.996	0.999	0.999	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	1.000	1.000	0.999	0.994	0.944
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	1.000	1.000	0.994	0.992	0.089
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	0.992
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	0.900
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	0.885
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.992	0.979	0.998	0.997	0.975
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.998	0.986	0.996	0.997	0.997

**Tabla B.19:** Umbrales de sensibilidad CCF - B7 - Configuración 1

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector	Contaminación Etapa 1	Contaminación Etapa 2
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.433	0.121	0.520	0.594
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.172	-0.146	0.231	0.172
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.841	0.172	0.714	0.774
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.523	0.708	0.960	0.902
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.262	0.755	0.912	0.878
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.536	0.771	0.978	0.977
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.881	0.969	0.995	0.993
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.959	0.994	0.999	0.998
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.996	0.999	0.998	0.997
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.999	0.999	0.997	0.995
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	0.998	0.997	0.998	0.997
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	0.998	0.997	0.999	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	0.999	0.999	0.999	0.998
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	0.998	0.996	0.997
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	0.997	0.999	0.999
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	0.999	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	0.895	0.934	1.000	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	0.999	0.997	1.000	1.000
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	0.829	0.918	0.996	0.993
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	0.857	0.938	0.991	0.989
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.993	0.989	0.997	0.997
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.999	0.985	0.998	0.999

**Tabla B.20:** Umbrales de sensibilidad CCF - B7 - Configuración 2

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector	Contaminación Etapa 1	Contaminación Etapa 2
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.725	0.977	0.903	0.739
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.912	0.982	0.894	0.885
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.955	0.996	0.946	0.931
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.984	0.998	0.975	0.981
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.992	0.999	0.995	0.990
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona II	0.996	1.000	1.000	0.999
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona II	0.999	1.000	1.000	1.000
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona II	0.999	1.000	1.000	1.000
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona III	1.000	0.998	1.000	1.000
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona III	0.999	0.995	0.999	0.994
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona III	0.015	0.867	-0.455	-0.431
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona III	0.647	0.911	0.672	0.674

Tabla B.21: Umbrales de sensibilidad CCF - B7 - Configuración 3

### B.8. Resultados indicadores - Bobina B8

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector	Pérdida Cuts Sismómetros Etapa 1	Pérdida Cuts Sismómetros Etapa 2	Pérdida Cuts Sismómetros Etapa 3	Pérdida Cuts Sismómetros Etapa 4	Pérdida Cuts Sismómetros Etapa 5	Falla a tierra
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.355	-0.019	0.187	0.412	0.169	0.466	0.377	0.351
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	-0.083	0.104	0.308	0.579	0.152	0.200	0.039	0.297
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.337	0.448	0.781	0.696	0.658	0.702	0.738	0.851
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.462	0.744	0.769	0.863	0.830	0.790	0.847	0.791
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	-0.033	0.923	0.920	0.963	0.924	0.840	0.898	0.960
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.720	0.983	0.984	0.982	0.987	0.984	0.969	0.985
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.945	0.997	0.998	0.996	0.997	0.997	0.993	0.996
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.993	0.999	0.999	0.999	0.996	0.999	0.999	0.999
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.999	1.000	0.999	1.000	0.997	0.999	1.000	1.000
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	0.998	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	0.986	0.992	-0.205	0.005	0.201	0.618	0.821	0.942
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	1.000	1.000	0.990	0.991	0.993	0.996	0.998	0.404
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.758
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.074
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	1.000	1.000	0.875	0.914	0.941	0.983	0.996	0.803
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.993	0.995	0.945	0.974	0.985	0.998	0.989	0.945
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.946	0.967	0.476	0.568	0.749	0.863	0.642	0.974

Tabla B.22: Umbrales de sensibilidad CCF - B8 - Configuración 1

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Conector	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 1	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 2	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 3	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 4	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 5
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.407	-0.225	0.424	0.216	0.501	0.643	0.495
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.652	0.417	0.827	0.377	0.462	0.318	0.260
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.424	0.772	0.830	0.752	0.903	0.833	0.664
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.674	0.814	0.885	0.859	0.861	0.859	0.742
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.417	0.899	0.928	0.837	0.887	0.828	0.853
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona I	0.635	0.979	0.983	0.986	0.984	0.988	0.978
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona I	0.905	0.996	0.997	0.997	0.996	0.997	0.995
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona I	0.990	0.999	0.999	0.999	0.997	0.999	0.999
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona I	0.998	1.000	0.999	1.000	0.998	0.999	0.999
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona I	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona III	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona III	1.000	1.000	0.991	0.994	0.996	0.999	1.000
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona III	0.998	0.980	-0.356	-0.507	-0.343	0.151	0.618
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona III	1.000	1.000	0.969	0.969	0.986	1.000	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona IV	0.846	1.000	0.453	0.555	0.626	0.710	0.788
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona IV	0.068	0.989	-0.262	-0.212	-0.097	0.064	0.240
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona IV	0.752	0.996	0.371	0.415	0.538	0.593	0.654
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona IV	0.892	0.984	0.917	0.941	0.955	0.971	0.917
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona IV	0.895	0.924	0.557	0.627	0.714	0.834	0.733

Tabla B.23: Umbral de sensibilidad CCF - B8 - Configuración 2

Etiqueta Ventana	Zona	Cables	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 1	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 2	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 3	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 4	Pérdida Cita Semiconductora Etapa 5
D1V1 (20.0-31.7 Hz)	Zona I	0.362	0.423	0.090	0.451	0.242	-0.054
D1V2 (31.7-50.2 Hz)	Zona I	0.049	0.428	0.337	0.277	0.195	0.478
D1V3 (50.2-79.6 Hz)	Zona I	0.384	0.570	0.401	0.604	0.389	0.515
D1V4 (79.6-126.2 Hz)	Zona I	0.753	0.731	0.649	0.724	0.627	0.527
D1V5 (126.2-200.0 Hz)	Zona I	0.835	0.889	0.873	0.902	0.848	0.876
D2V1 (200.0-317.0 Hz)	Zona II	0.903	0.932	0.940	0.944	0.919	0.908
D2V2 (317.0-502.4 Hz)	Zona II	0.925	0.973	0.972	0.971	0.960	0.967
D2V3 (502.4-796.2 Hz)	Zona II	0.986	0.993	0.994	0.992	0.994	0.991
D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	Zona II	0.996	0.997	0.997	0.998	0.996	0.996
D2V5 (1.3-2.0 kHz)	Zona II	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
D3V1 (2.0-3.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V2 (3.2-5.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V3 (5.0-8.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V4 (8.0-12.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D3V5 (12.6-20.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V1 (20.0-31.7 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V2 (31.7-50.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V3 (50.2-79.6 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V4 (79.6-126.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D4V5 (126.2-200.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V1 (200.0-317.0 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V2 (317.0-502.4 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V3 (502.4-796.2 kHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	Zona II	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D5V5 (1.3-2.0 MHz)	Zona II	1.000	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000
D6V1 (2.0-3.2 MHz)	Zona III	1.000	0.026	0.662	0.396	0.959	0.992
D6V2 (3.2-5.0 MHz)	Zona III	1.000	0.783	0.887	0.853	0.956	0.987
D6V3 (5.0-8.0 MHz)	Zona III	0.999	0.817	0.558	0.934	0.977	0.987
D6V4 (8.0-12.6 MHz)	Zona III	0.483	0.367	0.454	0.360	0.586	0.595
D6V5 (12.6-20.0 MHz)	Zona III	0.971	0.807	0.971	0.931	0.978	0.980

Tabla B.24: Umbral de sensibilidad CCF - B8 - Configuración 3

# Apéndice C

## Respuesta en frecuencia de sistemas lineales

### C.1. Sistema lineal

Se utiliza un modelo matemático lineal de manera conveniente para representar y analizar sistemas relacionados a fenómenos físicos, ya que existen diversas y poderosas herramientas que permiten sintetizarlos, aproximándose razonablemente a la realidad.

Los sistemas en general están sometidos a estímulos externos (entradas) y el proceso que realizan se manifiesta en respuestas de éste (salidas), condicionado por el estado inicial en que se encuentra el sistema al recibir dicho estímulo (condiciones iniciales).

Una forma simple de representar un sistema es como se muestra en la figura C.1, donde  $u(t)$  es la excitación o entrada del sistema,  $y(t)$  es la respuesta o salida del sistema y  $x(t_0)$  es la condición inicial en un instante de tiempo  $t_0$ .

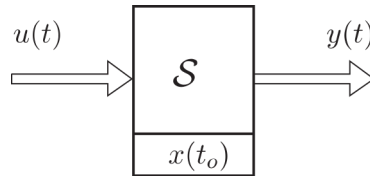


Figura C.1: Representación compacta de un sistema [24]

Para que un sistema sea lineal debe cumplir dos propiedades fundamentales: superposición y homogeneidad.

- **Superposición:** Este principio encierra la idea que la salida del sistema se puede calcular separando los efectos de componentes del estado y/o componentes de la entrada, y luego sumando las respuestas a cada uno de esos efectos.
- **Homogeneidad:** La proporcionalidad en la entrada o a un estado se propaga a la salida sin alteración.

En resumen, la propiedad de linealidad permite calcular el efecto de una combinación lineal de entradas y condiciones iniciales como una combinación lineal de sus efectos

individuales. Esto es:

Sea  $\mathbf{S}$  un sistema como el que se muestra en la figura C.1 y sea  $\mathbf{T} \langle \cdot \rangle$  un operador que describe la dependencia que la salida  $y(t)$  tiene del estado inicial  $x(t_0)$  y de la entrada  $u(t)$ .

Se tiene  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  y  $\beta_2$  constantes,  $x_1(t_0), x_2(t_0)$  condiciones iniciales y  $u_1(t), u_2(t)$  entradas del sistema.

$$y(t) = \mathbf{T} \langle \alpha_1 x_1(t_0) + \alpha_2 x_2(t_0) + \beta_1 u_1(t) + \beta_2 u_2(t) \rangle \quad \forall t > t_0 \quad (\text{C.1})$$

Entonces  $\mathbf{S}$  es lineal si y sólo si:

$$y(t) = \alpha_1 \mathbf{T} \langle x_1(t_0), 0 \rangle + \alpha_2 \mathbf{T} \langle x_2(t_0), 0 \rangle + \beta_1 \mathbf{T} \langle 0, u_1(t) \rangle + \beta_2 \mathbf{T} \langle 0, u_2(t) \rangle \quad (\text{C.2})$$

$$y(t) = \alpha_1 y_{1x}(t) + \alpha_2 y_{2x}(t) + \beta_1 y_{1u}(t) + \beta_2 y_{2u}(t) \quad (\text{C.3})$$

donde  $y_{1x}(t), y_{2x}(t), y_{1u}(t)$  e  $y_{2u}(t)$  son las salidas correspondientes a los efectos provocados por  $x_1(t_0), x_2(t_0), u_1(t)$  y  $u_2(t)$  respectivamente.

## C.2. Invariancia en el tiempo

Los sistemas eléctricos son considerados lineales e invariantes en el tiempo (SLI). Un sistema es invariante en el tiempo cuando sus propiedades no cambian en el tiempo para cualquier desplazamiento de  $\tau$  como se muestra en la figura C.2.

Esto significa que una misma entrada nos dará el mismo resultado en cualquier momento (ya sea ahora o después).

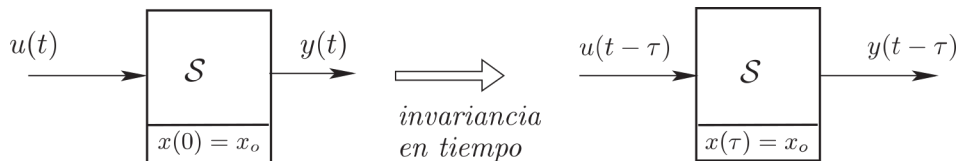


Figura C.2: Propiedad de invariancia en el tiempo [24]

En rigor no existen los sistemas invariantes en el tiempo, pero es frecuente que la variación que experimentan los parámetros de un sistema durante el trascurso del análisis sea tan lenta, que se considera prácticamente despreciable.

## C.3. Ecuación del sistema

Como ya se mencionó anteriormente un sistema cuenta con una función de entrada y una función de salida, y éste es completamente caracterizado si se conoce la naturaleza de la dependencia de la salida sobre la entrada.

La herramienta fundamental para describir cambios de una variable en el dominio del tiempo continuo es la derivada, por lo que el modelo matemático a utilizar es la ecuación diferencial del sistema (EDS).

Si se considera el sistema lineal e invariante en el tiempo representado por la figura C.1, la forma general de la EDS es:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + b_{m-2} \frac{d^{m-2} u(t)}{dt^{m-2}} + \dots + b_0 u(t) \quad (\text{C.4})$$

La solución de esta ecuación determina la respuesta del sistema  $y(t)$  en el dominio del tiempo, sujeta a las condiciones iniciales correspondientes.

## C.4. Análisis de Fourier

El desarrollo de series de Fourier permite reconocer el contenido armónico de funciones periódicas, de periodo  $T$  y analizadas en el intervalo  $[t, t+T]$ , como una combinación lineal de sinusoides identificando en cada una de ellas su amplitud y fase (espectro discreto).

Una extensión natural de esta teoría es el análisis de frecuencia de señales “no periódicas” (escalones, pulsos, rampas, etc.), el cual se basa en la idea de aplicar la serie de Fourier en un periodo  $T$  acotado de dicha función aperiódica.

Luego la serie se analiza en el límite cuando  $T \rightarrow \infty$ , lo que equivale a  $\Delta\omega \rightarrow 0$ . Esta serie se transforma en una suma de Riemann que converge en una integral, la cual a diferencia de la serie de Fourier genera un espectro continuo de frecuencias para la representación de una función.

Se define la función transformada de Fourier de  $f(t)$  como:

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{C.5})$$

La transformada de Fourier es una herramienta fundamental para el análisis de sistemas en el dominio de la frecuencia, ya que como se verá a continuación simplifica el trabajo de la ec.(C.4), transformándola en una ecuación netamente algebraica.

Se define que la respuesta de un sistema a una señal arbitraria  $u(t)$  se puede obtener mediante la convolución de ésta con la respuesta  $h(t)$  del sistema a un impulso unitario. Esto es:

$$y(t) = u(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (\text{C.6})$$

Si se aplica la transformada de Fourier a la ec.(C.6) se tiene la siguiente propiedad:

$$\mathcal{F}\{y(t)\} = \mathcal{F}\{u(t) * h(t)\} \quad (\text{C.7})$$

$$Y(j\omega) = U(j\omega)\mathcal{F}\{h(t)\} \quad (\text{C.8})$$

$$Y(j\omega) = H(j\omega)U(j\omega) \quad (\text{C.9})$$

Donde  $H(j\omega)$  es la transformada de Fourier para la respuesta a impulso unitario  $h(t)$  y se define como **función de transferencia de Fourier**.

Si se aplica la transformada de Fourier a la derivada con el objetivo de luego utilizar dicha propiedad en la EDS, siempre y cuando  $f(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \pm\infty$ , se tiene el siguiente desarrollo:

$$\mathcal{F} \left\{ \frac{d^n f(t)}{dt^n} \right\} = (j\omega)^n \mathcal{F}\{f(t)\} = (j\omega)^n F(j\omega) \quad (\text{C.10})$$

Se aplica este resultado a ambos lados de la ec.(C.4):

$$(j\omega)^n Y(j\omega) + \dots + a_0 Y(j\omega) = b_m (j\omega)^m U(j\omega) + \dots + b_0 U(j\omega) \quad (\text{C.11})$$

luego:

$$Y(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + \dots + b_0}{(j\omega)^n + \dots + a_0} U(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} \quad (\text{C.12})$$

Entonces se puede definir la función de transferencia como:

$$H(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} \quad (\text{C.13})$$

O bien si se conoce la entrada y la salida:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)} \quad (\text{C.14})$$

La función de transferencia caracteriza al sistema, ya que la ec.(C.13) solo depende de los coeficientes de la EDS y no de la entrada. Cabe destacar que  $H(j\omega)$  pertenece al plano complejo por lo que posee magnitud y ángulo.

Si en la ec.(C.14), por ejemplo,  $U(j\omega)$  es una tensión sinusoidal y se mide la corriente en la salida  $Y(j\omega)$ , la ecuación de transferencia del sistema representaría la admitancia equivalente del sistema en función de la frecuencia.

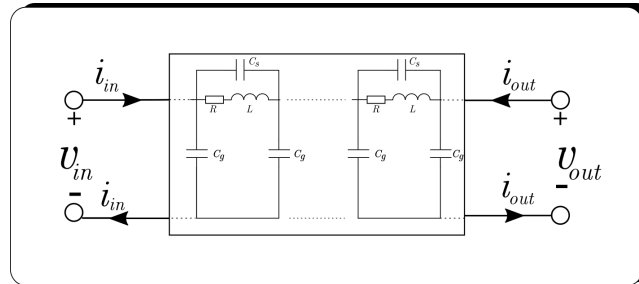
En relación a la técnica FRA, el concepto de la ecuación de transferencia del sistema es importante, ya que en base a ésta se realizan los análisis posteriores.

## C.5. Comportamiento de sistemas eléctricos

Las redes de dos puertos (o cuadripolo) son circuitos en donde se define un par de terminales como puerto de entrada y otro par de terminales como puerto de salida. Este modelo es útil para circuitos en donde las tensiones y corrientes a nivel de componentes internas no son relevantes para el análisis, por lo que se representan mediante la ecuación de transferencia.

Requisitos que debe tener un circuito para ser modelado como una red de dos puertos son:

- La red solo debe poseer elementos pasivos (RLC) y fuentes dependientes.
- Las corrientes de entrada y de salida deben ser iguales en el mismo puerto.
- No deben existir elementos que almacenen energía.
- No deben existir conexiones entre puertos.



**Figura C.3:** Ejemplo red de dos puertos  
Fuente: Elaboración propia

Los elementos eléctricos pasivos lineales: inductor y capacitor, presentan oposición ante el paso de la corriente alterna. Esta oposición se cuantifica con el parámetro denominado reactancia, el cual depende de la frecuencia de oscilación de la señal de entrada.

La reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia, en cambio la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia, como muestran las ecuaciones (C.15) y (C.16) respectivamente.

Además cuando se analizan circuitos de corriente alterna en el plano fasorial, estos parámetros son homólogos (en magnitud) a la resistencia eléctrica, al medirse en ( $\Omega$ ).

$$X_l = j\omega L \quad [\Omega] \tag{C.15}$$

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad [\Omega] \tag{C.16}$$

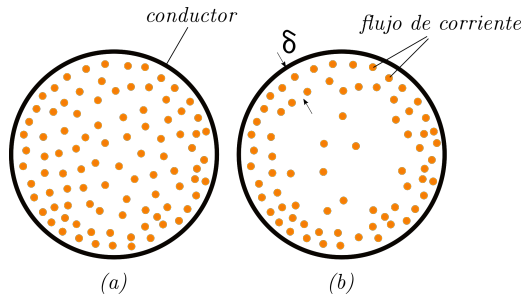
donde  $v_{in} = \text{sen}(\omega t)$

La corriente alterna provoca una variación de campo magnético distinta a través de eje radial del conductor, yendo de más a menos desde el centro, por lo que es más fácil para los electrones circular en la superficie.

Este fenómeno es conocido como “efecto skin” y mientras mayor es la frecuencia mayor es la densidad de corriente en la superficie. La figura C.4 muestra claramente que la sección efectiva de un conductor macizo se ve disminuida, por lo tanto su resistencia aumenta.

Se define la profundidad superficial  $\delta$  de los conductores como el área efectiva por la que circula corriente en el conductor. Depende de la frecuencia  $\omega$ , permeabilidad magnética  $\mu$  y conductividad del material  $\sigma$ ; se mide en (m).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{C.17}$$



**Figura C.4:** Efecto “skin”, (a) Corriente continua (b) Frecuencia  $\omega$   
 Fuente: Elaboración propia

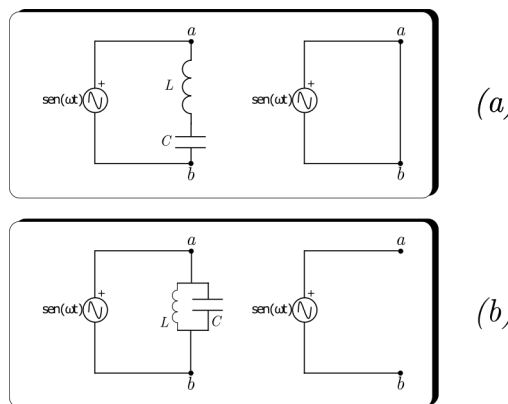
Otra situación que ocurre en los sistemas eléctricos de corriente alterna, para ciertas frecuencias críticas, es el fenómeno de resonancia entre dos elementos reactivos, que se define como:

Se denomina frecuencia de resonancia a aquella frecuencia característica de un cuerpo o un sistema que alcanza el grado máximo de oscilación. En un sistema eléctrico, la frecuencia de resonancia es aquella a la que la función de transferencia alcanza su máximo. Es decir, dada una entrada, se obtiene una salida máxima

El ejemplo más simple de esta situación se muestra en la figura C.5. Existen dos tipos de resonancia que hacen referencia a la forma en la cual los elementos inductivos y capacitivos están conectados: serie y paralelo.

Ambos ocurren cuando la inductancia total se iguala a la capacitancia total, y la frecuencia crítica es:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} [rad/s] \tag{C.18}$$



**Figura C.5:** Resonancia (a) serie (b) paralelo  
 Fuente: Elaboración propia

Cuando los elementos resonantes están conectados en serie la reactancia se anula (cortocircuito) y cuando los elementos están en paralelo la reactancia se hace infinita (circuito abierto), considerando un sistema sin pérdidas.

La resonancia se produce cuando la frecuencia de oscilación de los modos forzantes (entradas) se iguala a la (o las) frecuencia (as) en que oscila el sistema en forma natural[24], generando la salida máxima en la función de transferencia.

En el caso de sistemas complejos, se tienen varios modos naturales (EDS de mayor grado), por ende, posibilidad de lograr más puntos resonantes.

## C.6. Representación gráfica de la respuesta en frecuencia

La forma para representar la respuesta en frecuencia de un sistema es mediante los gráficos de magnitud de  $H(j\omega)$ , donde  $\omega$  es la variable independiente en el eje de las abscisas.

Es posible generar distintos tipos de gráficos de magnitud a partir del tipo de escala que se elija en cada eje (figura C.6). Los ejes pueden ser lineales o logarítmicos y el gráfico que más destaca por su capacidad de compactar gran cantidad de información es el **Diagrama de Bode**, el cual tiene ambos ejes en escala logarítmica.

La unidad de medida para la magnitud es el decibel (dB), el que se define como:

$$|H(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10}(|H(j\omega)|) \quad (C.19)$$

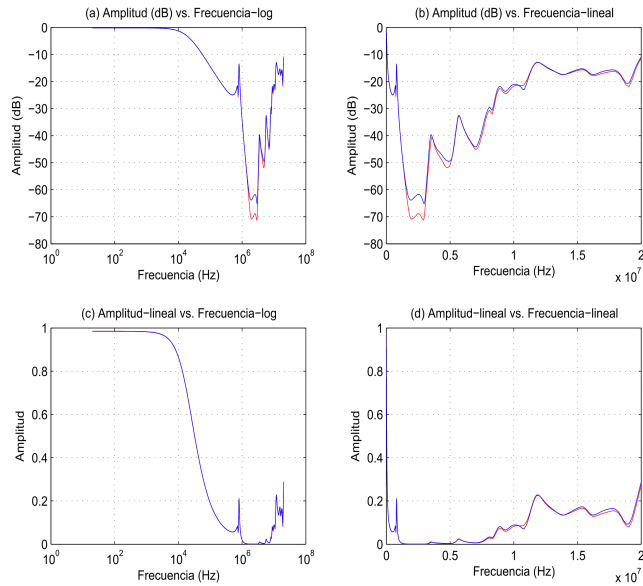
Dicho sea de paso, para las mediciones FRA se considera  $H(j\omega)$  como en la ec.(C.14), ya que se mide la entrada y la salida del sistema.

El eje logarítmico se separa en décadas o exponentes de base diez, mientras que el eje lineal es equiespaciado. Los tipos de eje se pueden combinar de todas las formas posibles como se muestra en la figura C.6.

El ángulo de fase respectiva se calcula como:

$$\angle H(j\omega) = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{\Im\{H(j\omega)\}}{\Re\{H(j\omega)\}} \right) \quad (C.20)$$

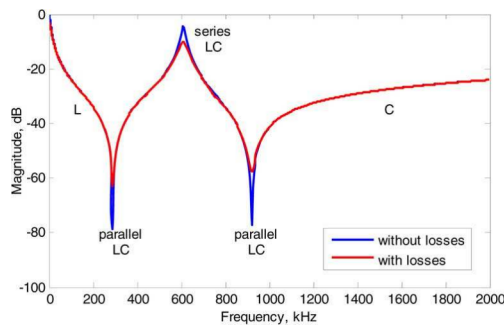
Cabe destacar que en el gráfico de fase el eje de la ordenada puede estar en radianes o grados y no es logarítmico.



**Figura C.6:** Tipos de gráficos Magnitud vs. Frecuencia  
Fuente: Elaboración propia

Es muy importante señalar que en el Diagrama de Bode de magnitud se destacan algunos “peaks” (mínimos o máximos locales), los cuales representan los puntos de resonancia del sistema mencionados en la sección anterior.

La resonancia paralelo también es llamada “antiresonancia”, al producir efecto contrario a una resonancia serie de forma gráfica como se muestra en la figura C.7.



**Figura C.7:** Resonancia serie y paralelo (con y sin pérdidas)[13].



## Apéndice D

# Metodología de indicadores estadísticos

### D.1. Ventanas de frecuencia fijas

Zonas configuraciones 1 y 2	Rango ventana	Frecuencia central
Zona I	D1V1 (20.0 Hz-31.7 Hz)	25.2 Hz
	D1V2 (31.7 Hz-50.2 Hz)	39.9 Hz
	D1V3 (50.2 Hz-79.6 Hz)	63.2 Hz
	D1V4 (79.6 Hz-126.2 Hz)	100.2 Hz
	D1V5 (126.2 Hz-200.0 Hz)	158.9 Hz
	D2V1 (200.0 Hz-317.0 Hz)	251.8 Hz
	D2V2 (317.0 Hz-502.4 Hz)	399.1 Hz
	D2V3 (502.4 Hz-796.2 Hz)	632.5 Hz
	D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	1.0 kHz
	D2V5 (1.3 kHz-2.0 kHz)	1.6 kHz
	D3V1 (2.0 kHz-3.2 kHz)	2.5 kHz
	D3V2 (3.2 kHz-5.0 kHz)	4.0 kHz
	D3V3 (5.0 kHz-8.0 kHz)	6.3 kHz
	D3V4 (8.0 kHz-12.6 kHz)	10.0 kHz
Zona II	D3V5 (12.6 kHz-20.0 kHz)	15.9 kHz
	D4V1 (20.0 kHz-31.7 kHz)	25.2 kHz
	D4V2 (31.7 kHz-50.2 kHz)	39.9 kHz
	D4V3 (50.2 kHz-79.6 kHz)	63.2 kHz
	D4V4 (79.6 kHz-126.2 kHz)	100.2 kHz
Zona III	D4V5 (126.2 kHz-200.0 kHz)	158.9 kHz
	D5V1 (200.0 kHz-317.0 kHz)	251.8 kHz
	D5V2 (317.0 kHz-502.4 kHz)	399.1 kHz
	D5V3 (502.4 kHz-796.2 kHz)	632.5 kHz
	D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	1.0 MHz
Zona IV	D5V5 (1.3 MHz-2.0 MHz)	1.6 MHz
	D6V1 (2.0 MHz-3.2 MHz)	2.5 MHz
	D6V2 (3.2 MHz-5.0 MHz)	4.0 MHz
	D6V3 (5.0 MHz-8.0 MHz)	6.3 MHz
	D6V4 (8.0 MHz-12.6 MHz)	10.0 MHz
	D6V5 (12.6 MHz-20.0 MHz)	15.9 MHz

Tabla D.1: Ventanas de frecuencia - Configuraciones 1 y 2

Zonas configuración 3	Rango ventana	Frecuencia central
Zona I	D1V1 (20.0 Hz-31.7 Hz)	25.2 Hz
	D1V2 (31.7 Hz-50.2 Hz)	39.9 Hz
	D1V3 (50.2 Hz-79.6 Hz)	63.2 Hz
	D1V4 (79.6 Hz-126.2 Hz)	100.2 Hz
	D1V5 (126.2 Hz-200.0 Hz)	158.9 Hz
Zona II	D2V1 (200.0 Hz-317.0 Hz)	251.8 Hz
	D2V2 (317.0 Hz-502.4 Hz)	399.1 Hz
	D2V3 (502.4 Hz-796.2 Hz)	632.5 Hz
	D2V4 (796.2 Hz-1.3 kHz)	1.0 kHz
	D2V5 (1.3 kHz-2.0 kHz)	1.6 kHz
	D3V1 (2.0 kHz-3.2 kHz)	2.5 kHz
	D3V2 (3.2 kHz-5.0 kHz)	4.0 kHz
	D3V3 (5.0 kHz-8.0 kHz)	6.3 kHz
	D3V4 (8.0 kHz-12.6 kHz)	10.0 kHz
	D3V5 (12.6 kHz-20.0 kHz)	15.9 kHz
	D4V1 (20.0 kHz-31.7 kHz)	25.2 kHz
	D4V2 (31.7 kHz-50.2 kHz)	39.9 kHz
	D4V3 (50.2 kHz-79.6 kHz)	63.2 kHz
	D4V4 (79.6 kHz-126.2 kHz)	100.2 kHz
	D4V5 (126.2 kHz-200.0 kHz)	158.9 kHz
Zona III	D5V1 (200.0 kHz-317.0 kHz)	251.8 kHz
	D5V2 (317.0 kHz-502.4 kHz)	399.1 kHz
	D5V3 (502.4 kHz-796.2 kHz)	632.5 kHz
	D5V4 (796.2 kHz-1.3 MHz)	1.0 MHz
	D5V5 (1.3 MHz-2.0 MHz)	1.6 MHz
Zona III	D6V1 (2.0 MHz-3.2 MHz)	2.5 MHz
	D6V2 (3.2 MHz-5.0 MHz)	4.0 MHz
	D6V3 (5.0 MHz-8.0 MHz)	6.3 MHz
	D6V4 (8.0 MHz-12.6 MHz)	10.0 MHz
	D6V5 (12.6 MHz-20.0 MHz)	15.9 MHz

Tabla D.2: Ventanas de frecuencia - Configuración 3

## D.2. Proceso de selección de indicadores estadísticos

A modo de ejemplo, se realiza un proceso previo de filtrado del conjunto de indicadores planteados en la recopilación Cigre TB 812, mediante los criterios que se presentan en la siguiente sección. Considerando los 35 indicadores estadísticos documentados en las referencias técnicas, se implementa un método de selección orientado a optimizar el análisis FRA.

- **Redundancia matemática.** Se descartan los indicadores que proporcionan información equivalente debido a su formulación matemática. Se agrupan los siguientes indicadores:
  - *ID, AID, SDA.* Están relacionados con la diferencia de área entre curvas.
  - $\sigma_e$ , *CSD.* Ambos miden variabilidad de diferencias.
  - *ED, SD, SSE, SE.* Miden la misma relación, solo cambia la normalización.
  - *CC, CCF.* Variación de la correlación de *Pearson*.
  - *SSD, E, SSRE, RMSE.* Todas miden error relativo de distintas formas.



- **Sensibilidad del indicador.** Se evalúa la sensibilidad del indicador frente a las variaciones inherentes de la medición FRA considerando cada ventana de frecuencia.
- **Indicadores fuera del alcance del estudio.** Se excluyen todos los indicadores vinculados con la metodología *Vector Fitting* del análisis propuesto. Asimismo, se descartan los indicadores relacionados con la comparación de resonancias, ya que el enfoque metodológico se orienta hacia una evaluación por zonas específicas. Estos indicadores son: *CD, MDA, MAD, MFD, IAD, IFD, Fa, Ff, Wa, Wf, SDP* y *FI*.

### D.3. Análisis de correlaciones entre indicadores

A continuación en la figura D.1 se presenta el resultado de la matriz de correlación entre los indicadores seleccionados según los criterios anteriores, en forma de mapa de calor. Los valores pertenecen al rango [-1,1], donde -1 significa una correlación inversa y 1 una fuerte correlación directa. Se ordenan los datos para visualizar de forma mas clara los grupos de elementos más correlacionados. Se pueden conformar los siguientes grupos:

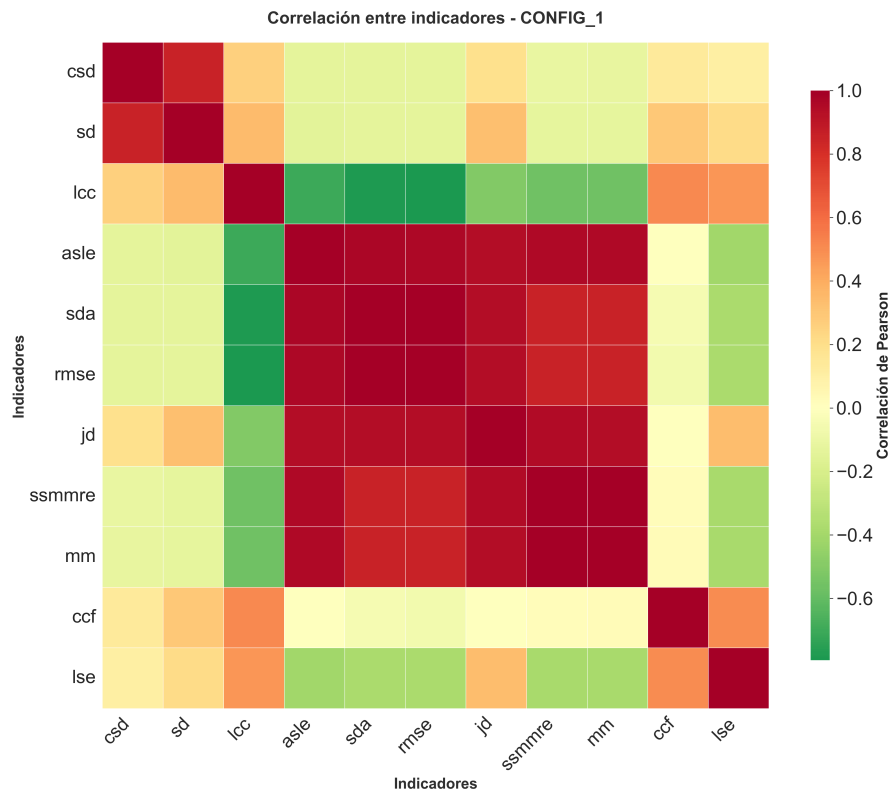


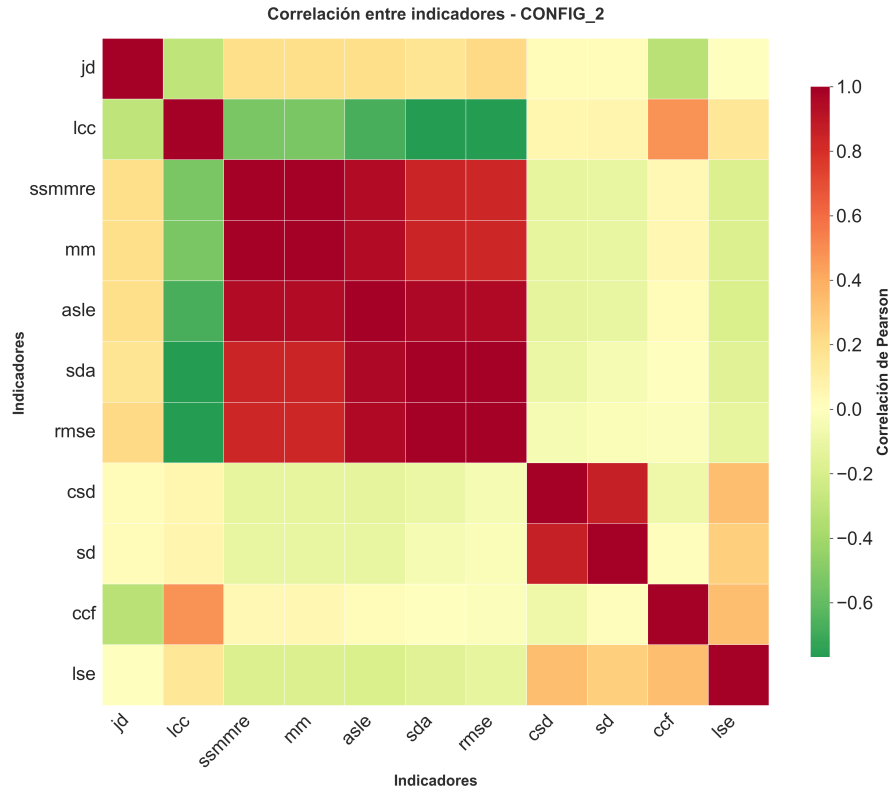
Figura D.1: Mapa de calor - correlación entre indicadores estadísticos - configuración 1

La tabla D.3 presenta los grupos correlacionados obtenidos a partir de la matriz de la figura D.1. Estos datos se deben considerar en el análisis posterior para la selección de indicadores a utilizar, los cuales, mediante este criterio, deben poseer un nivel de correlación cercano a cero. Por esta razón, no es recomendable seleccionar dos o más indicadores del mismo grupo, evitando así redundancia en el análisis. Los grupos 1 y 2 presentan redundancia mutua entre todos sus indicadores, mientras que en los grupos 3 y 4 la correlación

inversa se distribuye entre los elementos externos al paréntesis y el subgrupo indicado.

Tipo de correlación	Grupo	Configuración 1
Correlación directa	<b>GRUPO 1</b>	CSD, SD
	<b>GRUPO 2</b>	ASLE, SDA, RMSE, JD, SSMRE, MM
Correlación inversa	<b>GRUPO 1</b>	LCC con (ASLE, SDA, RMSE, SSMRE, JD, MM)

**Tabla D.3:** Grupos de indicadores con correlación redundante - sensibilidad de cables - configuración 1



**Figura D.2:** Mapa de calor - correlación entre indicadores estadísticos - configuración 2

Tipo de correlación	Grupo	Configuración 2
Correlación directa	<b>GRUPO 1</b>	CSD, SD
	<b>GRUPO 2</b>	ASLE, SDA, RMSE, SSMRE, MM
Correlación inversa	<b>GRUPO 1</b>	LCC con (ASLE, SDA, RMSE, SSMRE, MM)

**Tabla D.4:** Grupos de indicadores con correlación redundante - sensibilidad de cables - configuración 2

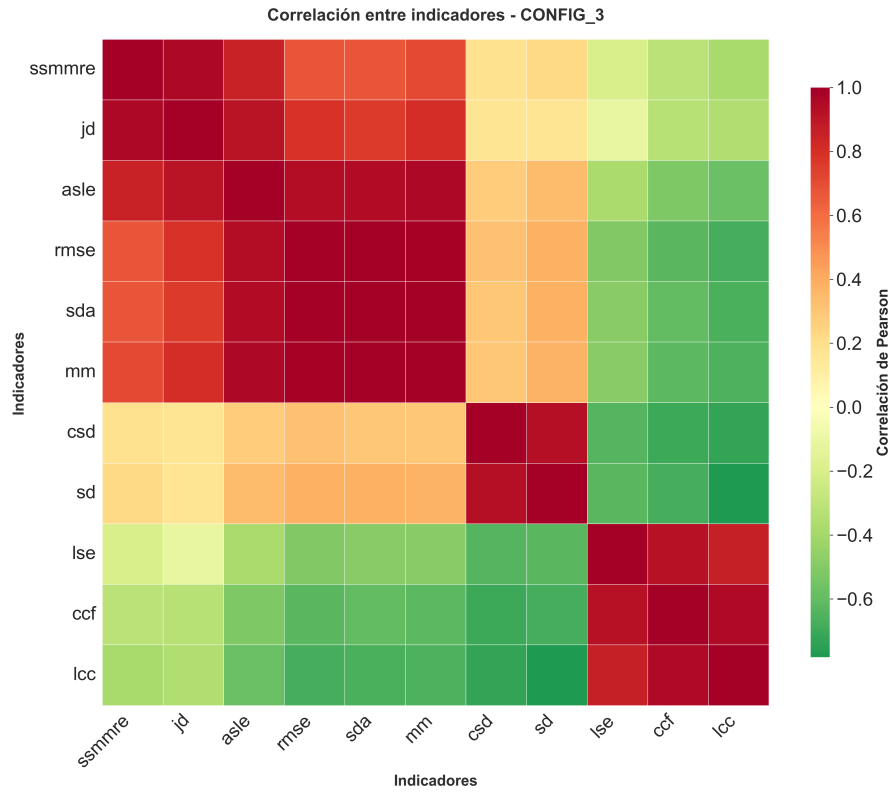


Figura D.3: Mapa de calor - correlación entre indicadores estadísticos - configuración 3

Tipo de correlación	Grupo	Configuración 3
Correlación directa	GRUPO 1	CSD, SD
	GRUPO 2	ASLE, SDA, RMSE, JD, SSMMRE, MM
	GRUPO 3	LSE, CCF, LCC
Correlación inversa	GRUPO 1	LCC con (ASLE, SDA, RMSE, JD, SSMMRE, MM)
	GRUPO 2	CCF con (ASLE, SDA, RMSE, JD, SSMMRE, MM)
	GRUPO 3	LSE con (ASLE, SDA, RMSE, JD, SSMMRE, MM)
	GRUPO 4	LCC con (CSD, SD)
	GRUPO 5	CCF con (CSD, SD)
	GRUPO 6	LSE con (CSD, SD)

Tabla D.5: Grupos de indicadores con correlación redundante - sensibilidad de cables - configuración 3

### D.4. Sensibilidad de indicadores

Esta sección presenta la distribución promedio de los indicadores evaluados en cada ventana de frecuencia para las distintas configuraciones de medida, considerando el escenario de estabilidad ante variación de cables. Las distribuciones permiten discriminar las zonas de mayor y menor sensibilidad para seleccionar los indicadores apropiados para el análisis. Para las configuraciones 1 y 2, el grupo 1, mostrado en las figuras D.4 y D.5, presenta indicadores sensibles a cambios en la resonancia principal. El grupo 2, dividido en varios subgráficos para facilitar la visualización, muestra mayor estabilidad en altas frecuencias y menor estabilidad en frecuencias bajas y medias.

Variación promedio de indicadores por ventanas de frecuencia - cables - configuración 1

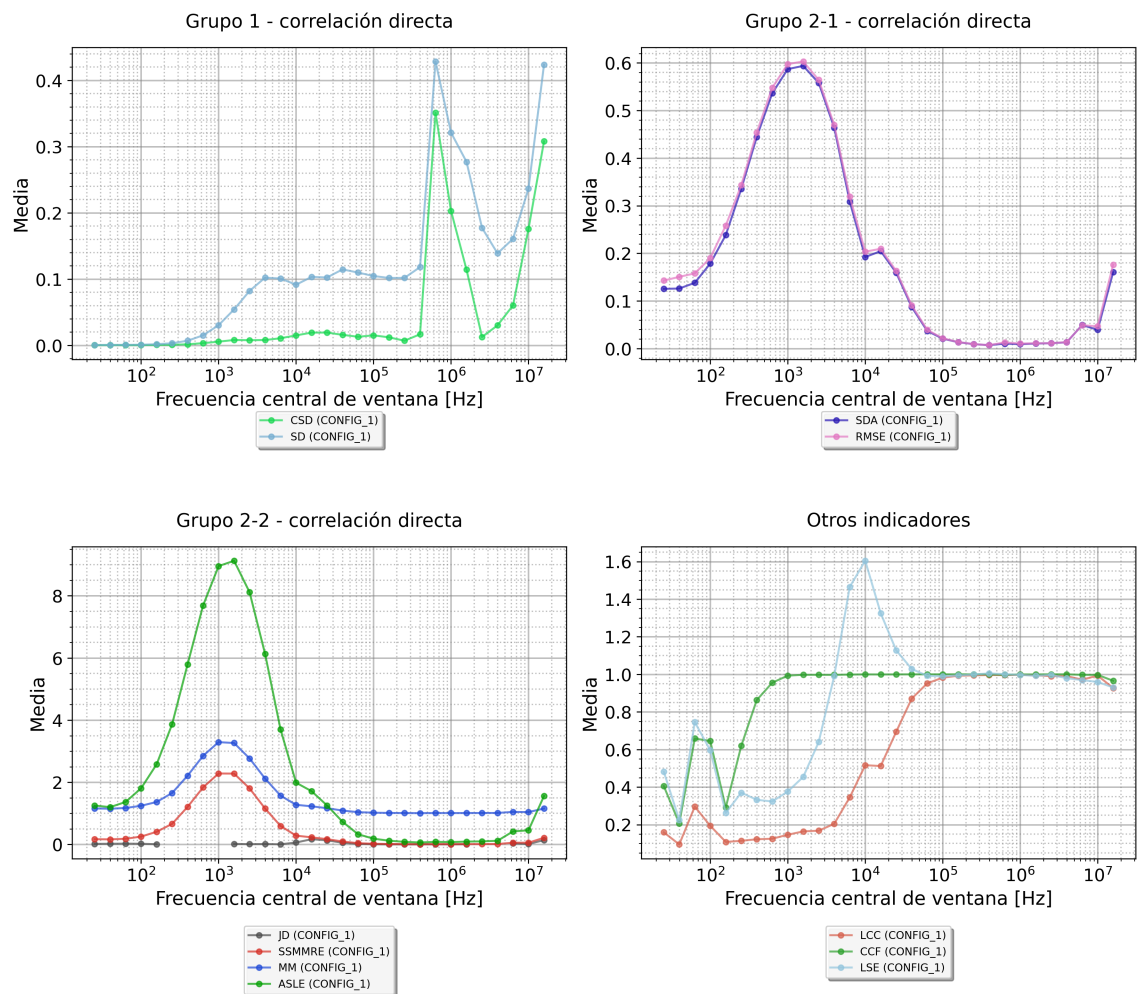


Figura D.4: Variación promedio de indicadores - sensibilidad cables - configuración 1

Variación promedio de indicadores por ventanas de frecuencia - cables - configuración 2

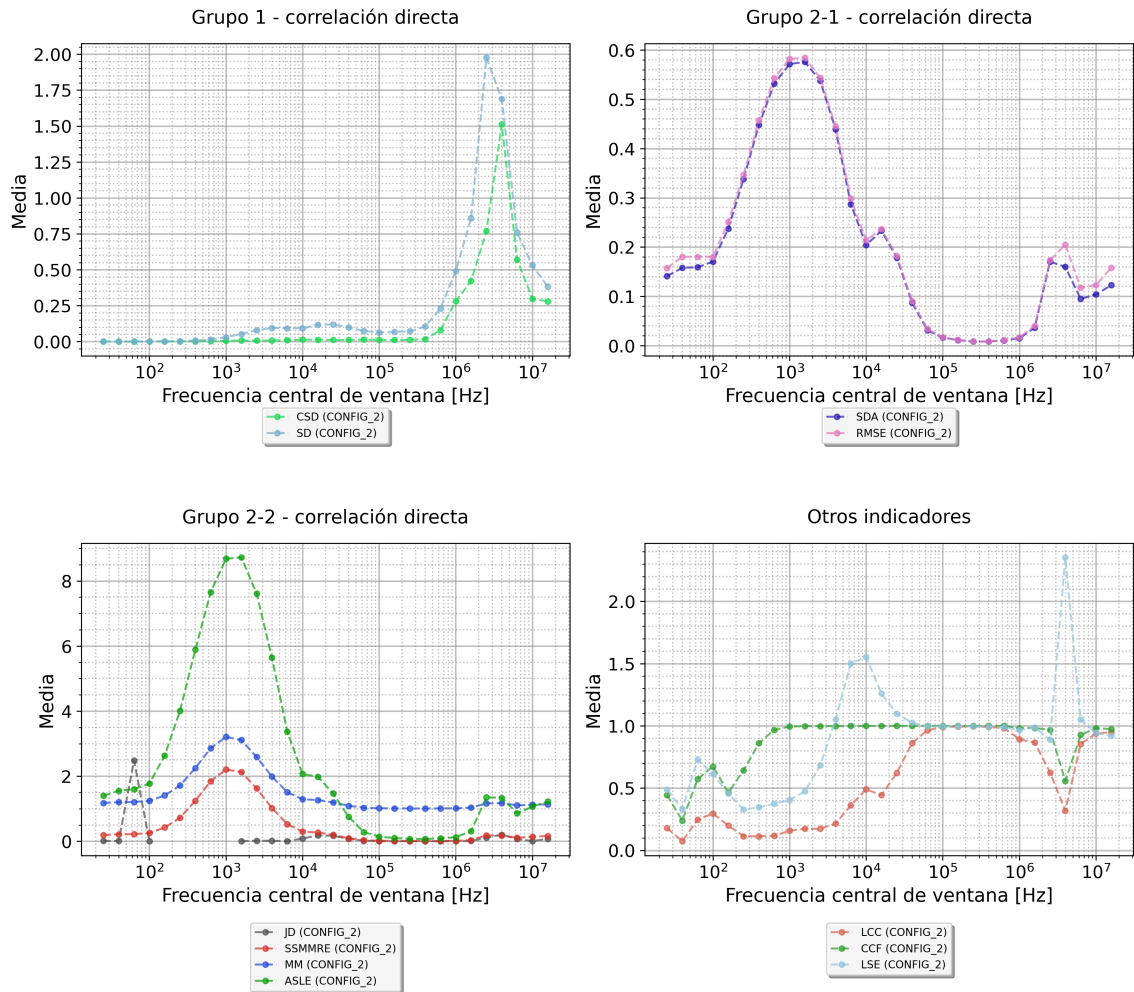


Figura D.5: Variación promedio de indicadores - sensibilidad cables - configuración 2

En la configuración 3 presentada en la figura D.6, las subgráficas de los indicadores del grupo 1 y grupo 2-2 mantienen estabilidad en la zona 2 de la caracterización inicial, presentando mayor variabilidad en las zonas extremas del ancho de banda. Los grupos 2 y 2-1 exhiben estabilidad en las frecuencias bajas y medias, mientras que presentan variaciones en la zona III correspondiente a las altas frecuencias.

Variación promedio de indicadores por ventanas de frecuencia - cables - configuración 3

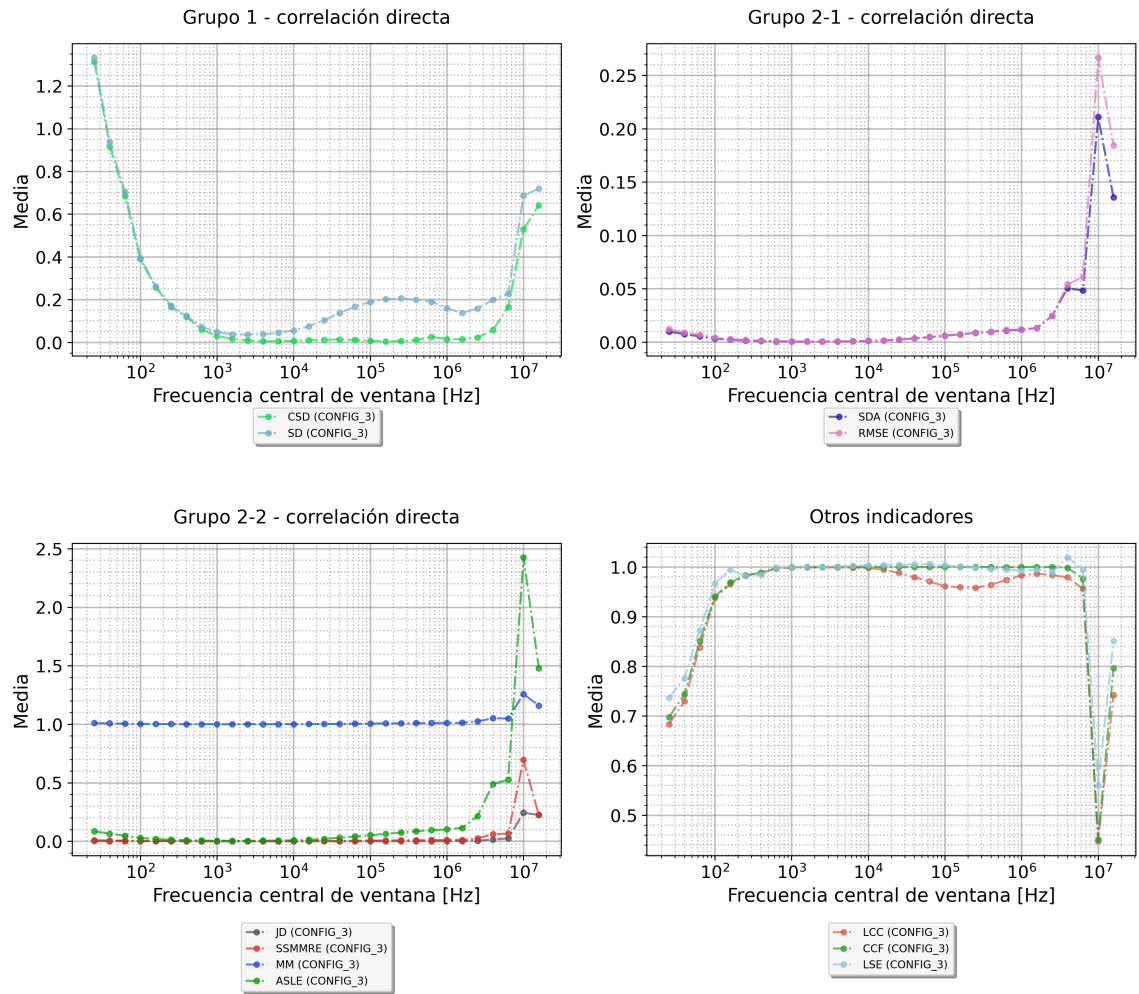


Figura D.6: Variación promedio de indicadores - sensibilidad cables - configuración 3

# Bibliografía

- [1] A. Abu-Siada, N. Hashemnia, S. Islam y M. A. Masoum, “Understanding power transformer frequency response analysis signatures,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, n.º 3, págs. 48-56, 2013.
- [2] N. Hashemnia, A. Abu-Siada, M. A. Masoum y S. M. Islam, “Characterization of transformer FRA signature under various winding faults,” en *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on*, IEEE, 2012, págs. 446-449.
- [3] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert y H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. John Wiley & Sons, 2004, vol. 21.
- [4] W. C. Sant’Ana et al., “Influence of rotor position on the repeatability of frequency response analysis measurements on rotating machines and a statistical approach for more meaningful diagnostics,” *Electric Power Systems Research*, vol. 133, págs. 71-78, 2016.
- [5] C.A.Platero, F.Blanquéz, F.R.Blanquéz, E.Rebollo, B. Batlle y E. Fernandez-Sanchez, “Application of Sweep Frequency Response Analysis SFRA for inter-turn detection of in medium-voltage coils manufacturing,” *A1-205, CIGRÉ*, 2012.
- [6] Norma-WG.A2/26, *Mechanical-Condition Assessment of Transformers Windings Using Frequency Response Analysis*, CIGRÉ, 2008.
- [7] Megger, *FRAX User’s Manual*, 2011.
- [8] A. A. Reykherdt y V. G. Davydov, “Effects of test cable ground extensions on repeatability of frequency response analysis measurements on power transformers,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, n.º 3, págs. 26-31, 2012.
- [9] E. Dick y C. Erven, “Transformer diagnostic testing by frequency response analysis,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 6, n.º PAS-97, págs. 2144-2153, 1978.
- [10] Norma-IEEE.Std.C.57.149-2012, *IEEE Guide for Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*, IEEE Power and Energy Society, 2012.
- [11] Norma-IEC60076-18.Ed.1, *Power Transformers-Part 18: Measurement of Frequency Response*, IEC, 2011.
- [12] Norma-DL/T-911, *Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformer*, The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, 2005.

- [13] Z. Wang, J. Li y D. M. Sofian, "Interpretation of transformer FRA responses—Part I: Influence of winding structure," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 24, n.º 2, págs. 703-710, 2009.
- [14] M. Heindl, S. Tenbohlen, J. Velásquez, A. Kraetge y R. Wimmer, "Transformer modeling based on frequency response measurements for winding failure detection," en *Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2010, págs. 6-11.
- [15] M. Bagheri, B. Phung y T. Blackburn, "Influence of temperature and moisture content on frequency response analysis of transformer winding," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, n.º 3, págs. 1393-1404, 2014.
- [16] R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger y J. Christian, "The influence of connection and grounding technique on the repeatability of FRA-results," en *Proc. of 15th international symposium on high voltage engineering, T7-522*, 2007.
- [17] P. Picher, M. Lachman, P. Patel et al., "Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)," *Cigre Technical brochure, Brochure*, vol. 812, 2020.
- [18] G. M. Kennedy, A. McGrail y J. Lapworth, "Using cross-correlation coefficients to analyze transformer sweep frequency response analysis (SFRA) traces," en *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica'07. IEEE, IEEE*, 2007, págs. 1-6.
- [19] X. Wang, "Partial discharge analysis of stator insulation at arbitrary voltage waveform stimulus," 2015.
- [20] R. Schurch, "Estudio de parámetros dieléctricos de máquinas rotatorias de alta tensión mediante respuesta a muy baja frecuencia VLF," *UTFSM*, 2006.
- [21] J. L. Dinamarca, *Apuntes Tecnología de Alta Tensión UTFSM*. falta, 2004, vol. 1.
- [22] F. Blánquez, C. A. Platero, E. Rebollo y F. Blánquez, "Evaluation of the applicability of FRA for inter-turn fault detection in stator windings," en *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2013 9th IEEE International Symposium on*, IEEE, 2013, págs. 177-182.
- [23] P. J. Tavner y J. Penman, *Condition monitoring of electrical machines*. Research Studies Pre, 1987, vol. 1.
- [24] M. E. Salgado et al., *Análisis de sistemas lineales*. Prentice Hall, 2005.