

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
REPORTE DE ACTIVIDAD Y DESEMPEÑO PROFESIONAL  
DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA APLICANDO EL MÉTODO DE MEDICIÓN  
DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA  
JOSE LUIS ALONSO PURECO

ASESOR DE REPORTE PROFESIONAL  
DRA. ELISA ESPINOSA JUÁREZ

MORELIA, MICHOACÁN, MAYO DE 2011

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis compañeros y amigos de CFE, por su apoyo, enseñanzas y consejos, para el buen desarrollo de las actividades durante mi desempeño profesional, especialmente a mi maestro y amigo Ing. Julián Jiménez Jáuregui.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la U.M.S.N.H. quienes consolidaron mi carrera profesional

A mi asesora la Dra. Elisa Espinosa Juárez, por sus consejos e indicaciones para llevar a buen termino el presente reporte.

A mis hermanos, esposa e hijas por haberme brindado su apoyo y buenos deseos.

A todos ellos les ofrezco mi gratitud y reconocimiento.

**¡Muchas gracias!**

**“El invertir en el conocimiento es la mayor riqueza,  
porque genera los mas altos intereses”**

Benjamín Franklin

# Dedicatoria

Este trabajo es con dedicatoria especialmente a para mis Padres:

+ **Q.P.D. José Luis Alonso Pineda**

+ **Q.P.D. Ma. Dolores Pureco infante**

*Tomado de sus manos inicié mi aprendizaje en la vida.*

*Ahora todo lo que soy se lo debo a ustedes.*

*A los valores inculcados y a su apoyo incondicional.*

*Por haber dado lo mejor de ustedes para formarme.*

*Por darme su amor que es mi fortuna mas grande.*

*Los amo y donde sea que estén, con el más*

*Sincero de mis sentimientos les dedico mis logros.*

**A** mis tres mujeres, estímulo a mis proyectos:

Mi esposa **Isela** y a mis pequeñas **Mayte y Sherlyn**

*Quienes con su amor y apoyo, son el incentivo principal en mis actividades de superación personal.*

**A** mis hermanos:

**Sandra y Pedro**

*Quienes me han brindado su apoyo incondicional.*

**“El éxito no es tanto lo que logras, si no  
lo que haces con lo que has logrado”**

Ralph A. Haward

# Resumen

Durante el desarrollo profesional en los últimos 13 años en la Comisión Federal de Electricidad, he tenido la oportunidad de participar en las Áreas de Generación y Transmisión supervisando y coordinando diversas actividades relacionadas con el mantenimiento y diagnóstico de equipo eléctrico de potencia, entre ellas las siguientes.

- Supervisión de montaje de equipo eléctrico de potencia en la subestación Pitirera, en el proyecto de modernización de la instalación, así como el mantenimiento del equipo en operación.
- Supervisión de mantenimiento menor, montaje, puesta en servicio de transformadores de potencia y diagnóstico por falla en equipos instalados en la subestaciones Lázaro Cárdenas Potencia, Villita y en la Central Termoeléctrica Plutarco Elías Calles, (Petacalco).
- Coordinación de mantenimiento y diagnóstico de fallas en transformadores de potencia, en equipos instalados en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Occidente.
- Coordinar la gestión y administración de recursos en el mantenimiento a equipo eléctrico de potencia instalado en el ámbito de las Zonas de Transmisión Jalisco y Michoacán.

Se propone el desarrollo del tema siguiente, con la finalidad de realizar un análisis del método de medición de **Respuesta a la Frecuencia** para el diagnóstico de los transformadores, autotransformadores y reactores de potencia, para verificar los parámetros de operación de los equipos, realizando comparaciones con los métodos de prueba comúnmente aplicados y utilizados por los fabricantes de los transformadores para comprobar la operación y establecer el inicio de un historial de pruebas de los equipos, para comparación con pruebas futuras durante la vida del transformador.

# Contenido

Agradecimientos .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Resumen.....	iv
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas.....	xii
Lista de Símbolos y Abreviaciones .....	xiv

## Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Metodología .....	3
1.5 Descripción de los capítulos.....	3

## Capítulo 2. Los Transformadores de Potencia y la Comisión Federal de Electricidad

2.1 Operación de los Transformadores en el Sistema Eléctrico Nacional....	4
2.2 Misión y Objetivos .....	5
2.3 Organigramas .....	6
2.4 La Gerencia Regional de Transmisión Occidente .....	7
2.5 Criterios y políticas de mantenimiento en Transformadores de Potencia .....	8

## Capítulo 3. Diagnóstico de Transformadores de Potencia

3.1 Métodos de prueba de Diagnóstico de Transformadores de Potencia...	12
3.2 Medición de Factor de Potencia.....	14
3.3 Medición de Resistencia de Aislamiento.....	16
3.4 Medición de Corriente de Excitación.....	19

3.5 Medición de Factor de Potencia y Capacitancia de Boquillas del tipo papel impregnado en aceite (OIP) .....	21
3.5.1 Medición de Factor de Potencia y Capacitancia del aislamiento principal del capacitor .....	22
3.5.2 Medición de Factor de Potencia y Capacitancia del aislamiento de la derivación .....	23
3.5.3 Medición de collar caliente en boquillas .....	23
3.6 Medición de Resistencia Ohmica .....	24
3.7 Medición de Relación de Transformación .....	26
3.8 Medición de la Impedancia del Transformador .....	28
3.9 Técnicas de diagnóstico .....	29

#### **Capítulo 4. Medición de Respuesta a la Frecuencia.**

4.1 Antecedentes .....	32
4.1 Fundamentos del método de medición de la Respuesta a la Frecuencia en Transformadores de Potencia .....	32
4.3 Métodos de medición de Respuesta a la Frecuencia.....	36
4.3.1 Método de impulso a baja tensión (LVI) .....	37
4.3.2 Método de barrido (Sweep).....	39
4.4 Características del equipo de prueba para la medición de Respuesta a la Frecuencia.....	40
4.5 Procedimientos de prueba para la medición de Respuesta a la Frecuencia .....	44
4.6 Medición de Respuesta a la Frecuencia en Transformadores de Potencia trifásicos de dos devanados.....	46
4.7 Medición de Respuesta a la Frecuencia en Transformadores de potencia monofásicos de tres devanados .....	52
4.8 Medición de Respuesta a la Frecuencia en Reactores de Potencia monofásicos .....	56

4.9 Medición de Respuesta a la Frecuencia en boquillas del tipo papel impregnado en aceite (OIP), instaladas en Transformadores y Reactores de Potencia .....	60
4.9.1 Antecedentes .....	60
4.9.2 Medición de Respuesta a la Frecuencia en boquillas del tipo OIP.....	61
4.10 Detección de fallas en Transformadores y boquillas al realizar la medición de Respuesta a la Frecuencia .....	64
4.11 Comparación entre pruebas dieléctricas tradicionales y el método de Respuesta al barrido de Frecuencia, en el diagnostico de Transformadores.....	67
 <b>Capitulo 5. Conclusiones.</b>	
Conclusiones.....	68
 <b>Bibliografía .....</b>	<b>69</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1.	
Ámbito de los Sistemas Eléctricos en CFE.....	5
Figura 2.2.	
Organigrama de CFE.....	6
Figura 2.3.	
Ámbito de influencia de la Subdirección de Transmisión .....	7
Figura 2.4	
Curva típica de Vida-Envejecimiento de un equipo .....	8
Figura 2.5	
Curva de Costo-Beneficio del mantenimiento.....	9
Figura 3.1	
Circuito equivalente de aislamiento bajo prueba .....	15
Figura 3.2	
Circuito generado de la medición de prueba de resistencia de aislamiento .....	17
Figura 3.3	
Corrientes debidas a la aplicación de voltaje de CD en aislamiento .	18
Figura 3.4	
Circuito de medición de corriente de excitación en un devanado conectado en estrella .....	20
Figura 3.5	
Circuito de medición de corriente de excitación en un devanado conectado en delta .....	20
Figura 3.6	
Circuito de capacitancias que conforman el capacitor de las boquillas del tipo OIP.....	21
Figura 3.7	
Circuito de medición de capacitancia C1 de las boquillas .....	22

Figura 3.8	
	Circuito de medición de capacitancia C2 de las boquillas ..... 23
Figura 3.9	
	Circuito de medición de collar caliente en las boquillas..... 24
Figura 3.10	
	Diagrama de conexión para la medición de resistencia óhmica en un devanado..... 25
Figura 3.11	
	Polaridad sustractiva de un transformador monofásico ..... 26
Figura 3.12	
	Diagrama de conexión del equipo medidor de relación de transformación..... 27
Figura 3.13	
	Diagrama de conexión del equipo medidor de impedancia de transformador monofásico ..... 28
Figura 4.1	
	Fuerzas ejercidas en los devanados de un transformador ..... 33
Figura 4.2	
	Comportamiento ideal RLC en el barrido de Respuesta a la Frecuencia..... 34
Figura 4.3	
	Ejemplo de Circuito para medición de Respuesta a la Frecuencia.... 36
Figura 4.4	
	Relación existente entre el impulso de entrada y el de salida ..... 38
Figura 4.5	
	Ejemplo de la aplicación del método impulsivo, para obtener la Respuesta a la Frecuencia a los devanados BT de un transformador trifásico ..... 38
Figura 4.6	
	Ejemplo de barrido de Respuesta a la Frecuencia a los devanados, de alta tensión de un transformador trifásico ..... 40

Figura 4.7	Equipo de prueba utilizando para el barrido de Respuesta a la Frecuencia a los devanados de un transformador.....	41
Figura 4.8	Indicadores y puertos del equipo de prueba utilizados para el barrido de Respuesta a la Frecuencia.....	41
Figura 4.9	Sistema de referencia a la red de tierra del equipo de prueba utilizado para la medición de Respuesta a la Frecuencia.....	42
Figura 4.10	Pantalla principal del equipo de prueba utilizado para la medición de RF.....	43
Figura 4.11	Pantalla para registro de características del equipo a probar utilizando el método de RF.....	43
Figura 4.12	Medición de la Respuesta a la Frecuencia devanados de alta tensión.....	48
Figura 4.13	Medición de la Respuesta a la Frecuencia devanados de baja tensión.....	49
Figura 4.14	Comparación de la Respuesta a la Frecuencia en los devanados de alta tensión.....	50
Figura 4.15	Comparación de la Respuesta a la Frecuencia en los devanados de baja tensión.....	51
Figura 4.16	Resultados de RF en el equipo del banco ATN T5, fase A.....	53

Figura 4.17	Resultados de la comparación en sus devanados de alta tensión de las tres fases del banco ATN T5.....	54
Figura 4.18	Resultados de la comparación en sus devanados de baja tensión de las tres fases del banco ATN T5.....	55
Figura 4.19	Resultados de la respuesta del devanado del equipo, serie: G1543-01.....	57
Figura 4.20	Resultados de la respuesta del devanado del equipo serie: G1161-02.....	58
Figura 4.21	Comparación de las respuestas de los equipos, serie: G1161-02 y G1543-01.....	59
Figura 4.22	Conexión para medición de la RF de boquillas .....	62
Figura 4.23	Respuesta obtenida en boquillas de diferente voltaje .....	62
Figura 4.24	Respuesta obtenida en boquillas del mismo valor de voltaje y capacitancia.....	63
Figura 4.25	Respuesta obtenida en autotransformador con falla en cambiador de derivaciones .....	64
Figura 4.26	Respuesta obtenida en transformador trifásico con daño en boquilla .....	65
Figura 4.27	Respuesta obtenida en transformador trifásico con la conexión directa a terminales del devanado .....	66

# Lista de Tablas

Tabla 2.1	Equipos instalados en el ámbito de la GRTO .....	7
Tabla 3.1	Valores típicos de constantes dieléctricas .....	14
Tabla 3.2	Técnicas de diagnóstico utilizadas en transformadores de potencia .....	30
Tabla 4.1	Conexiones sugeridas de prueba para transformadores monofásicos .....	44
Tabla 4.2	Conexiones sugeridas de prueba para transformadores trifásicos....	45
Tabla 4.3	Diagnostico de acuerdo con la variación de los espectros .....	46
Tabla 4.4	Características de equipos a diagnosticar usando el barrido de frecuencia .....	46
Tabla 4.5	Conexiones realizadas para la medición de la respuesta a la frecuencia .....	47
Tabla 4.6	Características de equipos del banco ATN T5 a diagnosticar con el barrido de frecuencia .....	52
Tabla 4.7	Conexiones realizadas en los equipos del banco ATN T5 a diagnosticar usando el barrido de frecuencia .....	52
Tabla 4.8	Características de equipos del banco PIT R1 a diagnosticar con barrido de frecuencia .....	56

Tabla 4.9	
Conexiones realizadas en equipos del banco PIT R1 para el barrido de frecuencia .....	57
Tabla 4.10	
Conexión para medición de la RF de boquillas .....	61
Tabla 4.11	
Diferencias entre métodos de prueba tradicionales y RF .....	67

# Lista de Símbolos y Abreviaturas

CFE	Comisión Federal de Electricidad
GRTO	Gerencia Regional de Transmisión Occidente
ST	Subdirección de Transmisión
ZT	Zona de Transmisión
RF	Respuesta a la Frecuencia
IEEE	Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos
ANSI	Instituto de Estándares Nacionales Americanos
LAPEM	Laboratorio de Pruebas Eléctricas y Mecánicas
R	Resistencia
L	Inductancia
C	Capacitancia
dB	Decibeles
$V_o$	Voltaje de salida
$V_i$	Voltaje de entrada
°C	Grados centígrados
MW	Megawatt
kV	Kilovolt
A	Ampere
MVA	Mega volt ampere
Hz	Hertz
VCD	Voltaje de Corriente Directa
VCA	Voltaje de Corriente Alterna
kW	Kilowatt
H	Devanado Alta Tensión
X	Devanado Baja Tensión
C1	Aislamiento principal del capacitor de la boquilla
C2	Aislamiento de la derivación del capacitor
TAP	Electrodo de la derivación del capacitor

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica en el territorio nacional, ha sido necesario el crecimiento de los sistemas de transmisión de alta tensión que conforman la red interconectada nacional, incrementando también el crecimiento de la infraestructura en las operaciones de transformación de la energía.

Los equipos de transformación son los encargados de adecuar la energía eléctrica, de acuerdo con las necesidades de los consumidores; para cumplir con esta actividad, se requiere de un gran esfuerzo de parte del personal involucrado en la operación y mantenimiento de dichos equipos y es necesario apoyarse en la aplicación de metodologías de prueba, utilizando equipos de medición con la innovación tecnológica que permita el diagnóstico y análisis de los equipos de transformación, con mayor eficiencia y eficacia, con la finalidad de asegurar la continuidad de la red eléctrica nacional y sus parámetros adecuados de operación.

### 1.2 Objetivos

El objetivo general de este reporte es describir las pruebas de diagnóstico a transformadores de potencia y de manera detallada analizar el método de **Medición de Respuesta a la Frecuencia**, para el diagnóstico de Transformadores de Potencia, instalados en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Occidente.

En particular en este reporte se pretende:

- Difundir los procedimientos de prueba para aplicar el método de Respuesta a la Frecuencia en los distintos tipos de transformadores instalados en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Occidente.

- Analizar la factibilidad de sustituir procedimientos de prueba tradicionales, por la medición de Respuesta a la Frecuencia, en mantenimiento rutinario de transformadores de potencia.

### 1.3 Justificación

Un transformador es probado para cerciorarse hasta donde es posible, que ha sido diseñado adecuadamente y construido a fin de soportar la carga homologada, mientras que al mismo tiempo resiste todas las situaciones peligrosas, a que puede estar expuesto, durante un periodo de veinte años o más.

En el diagnóstico de transformadores de potencia, se han implementado diversos métodos de prueba, con la premisa que estos no sean destructivos, para obtener información y formar una base de datos numéricos y que permita comparar el historial de los equipos, al aplicar periódicamente estas pruebas.

En el territorio nacional la Comisión Federal Electricidad (CFE), tiene bajo su responsabilidad el mantener y asegurar la continuidad de la red eléctrica, por lo que es necesario investigar las tecnologías actuales para el diagnóstico y los mantenimientos a los equipos de transformación que forman de la misma.

La aplicación del método de medición de la **Respuesta a la Frecuencia** (RF) en transformadores, ofrece la opción de mayor confiabilidad en el resultado, debido a su característica de repetitividad, seguridad durante la aplicación de la medición y al no ser influenciada por los efectos de temperatura y humedad intrínsecos en el medio ambiente.

En el presente reporte se analiza la factibilidad de implementar dicha prueba durante los mantenimientos rutinarios a los equipos de transformación, con la finalidad de minimizar los tiempos de libranza de los equipos e incrementar la seguridad del personal durante dichas actividades, optimizando los recursos utilizados al realizar las actividades de los mantenimientos, lo anterior con la finalidad de brindar un soporte en la tarea de alcanzar los estándares internacionales que beneficien a la empresa y motivar el crecimiento hacia los primeros lugares en esta área de la ingeniería eléctrica.

## 1.4 Metodología

El presente reporte de actividades y desempeño profesional fue realizado resumiendo las principales actividades que se han realizado desde el año de 1998 a la fecha en el ámbito de las áreas de generación y transmisión de la CFE.

En este reporte se incorporan referencias a diversos manuales operativos, procedimientos de mantenimiento vigentes en la CFE y el Laboratorio de Pruebas Eléctricas y Mecánicas (LAPEM), así mismo de los proveedores y especialistas de instituciones como el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) y Doble Engineering Compañy (DOBLE) y se hace énfasis en la aplicación de la prueba de respuesta a la frecuencia para el diagnostico de transformadores.

## 1.5 Descripción de los Capítulos

En el capítulo 2 de este reporte, se describe la organización de la CFE, el ámbito de influencia de las áreas en que se ha participado durante la experiencia profesional y los fundamentos para el presente reporte.

En el capítulo 3, se describen los procedimientos de pruebas de operación aplicados para el Mantenimiento a los equipos de transformación instalados en las Subestaciones Eléctricas, esenciales en el diagnostico de los equipos.

En el capítulo 4, se describen las actividades desarrolladas durante la investigación de la aplicación de las mediciones de **RF** a los equipos, el diagnostico de fallas con este método.

En el capitulo 5, se resumen las conclusiones derivado de la propuesta para considerar la aplicación de este método de prueba, en la medición de los equipos.

## Capítulo 2

# Los Transformadores de Potencia y la Comisión Federal de Electricidad

### 2.1 Operación de los Transformadores en el Sistema Eléctrico Nacional.

La CFE es una empresa del gobierno mexicano que genera, transmite, distribuye y comercializa energía eléctrica para más de 34.0 millones de clientes, lo que representa a más de 100 millones de habitantes, e incorpora anualmente más de un millón de clientes nuevos.

En la Figura 2.1, se muestra un ejemplo del sistema eléctrico que mantiene la CFE, para conducir la electricidad desde las centrales de generación hasta el domicilio de cada uno de sus clientes.

Esta infraestructura genera la energía eléctrica y está compuesta por 178 centrales generadoras, con una capacidad instalada de 51,571 megawatts (MW), tiene cerca de 744 mil kilómetros de líneas de transmisión y de distribución, utilizando más de 350 sistemas de transformación, que son de vital importancia en la red eléctrica interconectada nacional [CFE 2010].

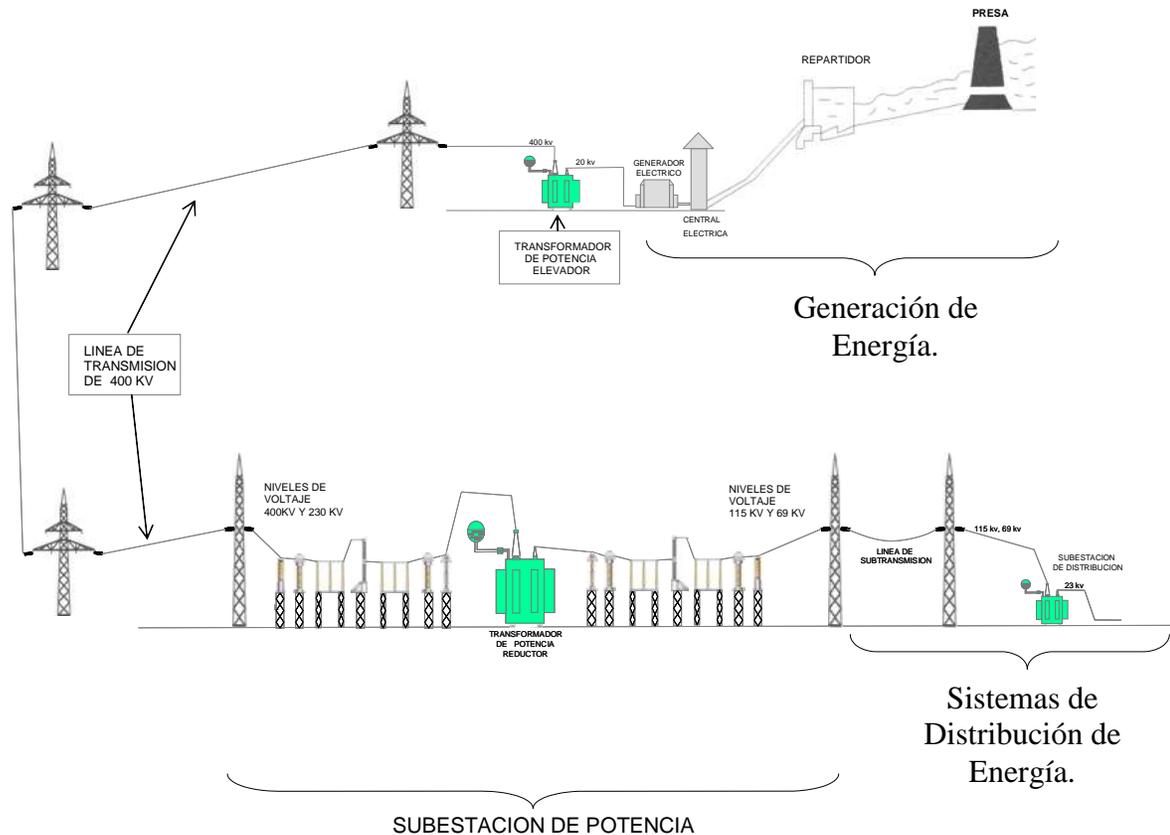


Figura 2.1. Ámbito de los Sistemas Eléctricos en CFE.

## 2.2 Misión y objetivos

La CFE tiene como misión, asegurar dentro de un marco de competencia y actualizado tecnológicamente, el servicio de energía eléctrica, en condiciones de cantidad, calidad y precio, con la adecuada diversificación de fuentes de energía. Optimizar la utilización de su infraestructura física, comercial y de recursos humanos.

Proteger el medio ambiente, promover el desarrollo social y respetar los valores de las comunidades donde se realizan nuevos proyectos.

Para lograr la misión se tienen planteados los siguientes objetivos

- Operar sobre las bases de indicadores internacionales en materia de productividad, competitividad y tecnología.

- Implementar acciones que contribuyan al desarrollo sustentable.
- Garantizar la seguridad, salud y bienestar del personal.
- Satisfacer los requisitos y expectativas de los clientes.
- Optimizar la administración de los recursos materiales y financieros.

[CFE 2010].

## 2.3 Organigrama

La estructura bajo la cual está organizada esta empresa, está representada por el siguiente organigrama que se muestra en la Figura 2.2; se puede observar como se conforma la Subdirección de Transmisión (ST), en la Figura 2.3, se muestra el lugar que ocupa la Gerencia Regional de Transmisión Occidente (GRTO) en el proceso de transmisión de energía eléctrica.

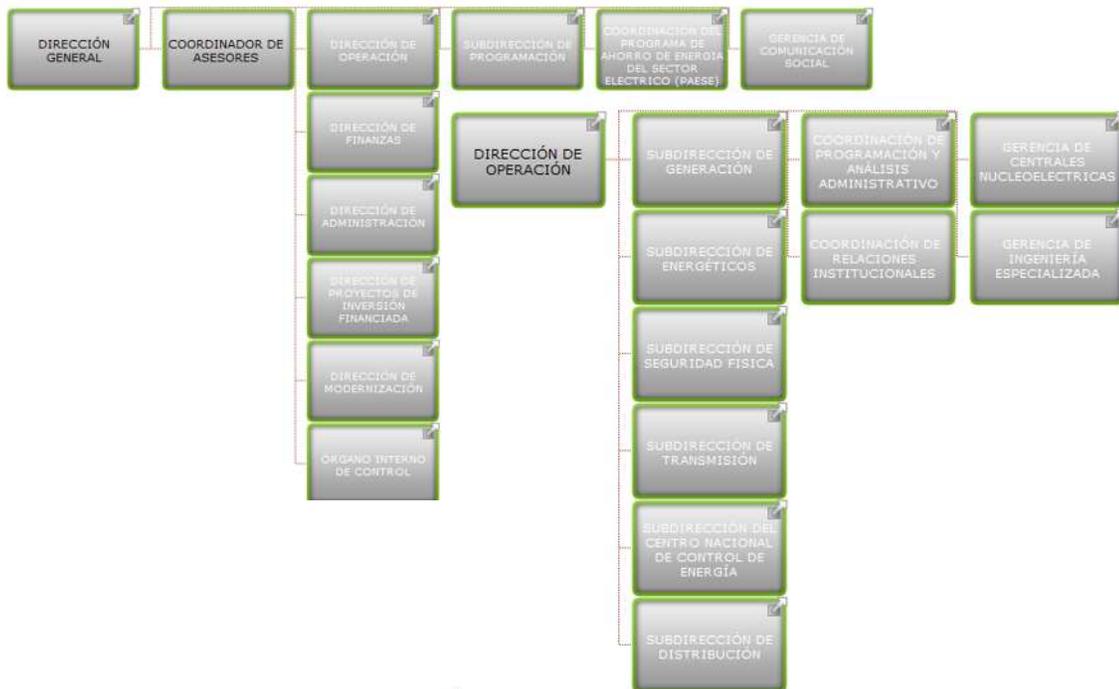


Figura 2.2. Organigrama de CFE.



**Figura 2.3** Ámbito de influencia de la Subdirección de Transmisión.

## 2.4 La Gerencia Regional de Transmisión Occidente

La GRTO en su ámbito de influencia tiene instalados los equipos y líneas de transmisión, que se enlistan en la Tabla 2.1

**Tabla 2.1.** Equipos instalados en el ámbito de la GRTO.

Subestaciones	81
MVAs	36,568.39
Bancos de Transformadores	181
Transformadores Trifásicos	140
Transformadores Monofásicos	416
Líneas de Transmisión	157
Kilómetros de Líneas	9,812.50

Para realizar el mantenimiento de los equipos de la GRTO, esta conformada por 07 Zonas de Transmisión (ZT), con sede en los distintos estados de su ámbito, identificadas de la manera siguiente:

Zona de Transmisión Bajío.

Zona de Transmisión Colima.

Zona de Transmisión Jalisco.

Zona de Transmisión Lázaro Cárdenas.

Zona de Transmisión Michoacán.

Zona de Transmisión Nayarit.

Zona de Transmisión San Luis Potosí.

Cada una de las ZT tiene independencia de gestión, para la programación de actividades de mantenimiento de los equipos de transformación y demás equipos eléctricos de potencia, con el compromiso de cumplir con las metas e indicadores de gestión, comprometidos con la subdirección de transmisión.

## 2.5 Criterios y políticas de mantenimiento en los Transformadores de Potencia.

Un plan de mantenimiento tiene como finalidad, reducir el número de fallas, durante el periodo de vida útil del equipo, en la Figura 2.4 se muestra una curva típica de la vida útil de los transformadores de potencia, en la cual se observa que el equipo puede sufrir fallas inmediatas, cuando se energiza, después se tiene un periodo de vida útil, en el que la posibilidad de ocurrencia de fallas disminuye y al final de este periodo, es más probable la ocurrencia de fallas debido al envejecimiento de sus materiales aislantes.

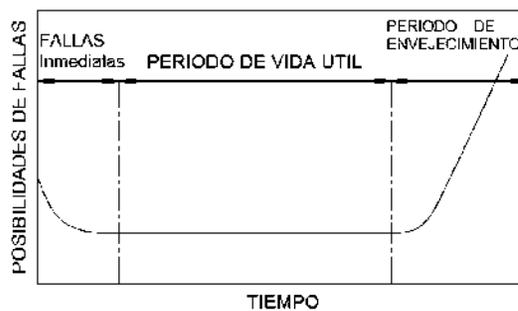


Figura 2.4 Curva típica de Vida-Envejecimiento de un equipo.

Actualmente existen varios tipos de mantenimiento de transformadores los cuales se aplican indistintamente; en la Figura 2.5 observamos que es posible aumentar la productividad, si incrementamos la eficacia de las técnicas de mantenimiento, obteniendo como consecuencia una reducción de los costos de operación y mantenimiento. [CFE, 2007a].



**Figura 2.5** Curva de Costo-Beneficio del mantenimiento.

La CFE en el tomo I del “Manual de transformadores y reactores de potencia”, determina los programas y políticas de mantenimiento de los equipos, en el cual se describen las actividades de mantenimiento de los transformadores y sus componentes, las pruebas que se realizan en los transformadores, ya sea en servicio o fuera de servicio, los tipos de reparación que se realizan en los transformadores y los tipos de prueba que se realizan para cumplir con las normas de referencia para el mantenimiento y pruebas eléctricas de transformadores ANSI/IEEEC57.12.90 [ANSI/IEEE, 1999], norma utilizada por los fabricantes de los equipos para las pruebas iniciales de operación, así como las técnicas de medición de alta sensibilidad que esta investigando actualmente la CFE.

La CFE refiere en el tomo I del “Manual de transformadores y reactores de potencia” [CFE, 2007a], tiene tres criterios para establecer los mantenimientos:

- **Criterio crítico contra no crítico.**

Este criterio se basa en la probabilidad de falla del equipo y es considerado crítico cuando esta represente una amenaza para la continuidad de la red eléctrica y para la seguridad en su operación.

Es considerado no crítico si la falla del equipo no representa una amenaza al sistema y a la seguridad en su operación.

- **Criterio de límites permisibles.**

Este criterio considera los resultados obtenidos de las pruebas, en las cuales se analiza la posibilidad de que se presente, en un lapso de tiempo corto, una condición límite y peligrosa.

- **Criterio de datos del fabricante.**

La información del fabricante permite evaluar los límites de vida esperada o sugiere intervalos de tiempo para el mantenimiento, en función de la disponibilidad para dejar fuera de servicio el equipo.

Se deducen también tres tipos de mantenimiento principales:

**Mantenimiento correctivo.**

Permite operar el equipo hasta que ocurra una falla, antes de realizar una reparación mayor o la sustitución. Es inaceptable en instalaciones que requieren un alto nivel de confiabilidad, debido a que esta fundamentado para casos de emergencia; con este tipo de mantenimiento, se tiene una utilización ineficiente de la mano de obra y costos elevados de operación y mantenimiento.

### **Mantenimiento Preventivo.**

Tiene como objetivo prevenir las interrupciones y fallas; prolonga el tiempo de operación de los equipos, mediante inspecciones programadas y revisiones periódicas, se logra el objetivo, sin embargo se ha observado que los costos son relativamente altos.

### **Mantenimiento Predictivo.**

En este tipo, se practican técnicas de inspección y pruebas que ayuden a determinar con certeza la condición del equipo. Se utiliza un control riguroso para lograr el máximo tiempo de operación del equipo, la disminución del costo de operación y mantenimiento.

En el siguiente capítulo, se hablará acerca de una de las actividades del mantenimiento predictivo, explicando los diferentes métodos de prueba para diagnosticar el estado de los transformadores de potencia.

## Capítulo 3

### Diagnóstico de transformadores de potencia.

La única prueba que demuestra que el transformador durara veinte años, tiempo de vida útil estimado por los fabricantes de los equipos de potencia, es hacer que esto suceda.

Cuando el fabricante realiza sus pruebas en planta, estas son un seguro sobre el buen estado del equipo, o sobre la probabilidad de que se presenten defectos de diseño o de construcción, posteriormente las pruebas que son realizadas en campo antes de la puesta en servicio, son la garantía contra daños en el traslado, estas pruebas no deben tener un costo superior al de la seguridad y confianza que suministran, por ello la selección de las pruebas adecuadas debe, en consecuencia, depender en gran parte del juicio y la experiencia.

#### 3.1 Métodos de prueba para el diagnóstico de transformadores de potencia.

Independientemente del método de prueba que usen los fabricantes y operadores de los equipos, todos deben cumplir con el código y criterios establecidos por la norma ANSI/IEEE C57.12.90, [ANSI/IEEE, 1999] y la norma mexicana NMX-J-169-ANCE-1997, [NMX, 1997], con la finalidad de que sean comparables los resultados de dichas pruebas, estableciendo un historial del equipo y poder utilizarlo para el diagnóstico del estado de operación de este.

El código de pruebas especificado por la norma se clasifica como sigue:

1. Medición de relación de transformación, polaridad y configuración de los devanados.
2. Mediciones de resistencia eléctrica de devanados.
3. Medición de impedancia, regulación y pérdida de carga.

4. Medición de prueba de vacío y corriente de excitación.
5. Prueba de temperatura.
6. Medición de la resistencia dieléctrica.

La CFE, en el tomo II del “Manual de transformadores y reactores de potencia” [CFE, 2007b], ha desarrollado entre otros procedimientos de mantenimiento, los métodos de pruebas necesarios para el diagnóstico de los transformadores, con el propósito de cumplir con las normas de referencia, lo cual a dado como resultado un compendio de procedimientos debidamente especificados, que hacen hincapié en la seguridad del personal operativo y basados además en la vasta experiencia técnica de los especialistas en la materia.

Los métodos de prueba actualmente utilizados para el diagnóstico de los transformadores de acuerdo a las normas y estándares especificados son:

- Medición de Factor de Potencia.
- Medición de Resistencia de Aislamiento.
- Medición de Corriente de Excitación.
- Medición de Factor de Potencia y Capacitancia de Boquillas del Tipo Condensador.
- Medición de Resistencia Óhmica.
- Medición de Relación de Transformación.
- Medición de Reactancia de Dispersión (impedancia).

En las siguientes secciones se describen los procedimientos utilizados para el diagnóstico de los equipos.

En la aplicación de estos métodos, es importante que en algunos de ellos, se consideren las condiciones del medio ambiente y factores de corrección por el efecto de temperatura.

Se ha observado que al aplicar estos métodos de prueba, en el caso de falla, uno solo de ellos no es determinante para el diagnóstico de los equipos, por lo que se requiere el soporte de dos o mas de estas pruebas, para lograr un dictamen confiable.

### 3.2 Medición de Factor de Potencia.

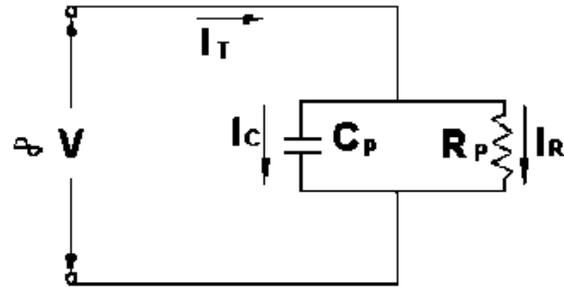
Las cualidades del aislamiento de un transformador son las más importantes para su correcta operación, una manera de verificar su condición es la medición de factor de potencia del aislamiento, basándose en el principio de medir con un puente de capacitancia, la capacitancia entre devanados y entre devanados y tierra.

Este método de prueba se basa en las características de las constantes dieléctricas de los materiales aislantes utilizados en la construcción de los transformadores, se miden sus valores de absorción dieléctrica, resistencia dieléctrica y capacitancia, es decir se miden sus pérdidas por unidad de volumen. En la Tabla 3.1 se muestran valores típicos de estas constantes, estos valores pueden ser afectados por la contaminación, esfuerzos eléctricos, pirolisis, degradación y envejecimiento de los materiales.

**Tabla 3.1** Valores típicos de constantes dieléctricas.

Material	Constante Dieléctrica
Aire	1.0
Aceite	2,2
Baquelita	4,5 - 5,5
Papel	2,0 – 2,6
Polietileno	2,3
Porcelana	5,7 – 6,8

El circuito equivalente de un aislamiento bajo prueba se muestra en la Figura 3.1 el factor de potencia se define como el coseno de ángulo, entre el vector del voltaje aplicado y el vector de la corriente total que circula por el aislamiento bajo prueba.



$C_p$ , Capacitancia bajo prueba (F)  
 $I_C$ , Corriente capacitiva (mA)  
 $I_R$ , Corriente resistiva (mA)  
 $I_T$ , Corriente total (A)  
 $R_p$ , Resistencia indicativa de las pérdidas ( $\Omega$ )  
 $V$ , Tensión aplicada (V)

**Figura 3.1** Circuito equivalente de aislamiento bajo prueba.

Al aplicar este método de prueba, con la finalidad de obtener un resultado confiable, es necesario tomar en cuenta las condiciones siguientes:

- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.
- Realizar la corrección de temperatura a 20 °C, del resultado en base a la temperatura del devanado del equipo.
- Realizar la limpieza de porcelana del aislamiento de boquillas del equipo.
- La correcta conexión al sistema de tierra física tanto del equipo de prueba como del transformador.
- El manejo adecuado de cables de prueba.

La medición se realiza con el equipo no energizado, utilizando una fuente portátil de corriente alterna de 10 KV, como se indica en el tomo II del “Manual de Transformadores y Reactores de Potencia”; el criterio usado para el análisis de los resultados es el siguiente:

- Un valor de factor de potencia menor a 0.5% y corregido a 20 °C, para equipos nuevos.
- Un valor de factor mayor de 0.5% corregido a 20°C, para transformadores con mas de 20 años en operación.

Al realizar esta prueba se cumple un requerimiento del código ANSI, verificando las condiciones dieléctricas de los devanados y sus aislamientos.

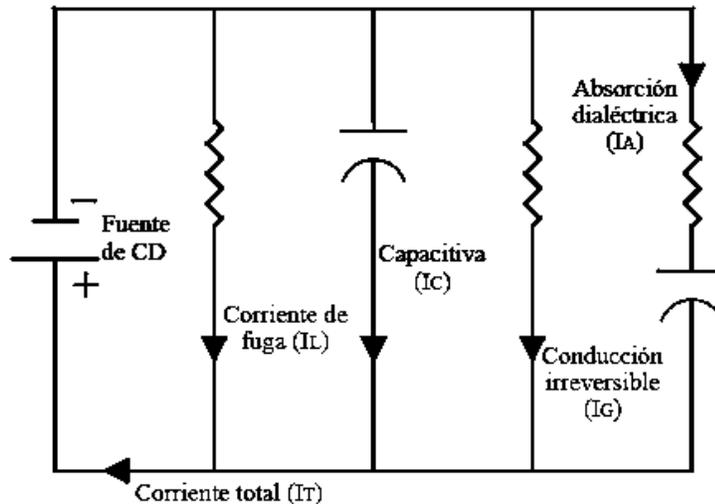
### **3.3 Medición de Resistencia de Aislamiento.**

La resistencia de aislamiento se define como la oposición del aislamiento al paso de la corriente eléctrica al aplicar un voltaje de corriente directa; la resistencia esta en función de la duración de la prueba y el voltaje aplicado.

El objetivo de la prueba es determinar la posible presencia de contaminantes o el envejecimiento del aislamiento, con los resultados obtenidos se calcula el índice de polarización relacionado con el índice de humedad presente en el medio aislante; el cálculo de este índice toma como referencia la guía ANSI/IEEE57.12.90. [ANSI/IEEE, (1999)]

Al aplicar una corriente directa en un aislamiento se genera una corriente denominada “corriente de aislamiento”, la cual tiene dos componentes principales, uno es la corriente que fluye en el volumen del cuerpo del aislamiento y la segunda es la corriente de fuga, la cual fluye por la superficie del aislamiento.

En la Figura 3.2, se muestra un circuito equivalente correspondiente a la medición de la resistencia de aislamiento, en el cual se observa que la corriente que fluye por el volumen del aislamiento, esta compuesta a su vez, por otras tres componentes, que son la corriente capacitiva, la corriente de absorción dieléctrica y la corriente de conducción irreversible. En la Figura 3.3., se muestra el comportamiento de estas corrientes en función del tiempo.



**Figura 3.2** Circuito generado de la medición de prueba de Resistencia de Aislamiento.

### **Corriente Capacitiva.**

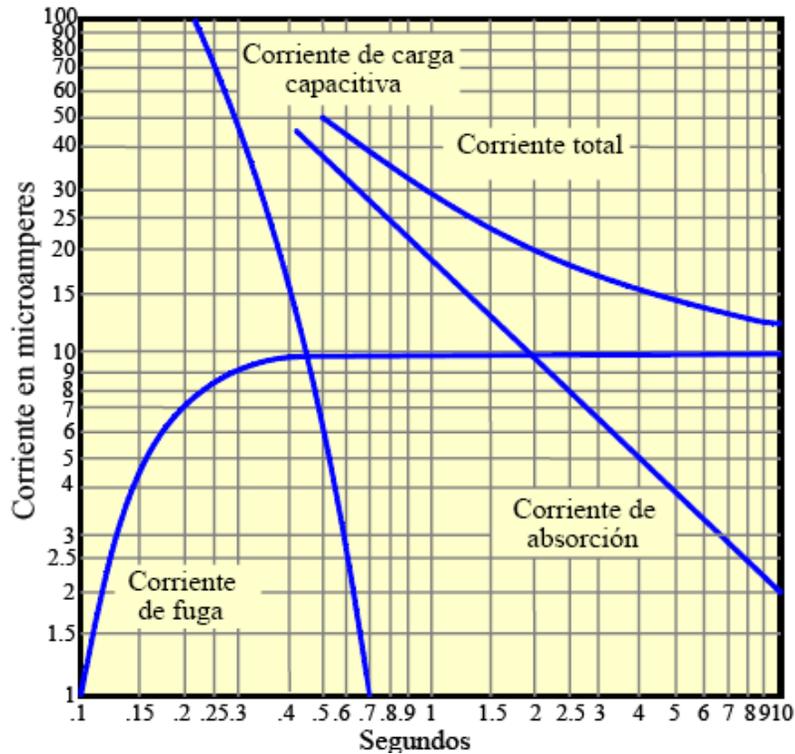
Esta corriente tiene un valor inicial alto y decrece a medida que se carga la capacitancia del aislamiento y alcanza un valor despreciable en un tiempo máximo de 15 segundos.

### **Corriente de absorción dieléctrica.**

Esta corriente decrece gradualmente en minutos, desde un valor relativamente alto a un valor cercano a cero y varía exponencialmente. Los valores de resistencia obtenidos en los primeros minutos de una prueba, están determinados por esta corriente de absorción dieléctrica; dependiendo del volumen y tipo de aislamiento, esta corriente puede alcanzar un valor despreciable en minutos u horas.

### **Corriente de conducción irreversible.**

Esta corriente fluye a través del aislamiento, es prácticamente constante y predomina cuando la corriente de absorción dieléctrica es despreciable, su valor se afecta debido a las condiciones superficiales de contaminación y humedad del aislamiento.



**Figura 3.3** Corrientes debidas a la aplicación de voltaje CD en aislamiento.

Los factores que afectan la medición de la resistencia de aislamiento son los siguientes:

Conexiones inadecuadas.

Efecto de humedad.

Efecto de la Temperatura.

Efecto de la condición de la superficie del aislamiento.

Por lo anterior el valor de resistencia de aislamiento, depende del contenido de humedad en el mismo, este valor también varía con respecto a la temperatura del equipo y ambiente de manera indefinida. La forma ideal de evaluar las condiciones del aislamiento, es mediante el análisis de la tendencia de los valores obtenidos en las pruebas periódicas a que se somete dicho aislamiento, por lo que es conveniente graficar los resultados de las lecturas obtenidas en las pruebas de los mantenimientos preventivos.

### **3.4 Medición de Corriente de Excitación.**

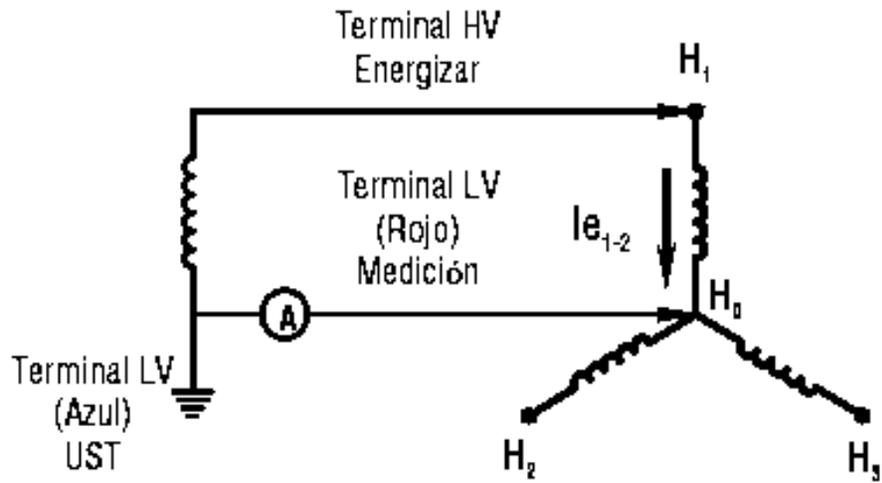
Los transformadores están expuestos a fallas en sus devanados y el núcleo, originados por los esfuerzos eléctricos y mecánicos, provocados por corto circuitos o daños ocasionados por golpes durante su traslado. Estos esfuerzos provocan corto circuito entre espiras, sobrecalentamientos y desplazamiento de devanados y en el núcleo.

Para obtener la corriente de excitación, se aplica un voltaje de 10 KV a 60 Hz, al devanado primario y con el devanado secundario del transformador sin carga, es decir, el secundario en circuito abierto; la magnitud de la corriente de excitación depende del voltaje aplicado, del número de vueltas en el devanado, de las dimensiones del devanado y de otras características geométricas y eléctricas del transformador. En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran los circuitos para realizar las pruebas de corriente de excitación para un devanado conectado en estrella y otro en delta, respectivamente.

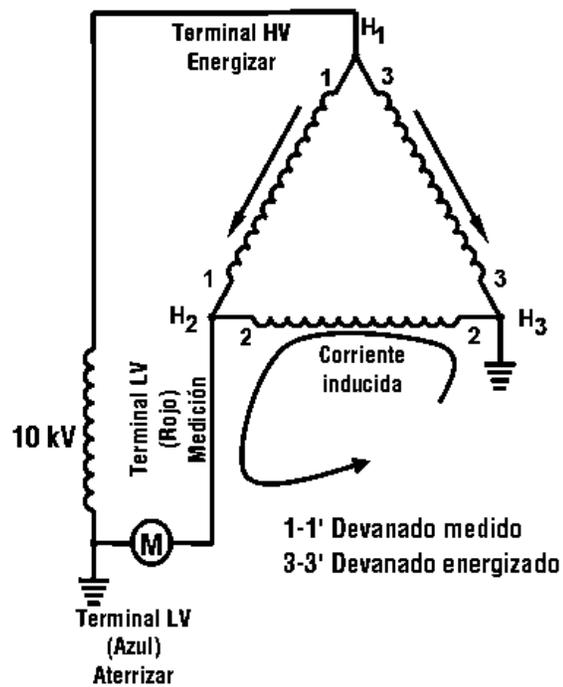
No existe un valor o un límite recomendado, porque cuando un devanado tiene una o varias espiras en corto, estas espiras se convierten en un devanado adicional que se encuentra en corto circuito incrementando las pérdidas, las cuales originan que la corriente de excitación se incremente, teniendo como referencia únicamente la medición tomada durante la puesta en servicio.

Para comparar valores de aceptación se deben considerar variaciones de  $\pm 5\%$ , al comparar los valores con los históricos, con los de otra fase o en los valores registrados durante las pruebas directa e inversa.

Es recomendable realizar las pruebas de corriente de excitación, antes de desarrollar las mediciones que manejen corriente directa, tales como: Resistencia Óhmica, Resistencia de Aislamiento, Tensión de Recuperación, debido que estas pruebas magnetizan el núcleo, lo cual puede provocar valores anormales en la medición.



**Figura 3.4** Circuito de medición de Corriente de Excitación en un devanado conectado en estrella.

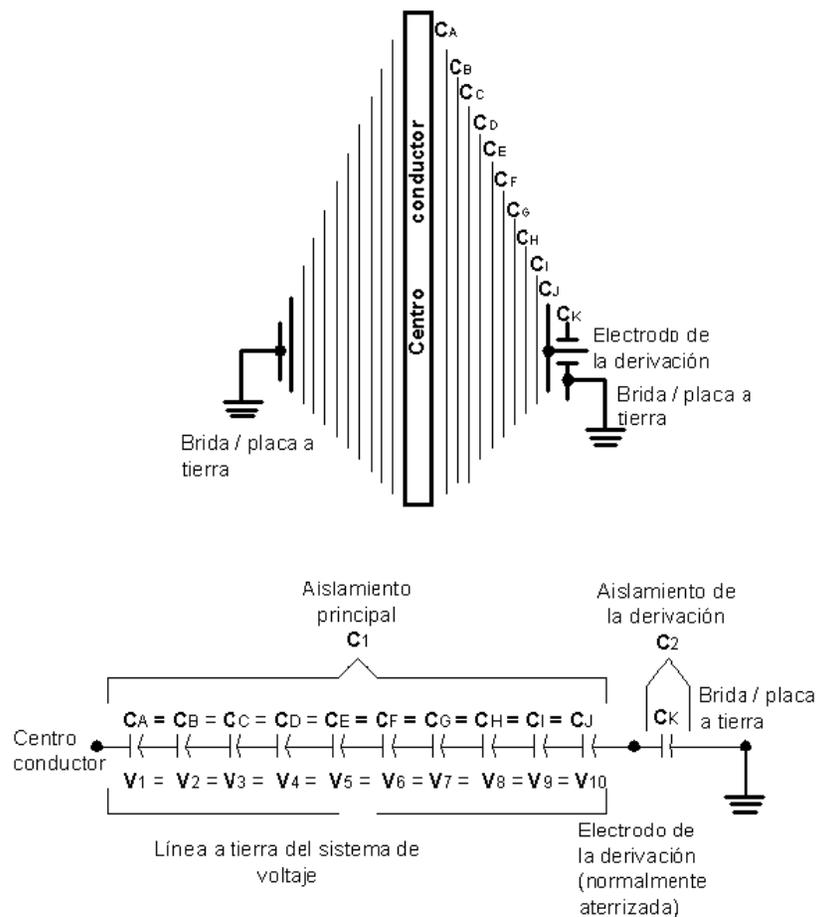


**Figura 3.5** Circuito de medición de Corriente de Excitación de un devanado conectado en delta.

### 3.5 Medición de Factor de Potencia y Capacitancia en boquillas del tipo papel impregnado en aceite (OIP).

Las boquillas son el medio de interconexión entre las terminales del devanado y las conexiones externas, por su construcción son los componentes del transformador mas sensibles a las fallas y daños por sismos y condiciones ambientales.

La finalidad de la medición del Factor de Potencia consiste en detectar el deterioro del capacitor que conforma la boquilla, este se muestra en la Figura 3.7. El deterioro se manifiesta en un incremento en el valor de la capacitancia nominal, así como también de las pérdidas del sistema dieléctrico (papel-aceite) de la boquilla.



**Figura 3.6** Circuito de capacitancias que conforman el capacitor de las boquillas.

### 3.5.1 Medición de Factor de Potencia y Capacitancia del aislamiento principal del capacitor.

La medición del aislamiento principal del capacitor (C1), permite obtener el valor de Factor de Potencia que debe ser menor del 0.5% corregido a una temperatura de 20°C y medir el valor de Capacitancia del capacitor construido entre el conductor principal y la terminal o electrodo de la derivación (TAP), como se muestra en la fig. 3.7, este valor puede ser comparado con el dato de placa o con el valor inicial de puesta en servicio, considerando que si la diferencia rebasa el 5%, se debe investigar la causa probable y al ser mayor del 10%, será necesario retirar de servicio la boquilla.

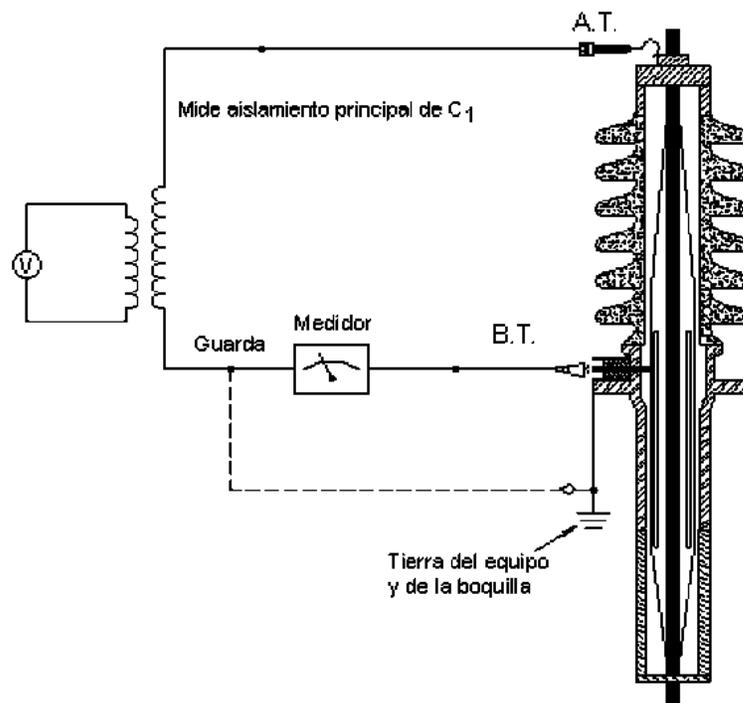


Figura 3.7 Circuito de medición de Capacitancia C1 de las boquillas.

### 3.5.2 Medición de Factor de Potencia y Capacitancia del aislamiento de la derivación.

La medición del aislamiento de la derivación (C2), permite obtener el valor de Factor de Potencia y de Capacitancia entre el electrodo de la derivación (TAP) y la brida de la boquilla, como se observa en la Figura 3.8, el voltaje de prueba no debe exceder el valor de 500 volts, y el valor de capacitancia medido se compara con los datos de placa y el histórico de la boquilla.

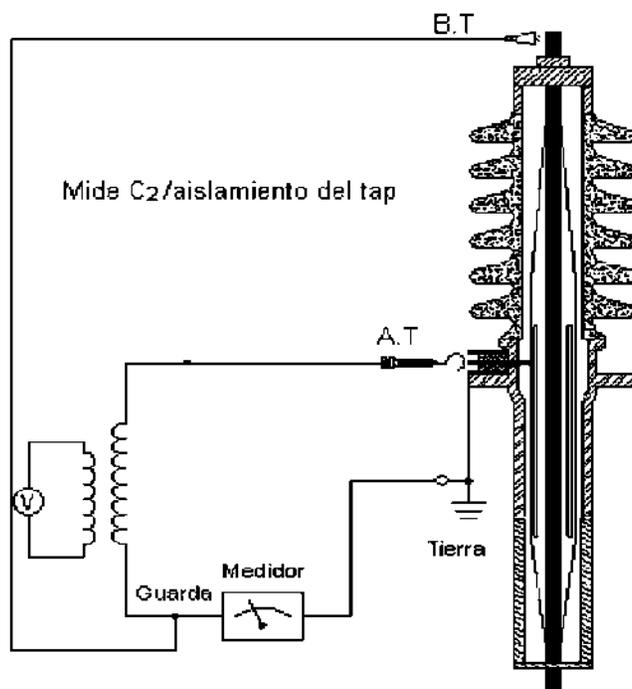
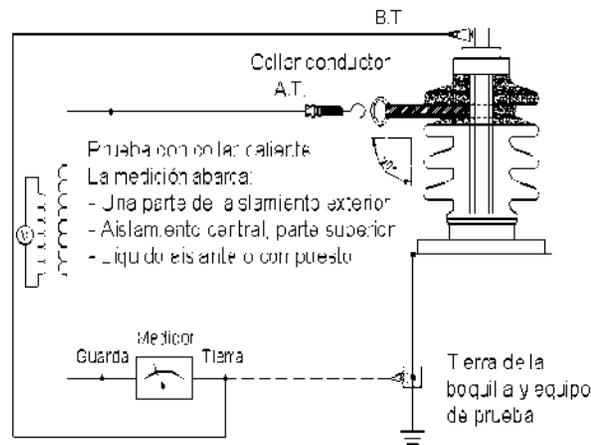


Figura 3.8 Circuito de medición de Capacitancia C2 de las boquillas.

### 3.5.3 Medición de collar caliente en boquillas.

Esta medición se realiza a boquillas que no tienen disponible la terminal de derivación del aislamiento ó TAP, también en las que son de construcción sólida con aceite o compound (compuesto de resinas y silicones), en la Figura 3.9, se muestra el diagrama de conexión, con la medición se puede verificar el nivel de aceite, humedad interna o efectos de descargas parciales y daños en el aislamiento externo.

Los valores obtenidos en la medición deben ser menor o igual a 0.1 W al aplicar 10 KV a 60 HZ, estos valores pueden ser comparados con los históricos de la boquilla.



**Figura 3.9** Circuito de medición de collar caliente en las boquillas.

### 3.6 Medición de Resistencia Óhmica.

Esta prueba permite detectar falsos contactos en terminales del devanado, espiras cortocircuitadas o alta resistencia de contacto en cambiadores de derivaciones; para medir la resistencia óhmica en los devanados se usa generalmente un puente de alta precisión, el cual puede ser un puente de Wheatstone o de Kelvin.

Los resultados de las mediciones deben cotejarse con el historial de mediciones o con las mediciones realizadas durante la puesta en servicio; los valores medidos deben ser corregidos a 20°C, la tolerancia permisible de los valores obtenidos en campo con los de fabrica debe ser  $\pm$  2%, la ecuación 3.1 es la fórmula de corrección a 20°C.

$$R_s = R_m \left( \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

$R_s$ , Es la temperatura de referencia (generalmente valor de fabrica).

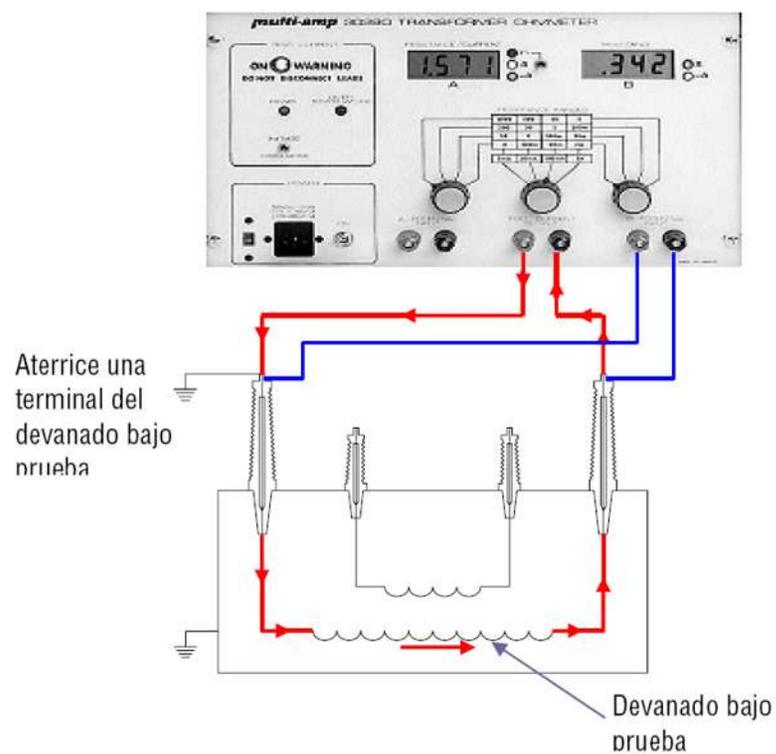
$R_m$ , Es la resistencia medida.

$T_s$ , Es la temperatura de referencia.

$T_m$ , Es la temperatura del devanado durante la medición.

$T_k$ , Es la constante equivalente para el cobre 234.5 y 225 para el aluminio.

En la Figura 3.10, se muestra el diagrama de conexión para un solo devanado.



**Figura 3.10** Diagrama de conexión para la medición de Resistencia Óhmica en un devanado.

### 3.7 Medición de Relación de Transformación.

Es importante que en cada transformador se realicen mediciones de relación de transformación y de polaridad; los equipos son conectados en paralelo o con conexiones en estrella o delta, en el caso de existir un error en la conexión equivale a conectar en corto circuito los equipos, con consecuencias desastrosas.

La medición de relación de transformación consiste en obtener mediante la prueba el número de vueltas de los devanados, en base al principio de la relación de voltaje primario y voltaje secundario. Es importante considerar la correspondencia en el diagrama fasorial de los devanados involucrados en la prueba, con esta medición se verifican las terminales de los cambiadores de derivaciones, se identifica también espiras en corto, la determinación del número de espiras en los devanados y la polaridad de las terminales de los devanados esta identificación es importante ya que permite la adecuada configuración de las conexiones, como se muestra en la Figura 3.11.

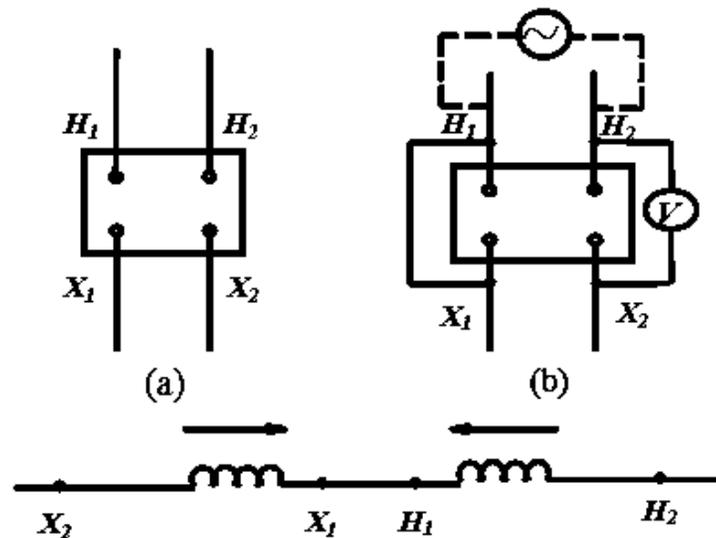


Figura 3.11 Polaridad sustractiva de un transformador monofásico.

Para el análisis de los resultados como regla general se determina que la diferencia entre las relaciones medidas y calculadas, no sea mayor del 0.5, la ecuación 3.2, determina el valor de la diferencia.

$$\%DIF = \frac{R_T - R_M}{R_T} \times 100 \quad (3.2)$$

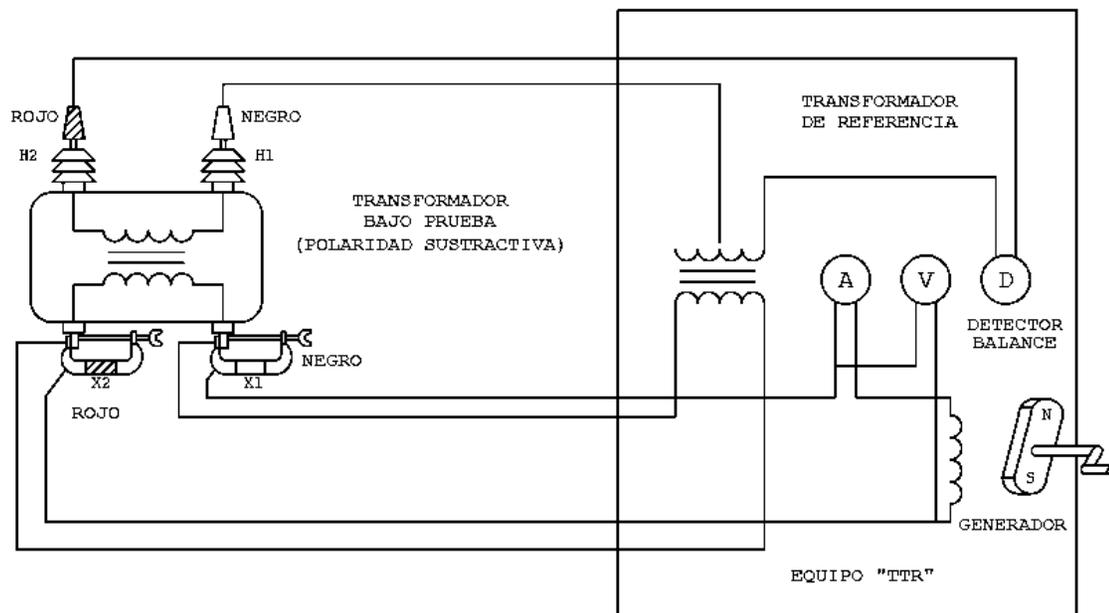
Donde:

%DF, Porcentaje de la diferencia entre la relación teórica y la medida.

RT, Relación teórica.

RM, Relación medida.

Para aplicar la prueba se utiliza un medidor de relación de transformación, que consiste en un transformador de referencia y un generador, para excitar el devanado que se quiere medir, como se muestra en el diagrama de la Figura 3.12.

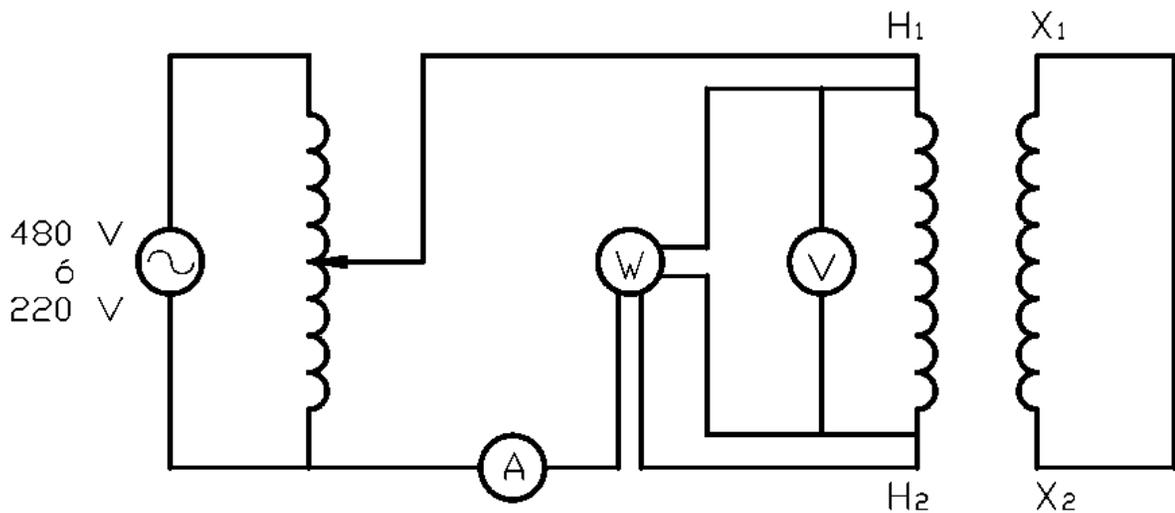


**Figura 3.12** Diagrama de conexión del equipo medidor de Relación de Transformación.

### 3.8 Medición de la Impedancia del Transformador.

La Impedancia de un Transformador, se mide simplemente poniendo en corto circuito un devanado y haciendo circular por el otro la corriente de plena carga. Los valores obtenidos se deben comparar con el dato en placa, cualquier diferencia nos indica un cambio en la geometría de los devanados, el valor límite de esta diferencia no debe exceder el 3%.

Existen dos métodos para aplicar la prueba, estos son el método del Wattmetro-Volmetro-Ampermetro y el de puente de impedancias, en la Figura 3.13, se muestra el diagrama de conexión para la medición de impedancia de un transformador monofásico, utilizando el método del Wattmetro-Volmetro-Ampermetro.



**Figura 3.13** Diagrama de conexión del equipo medidor de Impedancia de transformador monofásico.

Uno de los factores a considerar es que la magnitud de la impedancia depende de la posición del cambiador de derivaciones, esto se debe al cambio en la magnitud de la corriente de carga y al flujo disperso asociado, otros factores a considerar en la medición de la impedancia son los siguientes:

**Diseño:** referido al material, a las dimensiones del conductor, el diseño y arreglo de los devanados, el diseño del blindaje y de la selección de los materiales estructurales.

**Temperatura:** los valores de pérdida de potencia dependen de la temperatura, la componente de pérdidas  $I^2R$  incrementa con la temperatura, mientras que la componente de pérdidas por flujo disperso disminuye.

Se debe tener cuidado en el diagnóstico de los valores medidos, cuando el transformador se encuentre magnetizado, debido a un corto circuito o pruebas de corriente directa, ya que las mediciones pueden resultar afectadas.

### **3.9 Técnicas de diagnóstico.**

Lo que hemos observado es que los transformadores están sometidos a esfuerzos durante su operación. A continuación se indican algunos de estos.

**Esfuerzos Mecánicos:** originados entre conductores, cables de conexión y devanados, debido a sobrecorriente o corriente de falla, generado por corto circuitos del sistema.

**Esfuerzos Térmicos:** debido a sobrecalentamiento puntual, originados por sobrecarga y flujo disperso, se generan cuando se sobrepasan los datos de placa o por mal funcionamiento del sistema de enfriamiento.

**Esfuerzos Dieléctricos:** debidos a sobrevoltaje del sistema, condiciones de impulsos transitorios o resonancias en el interior de los devanados.

Para detectar este tipo de fallas utilizamos los métodos comentados anteriormente con la finalidad de detectar posibles fallas incipientes y monitorear su desarrollo; la Tabla 3.2, muestra las técnicas mas utilizadas.

**Tabla 3.2** Técnicas de diagnóstico utilizadas en transformadores de potencia.

Problema	Técnica de diagnóstico	Condición de servicio del equipo	Estatus de la técnica de diagnóstico	Nivel de eficacia de la técnica de diagnóstico
Mecánico	Corriente de excitación	Fuera de servicio, en sitio	Generalmente aplicado	Medio
	Impulso de bajo voltaje			Bajo
	Análisis de respuesta a la frecuencia			Alto
	Medición de inductancia de dispersión			Medio/Alto
	Medición de Capacitancia			Alto
Térmico	<i>Análisis de gases en el aceite</i>	Equipo en servicio	Generalmente aplicado	--
	Cromatografía de gases			Alto
	Método de hidrógeno equivalente			Medio
	<i>Degradación aceite-papel</i>	Equipo en servicio	Etapa de desarrollo	--
	Cromatografía de líquidos			Medio/Alto
	Análisis de Furanos			Medio/Alto
	<i>Detección de puntos calientes</i>	Equipo en servicio	--	--
	Sensores Invasivos		Etapa de desarrollo	Bajo
Termografía	Generalmente aplicado		Alto	
Dieléctrico	<i>Análisis del aceite</i>	Equipo en servicio	--	--
	Humedad, resistencia eléctrica, resistividad etc.		Generalmente aplicado	Medio
	Relación de transformación	Fuera de servicio, en sitio	Generalmente aplicado	Bajo
	<i>PD Medición</i>	Equipo en servicio	--	--
	Método acústico		Etapa de desarrollo	Medio/Alto
	Método Eléctrico		Etapa de desarrollo	Medio/Alto
	Capacitancia y factor de potencia	Fuera de servicio, en sitio	Generalmente aplicado	Alto
Respuesta dieléctrica a la frecuencia	Generalmente aplicado		Alto	

Como se observó en los diferentes métodos de prueba, existen factores que nos limitan para obtener mediciones confiables, por lo cual es necesario el utilizar varios métodos con la finalidad de realizar un diagnóstico, en el siguiente capítulo se analizarán las ventajas y desventajas de la aplicación del método de Medición de Respuesta a la Frecuencia.

# Capítulo 4

## Medición de Respuesta a la Frecuencia

### 4.1 Antecedentes.

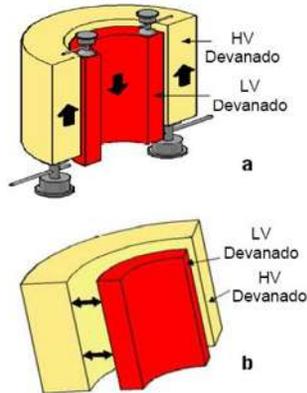
En base a la literatura se tienen registros que desde los 60's se inició con la aplicación del método de prueba de respuesta a la frecuencia mediante impulsos de voltaje de baja magnitud, posteriormente en los 70's se comenzó a utilizar el método de barrido a la frecuencia.

Los dos métodos básicamente hacen uso de las características de los componentes internos del transformador, representados eléctricamente por componentes Resistencia (R), Inductancia (L) y Capacitancia (C), de esta manera se obtiene el comportamiento del circuito del transformador con distintas formas de onda a diferentes frecuencias [GUTIERREZ, 2003].

### 4.2 Fundamentos del método de medición de Respuesta a la Frecuencia en Transformadores de Potencia.

La medición de Respuesta a la Frecuencia ayuda a detectar daños en los equipos de transformación, de manera similar a los otros métodos de pruebas, como la medición de Relación de Transformación, Corriente de Excitación, Factor de Potencia, Capacitancia y Medición de la Impedancia, por tal motivo el método de prueba de la medición de RF, es utilizado en transformadores, autotransformadores y reactores de potencia, para determinar las condiciones del equipo, debido a su exposición a posibles movimientos o deformaciones en los devanados y el núcleo [CFE,2007b].

La Figura 4.1, muestra un ejemplo de los cambios de geometría en los cuales se afecta los valores de capacitancia, derivado de las fuerzas ejercidas en un transformador, durante un evento de falla.



a) Fuerzas axiales entre los devanados de alta y de baja tensión, sujetos a un corto circuito.

b) Fuerzas radiales entre los devanados de alta y de baja tensión, durante una falla externa.

**Figura 4.1** Fuerzas ejercidas en los devanados de un transformador.

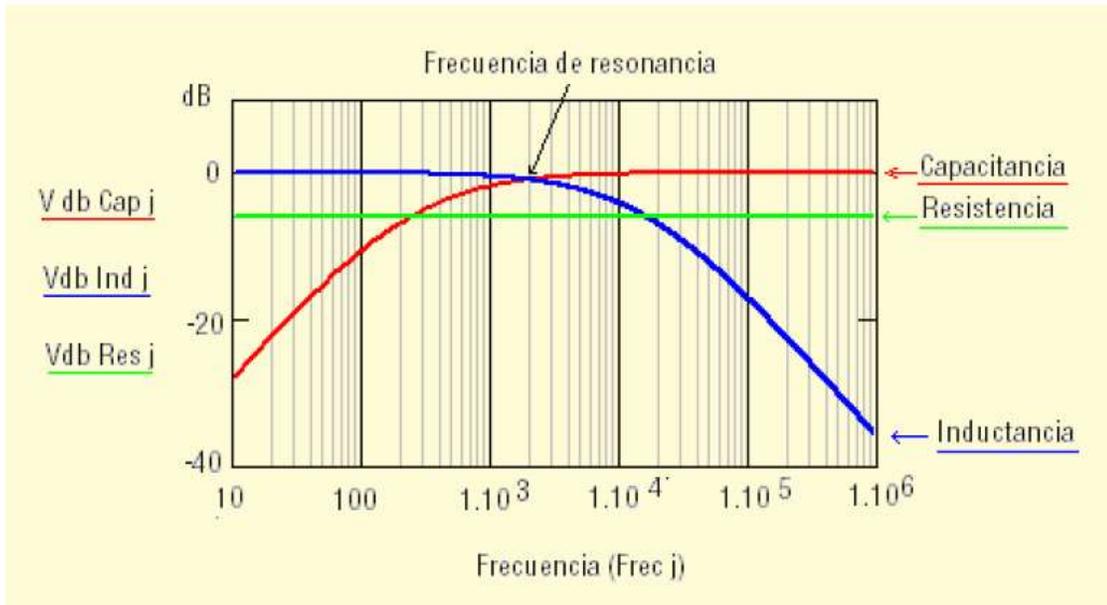
Por lo anterior se recomienda realizar la medición de RF en los casos siguientes:

- En fabrica antes del traslado del equipo y después de la prueba de corto circuito.
- Antes de su puesta en servicio.
- En mantenimiento predictivo.
- Después de eventos de fallas.
- Después de eventos sísmicos.
- En carácter de investigación, para comparación de equipos similares, condiciones de ruido, alta concentración de gases combustibles, etc.

Hemos comentado que existen diferentes métodos para obtener la respuesta en frecuencia de los transformadores y diferentes formas para presentar los resultados; estos varían de acuerdo al equipo de medición utilizado, con la característica de que todos representan la función de transferencia que refleja la característica de la impedancia, derivada de la geometría interna de los devanados del transformador, por ello es confiable su resultado.

Por lo anterior, es recomendable obtener el patrón de comportamiento del equipo, también llamada huella digital del transformador, la cual podrá ser comparada con los resultados de mediciones futuras.

Como se comentó, la medición de RF, se realiza considerando el circuito equivalente del transformador como un circuito RLC, cuyos parámetros varían dependiendo de la frecuencia aplicada, como se muestra en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Comportamiento ideal RLC en el barrido de respuesta a la frecuencia.

Se tiene entonces que la Inductancia **L**, esta relacionada con el número y forma de las espiras que tienen los devanados y el circuito magnético formado por el núcleo.

La Resistencia **R**, esta asociada a la longitud y resistencia del cobre, que puede reflejar problemas de contacto de las terminales del cambiador de derivaciones, de las terminales de conexión de los devanados; y a las pérdidas del aislamiento.

En tanto la Capacitancia **C**, refleja la posición física del devanado y su aislamiento, considerando la capacitancia como la forma y distancias entre devanados, entre capas del devanado, entre espiras y las distancias del tanque al núcleo.

La detección de asimetrías de los espectros obtenidos con respecto a su huella digital, nos indica que los componentes **RLC**, han sufrido modificaciones, esto debido a los cambios en las propiedades dieléctricas y mecánicas, que reflejan modificaciones en el núcleo y devanados.

En el desarrollo del presente trabajo, se ha comentado que para la detección de la deformación de los núcleos o devanados de los transformadores de potencia, se han utilizado con éxito métodos tales como:

1. Medición de Corriente de Excitación.
2. Medición de la Capacitancia.
3. Medición de Impedancia.
4. Medición de Respuesta a la Frecuencia.

Desde el punto de vista de exactitud, estos cuatro métodos se pueden catalogar en orden descendente.

1. Medición de Respuesta a la Frecuencia.
2. Medición de Impedancia.
3. Medición de Corriente de Excitación.
4. Medición de la Capacitancia.

El método de medición de respuesta a la frecuencia, permite una mayor precisión en la detección de un problema en el núcleo o en el devanado.

Sin embargo es necesario resaltar que todos estos métodos no solo son complementarios, si no que proporcionan al personal de campo mayor información para el diagnóstico de los transformadores.

Se concluye que al realizar la medición de Respuesta a la Frecuencia, se puede verificar la existencia de deformaciones de estructuras soporte debido a esfuerzos mecánicos y dieléctricos o combinación de ellos, espiras en corto o devanados desplazados, con mayor precisión, antes de existir una falla franca.

### 4.3 Métodos de medición de Respuesta a la Frecuencia.

En el procedimiento para la medición del RF en transformadores de potencia, indicado en el “Manual de transformadores y reactores de potencia tomo II [Manual CFE, 2007b], se documentan dos métodos para la medición de RF.

- Impulso (LVI).
- Barrido (Sweep).

Adicionalmente existe un método alternativo o de laboratorio, llamado medición directa de la impedancia de cuatro puntos.

En el presente trabajo estudiaremos los métodos de LVI y nos enfocaremos particularmente al barrido de frecuencia.

En la Figura 4.3, se muestra un ejemplo del circuito eléctrico para la medición de RF.

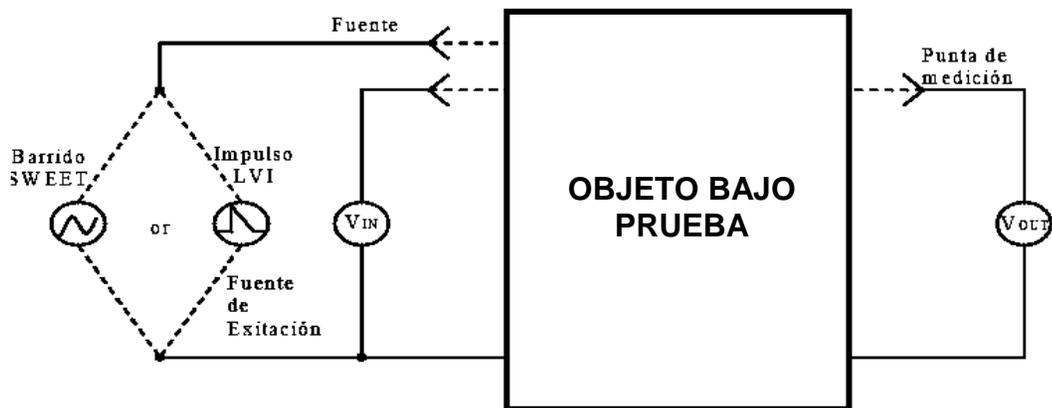


Figura 4.3 Ejemplo de Circuito para medición de Respuesta a la Frecuencia.

### **4.3.1 Método de Impulso a Baja Tensión (LVI).**

Este método está integrado con un generador de impulso y normalizado en un rango de 1.2x50 microsegundos, de 200 a 300 volts, con una impedancia de acoplamiento normalmente de 50 ohms; en la figura 4.3, se muestra el circuito de medición, así el tiempo empleado para una medición es de aproximadamente hasta 60 segundos.

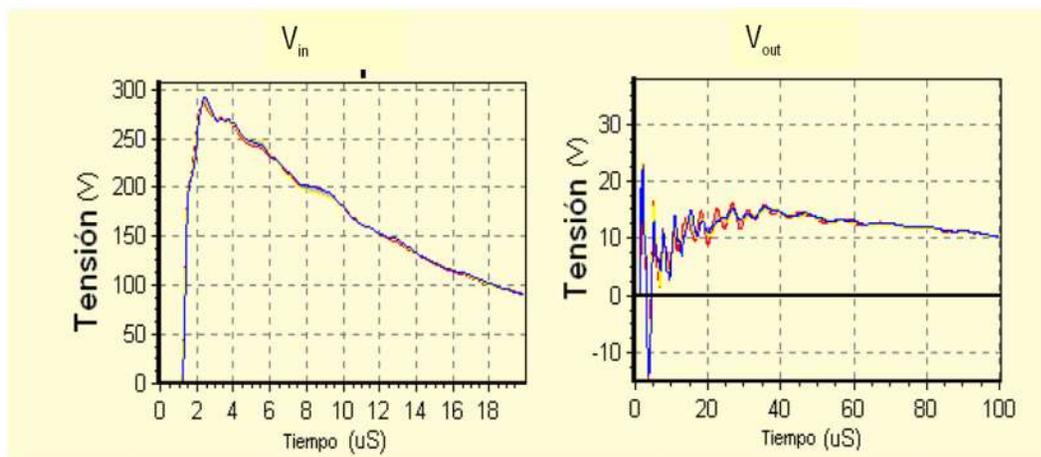
Las ventajas del método impulsivo son:

1. Se pueden medir simultáneamente varias funciones de transferencia.
2. El tiempo de medición es de aproximadamente 1 minuto.

Algunas de las desventajas de este método son:

1. La resolución de la frecuencia es fija y a baja frecuencia es pobre.
2. Difícil filtrar el ruido de banda ancha.
3. La magnitud de la potencia inyectada en cada impulso, es diferente a diferentes frecuencias.
4. Debido a la magnitud de la energía de cada impulso y a las características de atenuación de la malla R, L y C, encontrada en un transformador, esta será más atenuada por las primeras vueltas del devanado donde se inyecta el impulso.
5. Las características del sistema de conexión a tierra del equipo, afectan en gran medida la respuesta.
6. La influencia de los cables para conectar al transformador y al generador.
7. Este método representa problemas de reproducibilidad de los resultados

En la Figura 4.4, se muestran la relación existente entre el impulso de entrada y el de salida y en la Figura 4.5, se tiene un ejemplo de la medición de RF, con el método del impulso.



**Figura 4.4** Relación existente entre el impulso de entrada y el de salida.



**Figura 4.5** Ejemplo de la aplicación del método impulsivo, para obtener la respuesta a la frecuencia a los devanados BT de un transformador trifásico.

### 4.3.2 Método de barrido (Sweep)

En la aplicación del método de barrido, a diferencia del método de impulso a bajo voltaje es que en lugar de usar una onda impulsiva, se aplican tres ondas senoidales a diferentes frecuencias, pero con una magnitud igual de  $-10 V_{pico}$  a  $+10 V_{pico}$  de CA, los valores registrados se grafican en una escala logarítmica desde 10 Hz hasta 2 MHz, considerando la recolección de datos en una sola banda para desplegarlos en forma logarítmica, permitiendo gráficos simétricos, también una mejor resolución a baja frecuencia; con una impedancia de acoplamiento de 50 ohms. La resolución se basa en mediciones que se realizan utilizando una escala logarítmica a intervalos espaciados uniformemente, es decir el espacio entre mediciones sucesivas tienen un porcentaje consistente de 2% o menor, a través del rango de frecuencias. La magnitud de la respuesta es registrada en una escala logarítmica en decibeles (dB), para cada punto medido, como se representa en la Ecuación (4.1), la exactitud esta en 1 dB, en cada punto medido, utilizando equipo medido.

$$\text{Magnitud (dB)}=20 \log_{10} (V_o / V_i) \quad (4.1)$$

El rango de barrido es definido por la prueba inicial de los fabricantes en planta, para determinar la huella del equipo.

Las ventajas del barrido de frecuencia son:

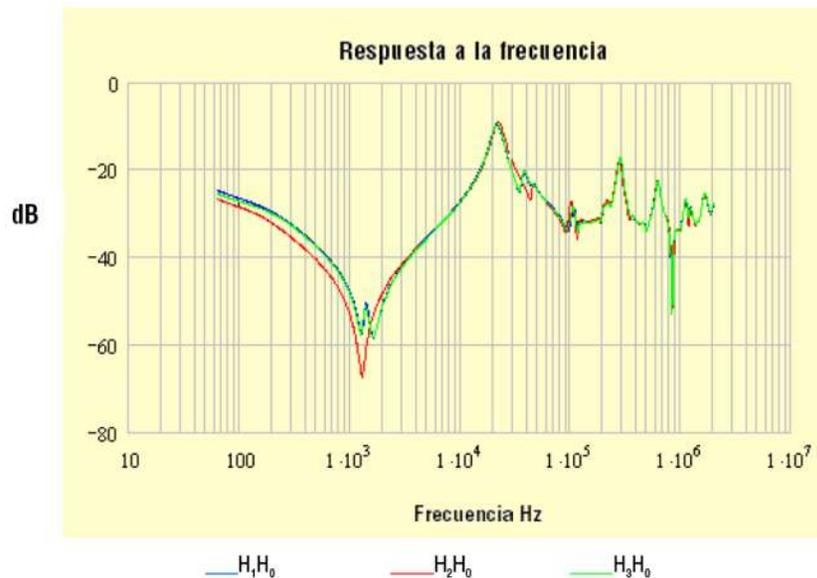
1. Es reproducible la respuesta característica de equipo bajo prueba.
2. Relación de señal a ruido muy alta, es decir utiliza la función de filtro del instrumento de prueba, para remover el ruido de banda ancha.
3. Se requiere solamente un componente de medición.

Las desventajas del barrido de frecuencia son:

1. Solamente se puede realizar una medición al mismo tiempo.
2. El tiempo de hacer una medición es de 3 a 4 minutos.

En la Figura 4.6, se muestra un ejemplo de una gráfica de barrido de frecuencia a un transformador.

Para el presente trabajo se utilizará el método de barrido de frecuencia, por sus características, además del bajo grado de dificultad de la prueba, la cual fácilmente podrá ser realizada por personal técnico; enseguida observaremos las condiciones y preparativos de prueba.



**Figura 4.6** Ejemplo de barrido de respuesta a la frecuencia a los devanados, de alta tensión de un transformador trifásico

#### 4.4 Características del equipo de prueba para la medición de RF.

Para la aplicación del método de RF en el presente reporte se ha usado el equipo de prueba de marca DOBLE, modelo SFRA M5100, este equipo mide y registra la Respuesta a la Frecuencia de los devanados, a través de sus tres componentes empacados en un solo equipo, [DOBLE 2000], utilizando una alimentación de 125 VCA, a 60 Hz:

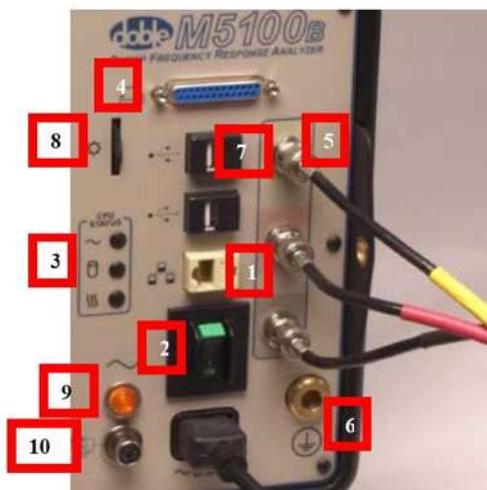
1. Controlador CPU.
2. Fuente de excitación capaz de proveer un voltaje pico a pico consistente y controlado en todo el rango de frecuencia.

3. Modulo de medición el cual mide la señal con respecto a tierra del equipo de prueba.

En la Figura 4.7, se muestra de manera general el equipo de prueba, de igual manera en la Figura 4.8, se ilustran los indicadores, puertos y conexiones disponibles para la aplicación de lo prueba.



**Figura 4.7** Equipo de prueba utilizado para el barrido de respuesta a la frecuencia a los devanados de un transformador.



- 1 Puerto de red.
- 2 Interruptor.
- 3 LEDs de estado del CPU.
- 4 Puertos de impresora externa.
- 5 Terminal de prueba.
- 6 Tierra.
- 7 Puertos de USB.
- 8 Control de intensidad.
- 9 Indicador de alimentación.
- 10 Teclado.

**Figura 4.8** Indicadores y puertos del equipo de prueba utilizados para el barrido de RF.

Los cables de prueba son construidos de cable coaxial, de baja pérdida con las pantallas aterrizadas al chasis del instrumento, mediante conectores estándar. Para la medición el equipo de prueba requiere de cable de señal de impedancia igualada, es decir la señal es medida con respecto a tierra del instrumento, la pantalla del cable de medición es conectada al chasis utilizando una impedancia de igualación de 50 ohmios; los cables de prueba deben tener una longitud máxima de 18 metros, esto es determinante en los parámetros de las impedancias de acoplamiento y la máxima frecuencia efectiva del equipo de prueba[DOBLE,2000],.

Es importante el verificar la correcta conexión al sistema de tierras del transformador, con las pantallas de los cables a una placa o terminal referida al sistema, así como del chasis del equipo de prueba, mediante el cable para tal fin, tal como se muestra en la Figura 4.9



**Figura 4.9** Sistema de referencia a la red de tierra del equipo de prueba utilizado para la medición de RF.

El equipo cuenta con una pantalla donde se muestran las gráficas de respuestas de las mediciones realizadas y se tiene el control de las mediciones a realizar, se etiqueta las pruebas y puede realizarse un análisis de las gráficas detalladamente, como se muestra en la Figura 4.10.

En la Figura 4.11, se muestra la pantalla donde se identifica el equipo y el archivo que se generara con los datos obtenidos de las mediciones, para la referencia de las mediciones futuras.

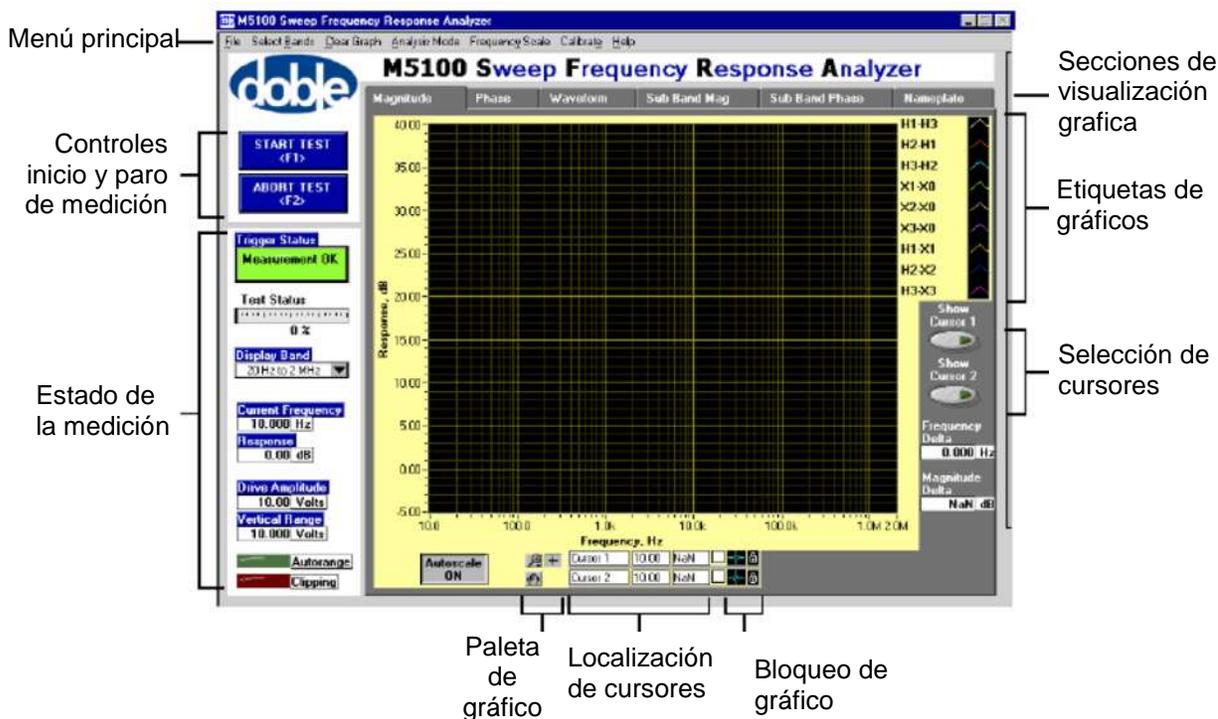


Figura 4.10 Pantalla principal del equipo de prueba utilizado para la medición de RF.

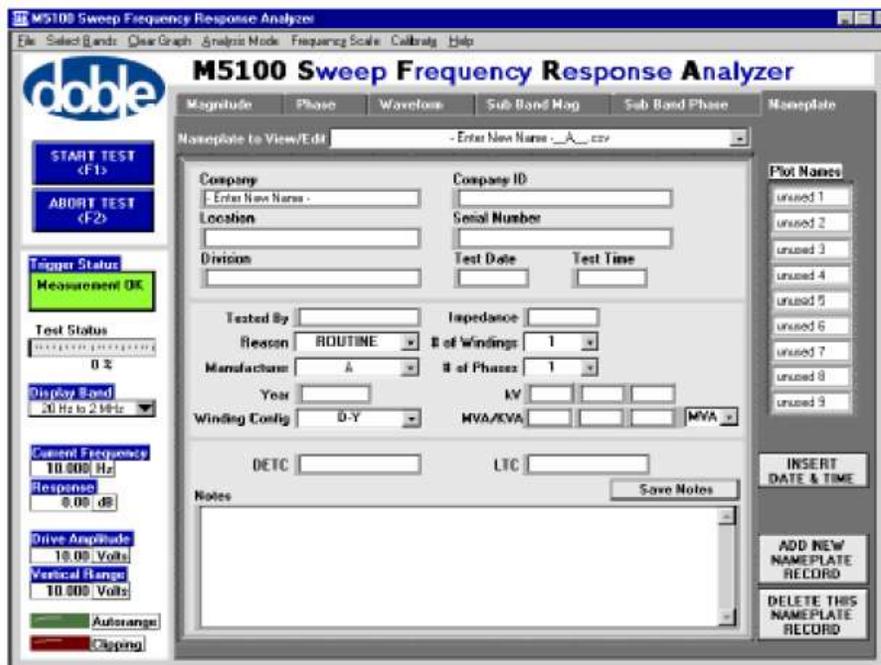


Figura 4.11 Pantalla para registro de características del equipo a probar utilizando la medición de RF.

## 4.5 Procedimientos de prueba para la medición de Respuesta a la Frecuencia.

Es recomendable que si se cuenta con una medición realizada en planta por el fabricante de los equipos, debemos considerar el tipo de conexión ya establecido, con la finalidad de obtener gráficas que cumplan el requisito de repetitividad, para ello es necesario tomar en cuenta durante las mediciones lo siguiente:

1. La medición debe ser en el rango de frecuencias de 10 Hz a 2 MHz.
2. Tener el cuidado de referir correctamente el equipo a la red del sistema.
3. El transformador bajo prueba debe estar totalmente desconectado y aislado del sistema de potencia antes de realizar cualquier prueba del RF.
4. El equipo de medición debe calibrarse antes de realizar la medición, siendo recomendable en el caso de existir alguna medición de referencia realizar las mismas conexiones de prueba, para que los resultados puedan ser comparables.
5. Durante el desarrollo de la prueba, **nunca se debe desconectar las terminales** del equipo de medición, ya que provocaría un daño al generador del equipo de medición.

En las Tablas 4.1 y 4.2, se muestran ejemplos de las conexiones normalmente usadas en las pruebas a transformadores monofásicos y trifásicos.

**Tabla 4.1** Conexiones sugeridas de prueba para transformadores monofásicos.

Fasorial	Medición	Fase	Puntos de Conexión			Cto. Circ.
			Fuente	Referencia	Medición	
	Alta Tensión	$(H1-H0)$	H0	H1	$x2 \ x1$	
	Baja Tensión	$(x2-x1)$	x1	x2	H0 H1	
	Alta Tensión	$(H1-H0)$	H0	H1	$x1 \ x0$	
	Baja Tensión	$(x1-x0)$	x0	x1	H1 H0	
	Terciario	$(Y2-Y1)$	Y1	Y2	H1 H0	
	Alta Tensión	$(H1-H0)$	H0	H1	$x1 \ x0$	
	Baja Tensión	$(x1-x0)$	x0	x1	H1 H0	
	Terciario	$(Y2-Y1)$	Y1	Y2	H1 H0	
	Alta Tensión	$(H1-H0)$	H0	H1	-	

**Tabla 4.2** Conexiones sugeridas de prueba para transformadores trifásicos.

Fasorial	Identificación	Medición	Fase	Puntos de Conexión			Cto. Circ.
				Fuente	Referencia	Medición	
		Alta Tensión	A (H1-H2)	H2	H1	x2 x0	
			B (H2-H3)	H3	H2	x3 x0	
			C (H3-H1)	H1	H3	x1 x0	
		Baja Tensión	a (x2-x0)	x0	X2	H1 H2	
			b (x3-x0)	x0	x3	H2 H3	
			c (x1-x0)	x0	x1	H1 H3	
		Alta Tensión	A (H1-H0)	H1	H0	x1 x2	
			B (H2-H0)	H2	H0	x2 x3	
			C (H3-H0)	H3	H0	x1 x3	
		Baja Tensión	a (x1-x2)	x1	x2	H1 H0	
			b (x2-x3)	x2	x3	H2 H0	
			c (x3-x1)	x3	x1	H3 H0	
		Alta Tensión	A (H1-H0)	H1	H0	x1 x0	
			B (H2-H0)	H2	H0	x2 x0	
			C (H3-H0)	H3	H0	x3 x0	
		Baja Tensión	a (x1-x0)	x1	x0	H1 H0	
			b (x2-x0)	x2	x0	H2 H0	
			c (x3-x0)	x3	x0	H3 H0	
		Terciario	a (Y1-Y2)	Y1	Y2	H1 H0	
			b (Y2-Y3)	Y2	Y3	H2 H0	
			c (Y3-Y1)	Y3	Y1	H3 H0	
		Alta Tensión	A (H1-H0)	H1	H0	x1 x0	
			B (H2-H0)	H2	H0	x2 x0	
			C (H3-H0)	H3	H0	x3 x0	
		Baja Tensión	a (x1-x0)	x1	x0	H1 H0	
			b (x2-x0)	x2	x0	H2 H0	
			c (x3-x0)	x3	x0	H3 H0	
Terciario	a (Y1-Y2)	Y1	Y2	H1 H0			
	b (Y2-Y3)	Y2	Y3	H2 H0			
	c (Y3-Y1)	Y3	Y1	H3 H0			

En base a las características de construcción es posible comparar un transformador con otro, con valores de impedancia similares y que sea del mismo fabricante y tipo de construcción.

En la Tabla 4.3, muestran las posibles causas detectadas durante la medición de RF.

Sin embargo para emitir un diagnóstico asertivo, es necesario contar con la huella de equipo, la cual debe ser repetitiva los años que se encuentre en operación el equipo.

En el caso de no contar con la huella de dicho equipo, el diagnóstico de la prueba se pondera de acuerdo con el rango de frecuencias donde se presentan las variaciones, para determinar las acciones a seguir.

**Tabla 4.3** Diagnóstico de acuerdo con la variación de los espectros.

Rango de frecuencia	20 Hz-1 kHz	1 KHz-10 kHz	10 kHz-100 kHz	100 kHz-1 MHz	Mayor a 1 MHz
Sensibilidad	Sensibilidad baja	Sensibilidad	Poco sensible	Sensible	Muy sensible
Detecta	Núcleo Bobinas	Devanado Capacitancia	Capacitancia entre espiras	Sensible a Pequeños cambios en la geometría	Muy sensible a variaciones geométricas
	Posible magnetización	Primer resonancia	(Verificación significativa)		(Capacitivo, dieléctrico)
Tomar acción	Programar nueva prueba	Determinante tomar acción	Verificación	Seguimiento	Terminales, puntas Seguimiento a menos que sea muy significativo

*Nota: Esta tabla de diagnóstico está elaborada con las primeras experiencias obtenidas y deberá ser enriquecida por el personal de campo de acuerdo con las nuevas experiencias y diagnósticos que se generen al realizar esta medición*

#### 4.6 Medición de RF en transformadores de potencia trifásico de dos devanados.

Las mediciones realizadas a los transformadores de potencia trifásicos de dos devanados, son la referencia de los equipos; en la Tabla 4.4, se indican las características de operación de dichos equipos y en la Tabla 4.5, se indican las conexiones realizadas para la medición de la respuesta a la frecuencia.

Estas mediciones se realizaron después del disparo de los bancos por operación de protección diferencial 87T, se observaron respuestas normales y se realizaron comparaciones entre las gráficas de los dos bancos.

**Tabla 4.4** Características de equipos a diagnosticar usando el método de RF.

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.	
SUBESTACION: ALAMOS	
BANCO: ALS T2 y T3	
MARCA: PROLEC	
TIPO: COLUMNA	
CAPACIDAD: 60 MVA	
TIPO DE ENFRIAMIENTO: OA/FA1/FA2	
VOLTAJE: 230 / 23 KV	
AÑO DE FABRICACION: 1995	
SERIE	IMPEDANCIA
PZ-66-01	16.6
PZ-66-02	16.79

**Tabla 4.5** Conexiones realizadas para la medición de la Respuesta a la Frecuencia.

<b>PRUEBA</b>	<b>TERMINALES EN C.C.</b>	<b>TERMINALES C.O.</b>
H1H2CA	NINGUNA	X1, X2, X3, X0
H2H3CA	NINGUNA	X1, X2, X3, X0
H3H1CA	NINGUNA	X1, X2, X3, X0
H1H2CX1X0	X1-X0	X2, X3
H2H3CX2X0	X2-X0	X3, X1
H3H1CX3X0	X3-X0	X1, X2
H1H2CX1X0H3	X1-X0, H2-H3	X2, X3
H2H3CX2X0H1	X2-X0, H1-H2	X3, X1
H3H1CX3X0H2	X3-X0, H2-H3	X1, X2
C1H1	NINGUNA	H2, H3, X1, X2, X3
C1H2	NINGUNA	H1, H3, X1, X2, X3
C1H3	NINGUNA	H1, H2, X1, X2, X3
X1X0	NINGUNA	H1, H2, H3, X2, X3
X2X0	NINGUNA	H1, H2, H3, X1, X3
X3X0	NINGUNA	H1, H2, H3, X1, X2

**Gráfica de respuesta a la frecuencia, de los devanados del equipo identificado con la clave ALS T3, serie PZ-66-02.**

Mediciones realizadas a los devanados de alta tensión del banco ALS T3. La Figura 4.12, muestra los resultados, en las respuestas de los devanados, en su parte inductiva y capacitiva.

Se obtuvo la respuesta característica esperada en las fases A y C, así como el desplazamiento inicial de la respuesta en la fase B, derivado de la configuración de la configuración de la “conexión en Delta” del devanado de Alta.

Por lo anterior no se observan modificaciones en la geometría, ni cambio en las impedancias de los devanados, concluyendo que está en condiciones normales de operación.

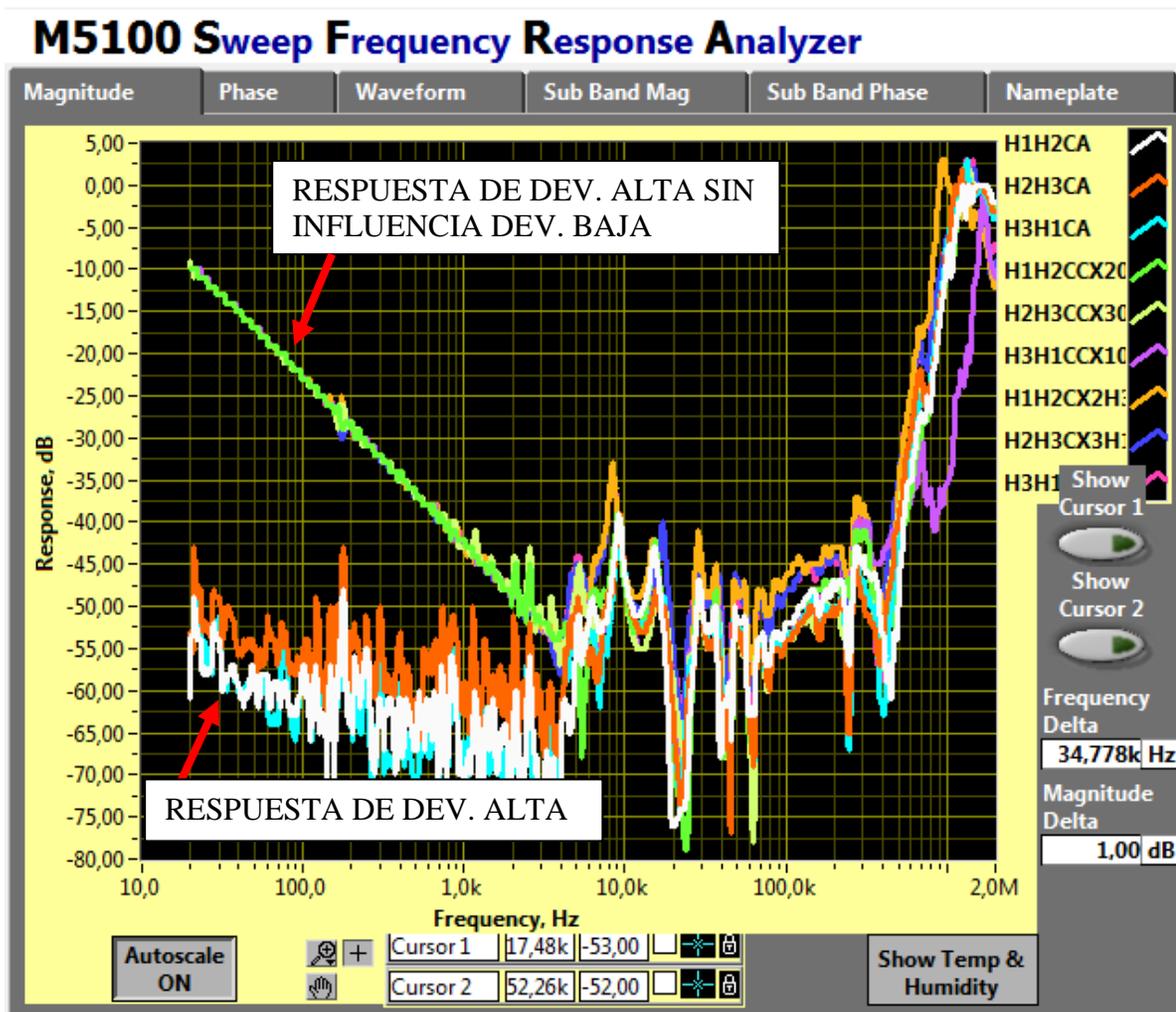
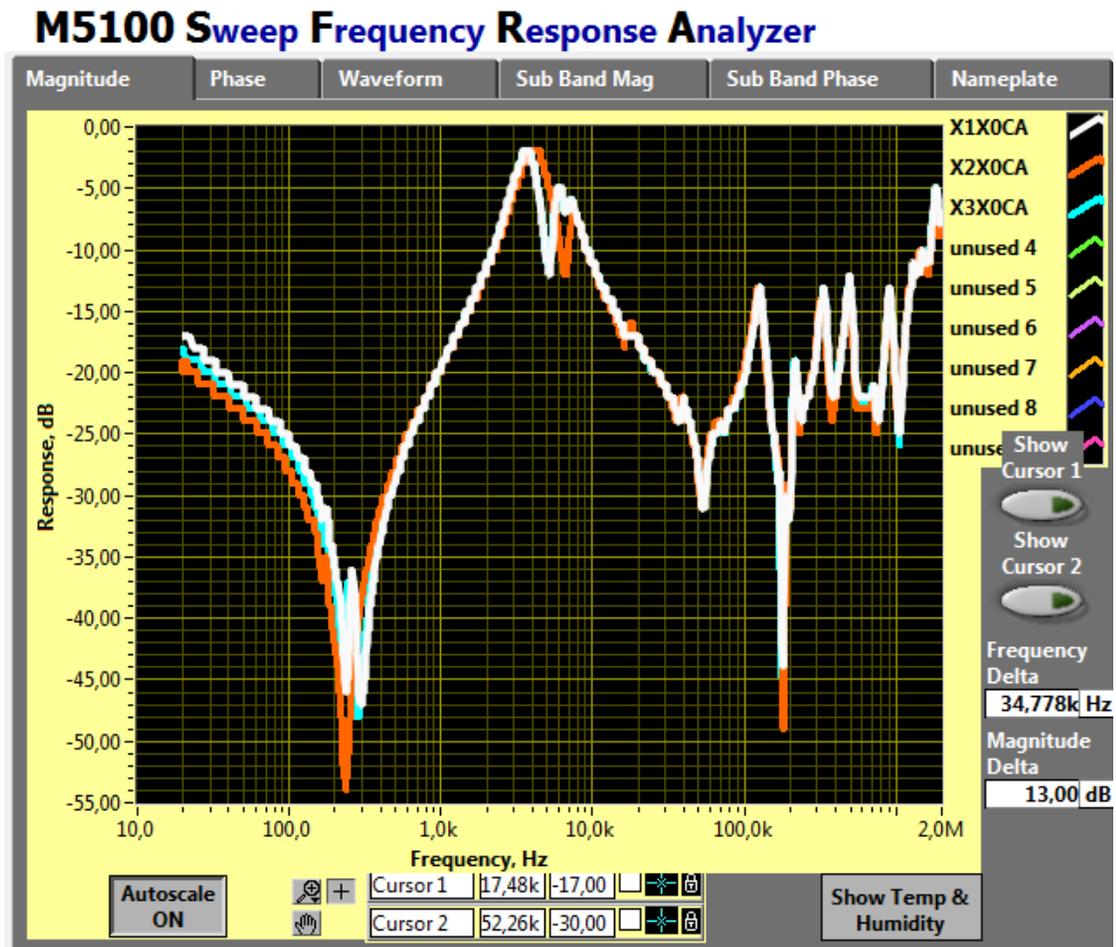


Figura 4.12 Medición de la Respuesta a la Frecuencia devanados de alta tensión.

**Gráfica de respuesta a la frecuencia de los devanados de baja tensión del equipo ALS T3, serie: PZ-66-02.**

Medición realizada a los devanados de baja tensión del banco ALS T3. En la Figura 4.13 se observan los resultados de la medición de Respuesta a la Frecuencia en los devanados de baja tensión, los cuales tienen la configuración de la “conexión en estrella” con la respuesta característica esperada, sin resonancias significativas que presuman cambios en la geometría o impedancias de los devanados.



**Figura 4.13** Medición de la Respuesta a la Frecuencia en devanados de baja tensión.

### Gráfica de comparación de respuestas de los devanados de alta tensión de los equipos ALS T2 Y ALS T3.

La comparación de las mediciones realizadas a los devanados de alta tensión de los bancos ALS T2 y ALS T3, sin la influencia de los devanados de baja tensión, se muestran en la Figura 4.14, donde se observaron respuestas normales, sin resonancias significativas.

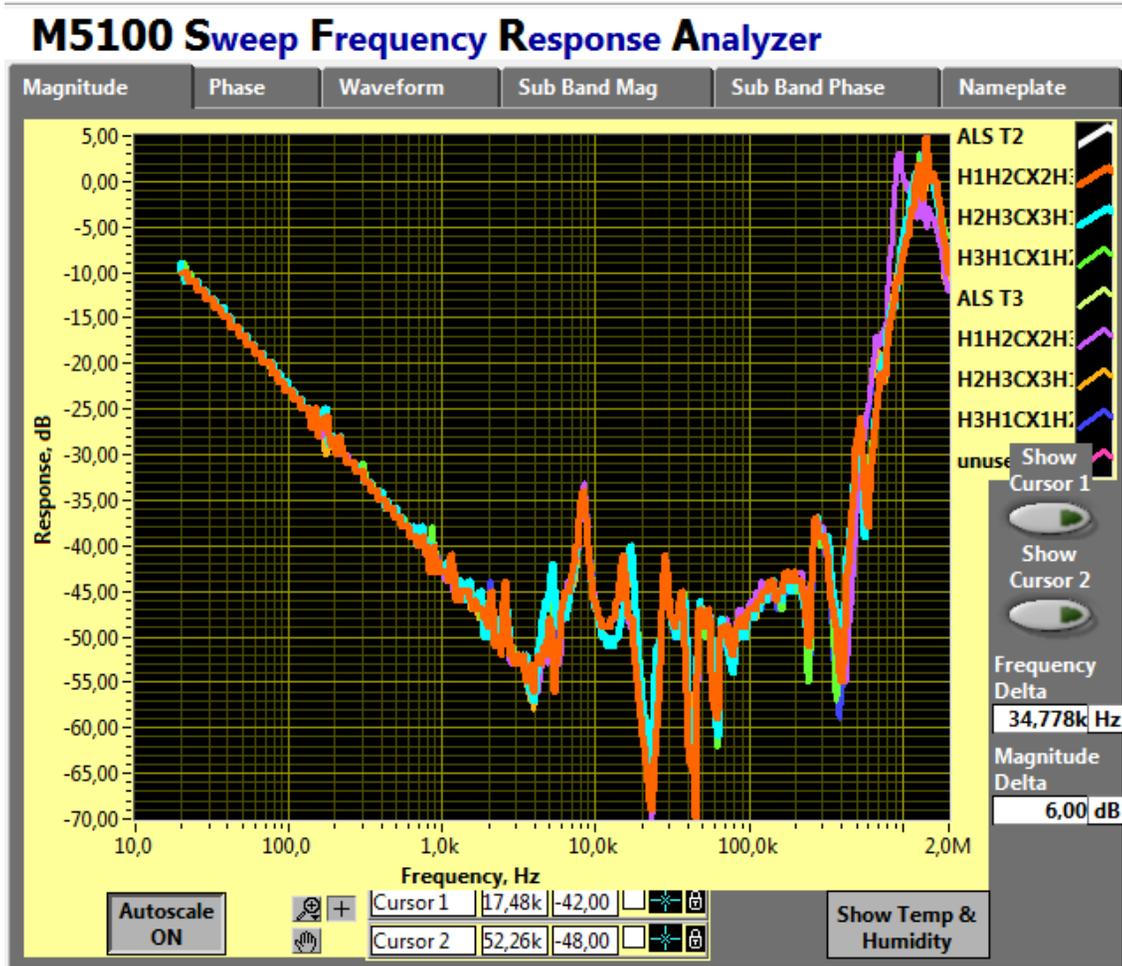


Figura 4.14 Comparación de la Respuesta a la Frecuencia en los devanados de alta tensión.

**Gráfica de comparación de respuestas de los devanados de baja tensión de los equipos ALS T2 Y ALS T3.**

La comparación de las mediciones realizadas a los devanados de baja tensión de los bancos ALS T2 y ALS T3, se muestran en la Figura 4.15, donde se observan las respuestas normales, sin resonancias significativas.

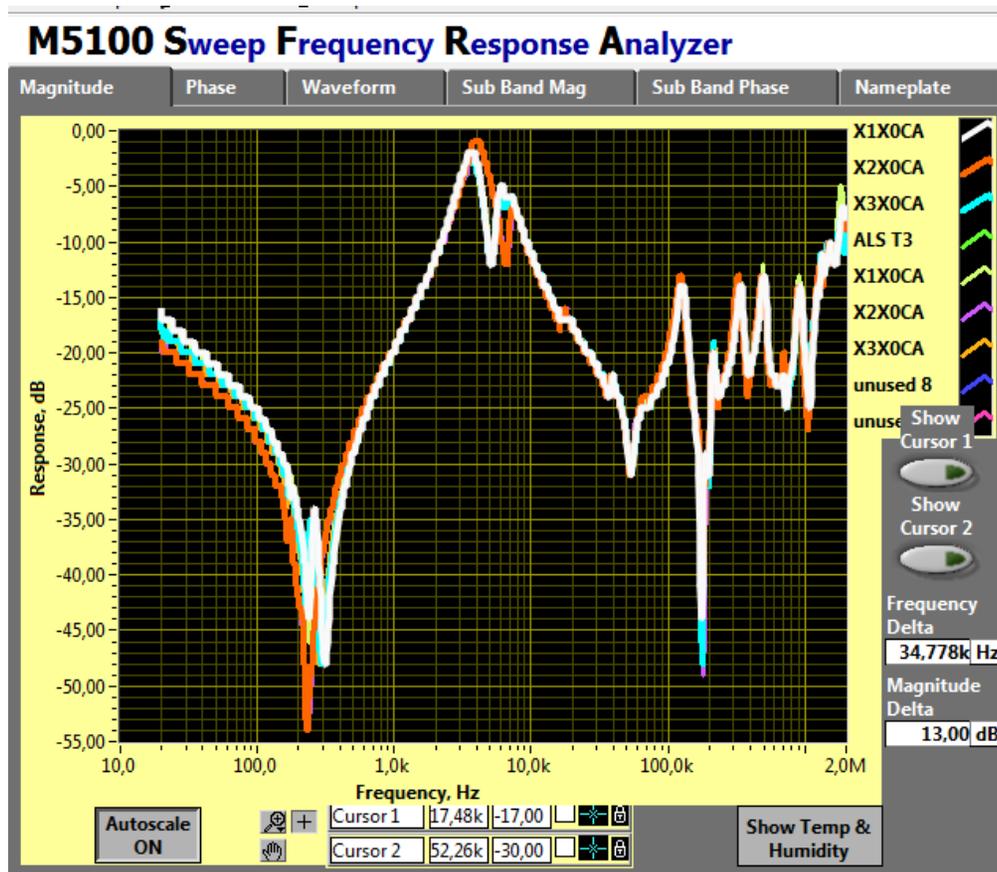


Figura 4.15 Comparación de la Respuesta a la Frecuencia en los devanados de baja tensión.

### Conclusiones:

De los resultados obtenidos se observaron gráficas normales sin resonancias significativas, en los devanados de alta tensión y baja tensión, sin observar cambio de impedancia, o en su respuesta “capacitiva” se observan respuestas características iguales y comparables en las mediciones realizadas entre los dos equipos.

Por lo anterior y después de realizar la comparación de las pruebas de resistencia óhmica y corriente de excitación, se observaron condiciones normales de operación en ambos equipos, se sugiere una vez energizado un monitoreo con el análisis cromatografico del aceite, para verificar las condiciones de operación.

## 4.7 Medición de RF en transformadores de potencia monofásicos de tres devanados.

Las siguientes mediciones realizadas al banco de transformadores monofásicos son la referencia de los equipos, en la Tabla 4.6, se indican las características de los equipos instalados en el banco ATN T5.

En la Tabla 4.7, se indican las conexiones realizadas para la medición de la respuesta a la frecuencia en los equipos, estas se realizaron posterior al disparo del banco por operación de protección de sobre voltaje de rama (59) del CEV.

Se observaron gráficas con respuesta normal, se realizaron comparaciones entre las gráficas de las tres fases.

**Tabla 4.6** Características de equipos del banco ATN T5 a diagnosticar con el barrido de frecuencia.

<b>CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.</b>	
<b>SUBESTACION:</b> ACATLAN POTENCIA.	
<b>BANCO:</b> ATN T5	
<b>MARCA:</b> ASEA	
<b>TIPO:</b> COLUMNA.	
<b>CAPACIDAD:</b> 33.33/66.66 MVA.	
<b>TIPO DE ENFRIAMIENTO:</b> OA/FOA.	
<b>VOLTAJE:</b> 400 /16.66 KV.	
<b>AÑO DE FABRICACION:</b> 1981.	
SERIE	IMPEDANCIA
7240177	14.2
7240178	14.5
7240179	14.3

**Tabla 4.7** Conexiones realizadas en los equipos del banco ATN T5 a diagnosticar usando el barrido de frecuencia.

<b>PRUEBA</b>	<b>TERMINALES EN C.C.</b>	<b>TERMINALES C.O.</b>
H1H2CA	NINGUNA	X1, X2, Y1, Y2
H1H2CX	X1, X2	Y1, Y2
H1H2CY	Y1, Y2	X1, X2
H1H2CXY	X1-X2, Y1-Y2	NINGUNA
X1X2CY	Y1, Y2	X1, X2
Y1Y2CX	X1, X2	Y1, Y2
C1H1	NINGUNA	H2, X1, X2, Y1, Y2
C1H2	NINGUNA	H1, X1, X2, Y1, Y2
C1X1	NINGUNA	H1, H2, X2, Y1, Y2
C1X2	NINGUNA	H1,H2, X1, Y1, Y2
C1Y1	NINGUNA	H1, H2, X1, X2, Y2
C1Y2	NINGUNA	H1, H2, X1, X2, Y1

### Gráficas de respuesta de los devanados del equipo ATN T5, serie: 7240177.

En la Figura 4.16, se muestran los resultados obtenidos en la medición de la fase A del banco ATN T5.

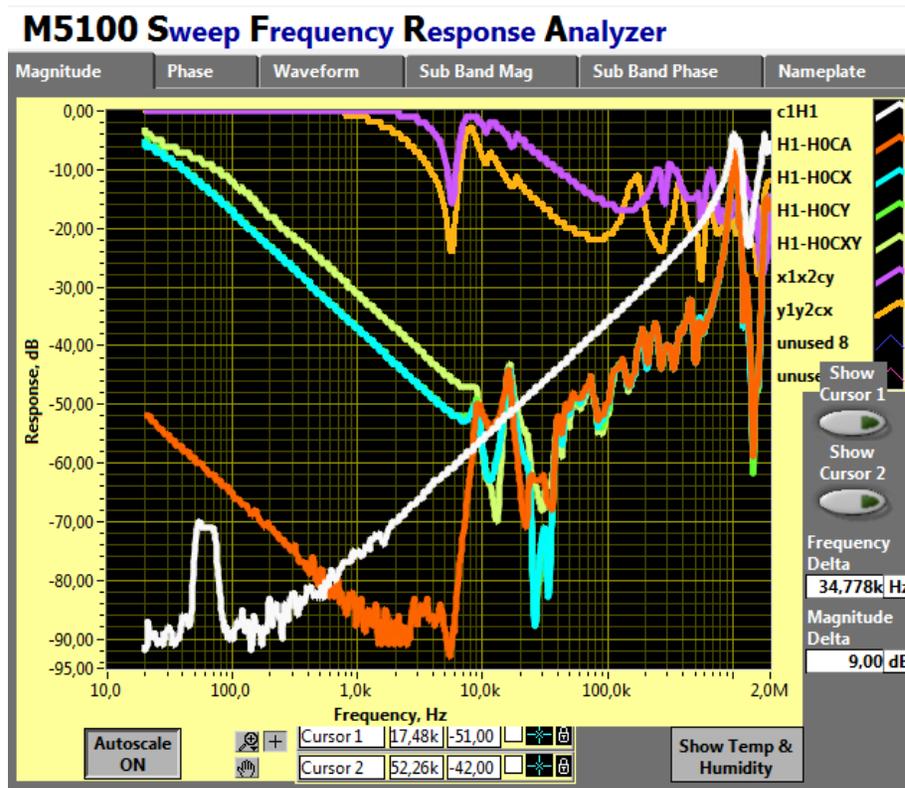
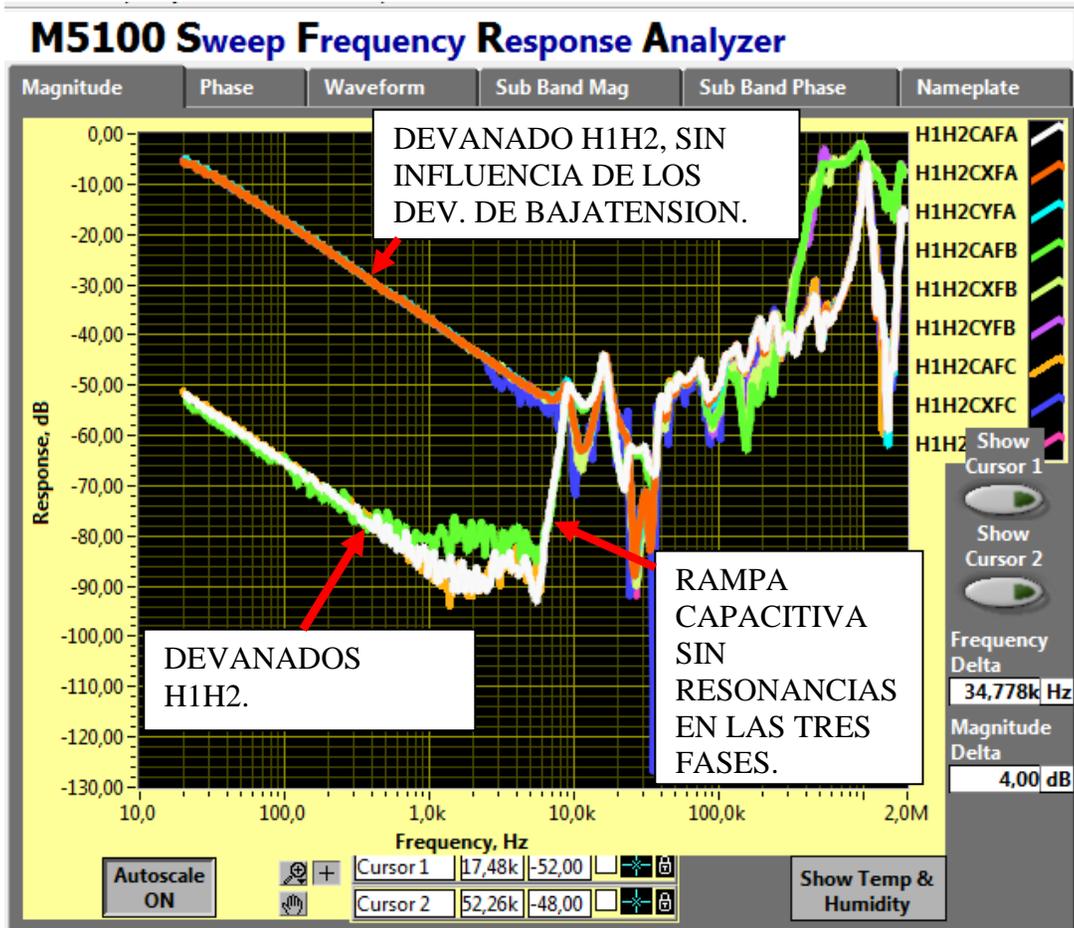


Figura 4.16 Resultados de Respuesta a la Frecuencia en el equipo del banco ATN T5, fase A.

### Gráficas de comparación de los devanados H1-H2, de los equipos instalados en el banco ATN T5, series: 7240177, 7240178, 7240179.

En la Figura 4.17, se muestra la comparación de las respuestas de los devanados de alta tensión, se observa la similitud de las respuestas características, así como también sin la influencia de los devanados de baja tensión.

Se observa un magnetismo residual en la respuesta del devanado de alta tensión de la fase B, sin observar cambio de impedancia, sin embargo su respuesta capacitiva es repetible con las otras dos fases, es mismo efecto se puede observar en las respuestas de las mediciones H1H2CXFB Y H1H2CXFC

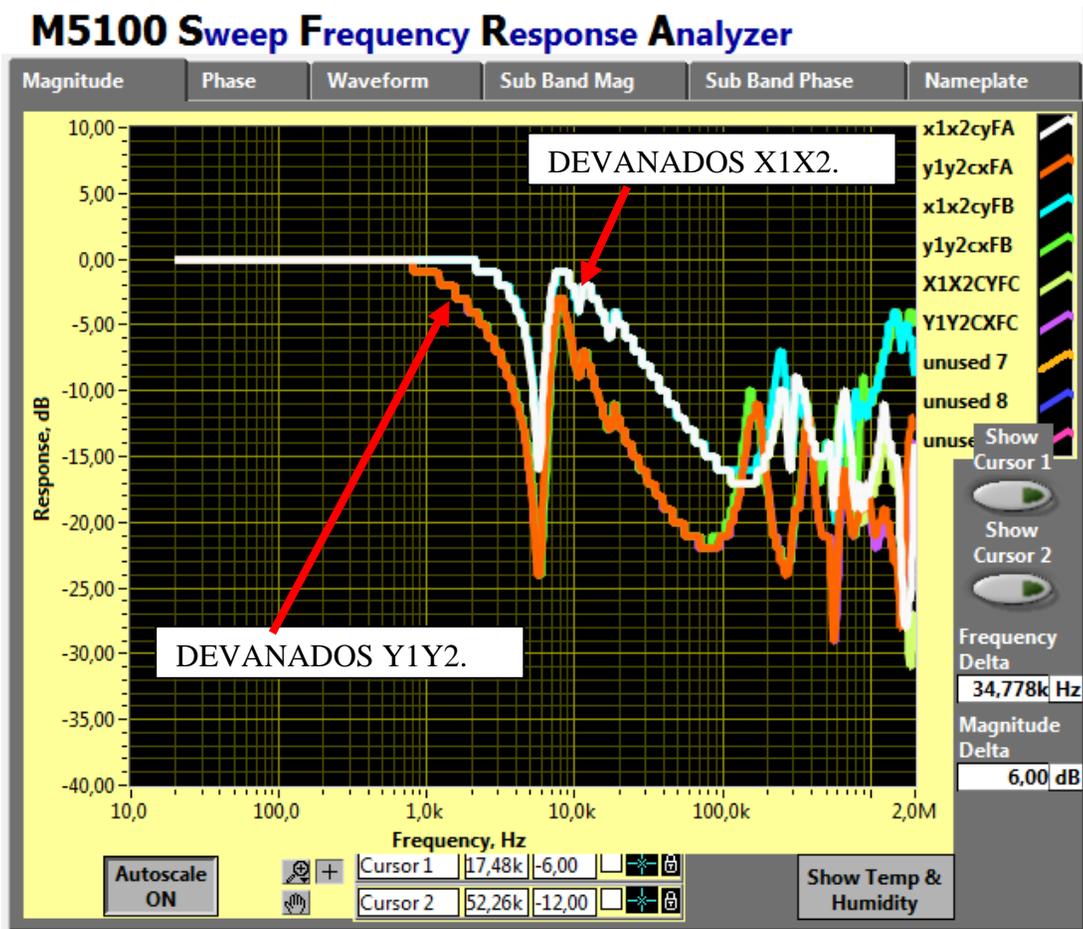


**Figura 4.17** Resultados de la comparación en sus devanados de alta tensión de las tres fases del banco ATN T5.

**Gráficas de comparación de los devanados “X1-X2” Y “Y1-Y2” de los equipos serie: 7240177, 7240178, 7240179.**

En la Figura 4.18, se observa la repetitividad de las respuestas para los devanados de baja tensión.

En las respuestas se observa que los devanados “X1-X2”, tienen una respuesta distinta a los devanados “Y1-Y2”, las cuales son similares en sus respuestas características respectivamente, es decir todos devanados de “X”, pueden ser comparables entre si, pero no con los devanados “Y”.



**Figura 4.18** Resultados de la comparación en sus devanados de baja tensión de las tres fases del banco ATN T5.

### Conclusiones:

De los resultados obtenidos se observaron respuestas de frecuencia normales sin resonancias significativas, en los devanados de alta tensión, con excepción de efecto del magnetismo residual que afecta la respuesta de la fase “B”, sin observar cambio de impedancia, sin embargo su respuesta “capacitiva” son similares e igual en sus respuestas características, ya que al compararlas con las otras dos fases, ese mismo efecto del magnetismo, se puede observar en las respuestas de las mediciones H1H2CXFB Y H1H2CXFC.

En las respuestas de los devanados de baja tensión, se observa que los devanados “X1-X2”, tienen una respuesta distinta a los devanados “Y1-Y2”, las cuales son similares en sus respuestas características, respectivamente, es decir todos devanados de “X”, pueden ser comparables entre si, pero no con los devanados “Y”.

#### 4.8 Medición de RF en reactores de potencia monofásicos.

Las pruebas realizadas a los siguientes reactores son la referencia de los equipos cuyos parámetros se muestran en la Tabla 4.8, se indican las características de los equipos, el reactor identificado con el No. de serie G1543-01 fue reparado por el fabricante PROLEC, el reactor No. de serie G1161-02 es un equipo nuevo de la misma marca.

**Tabla 4.8** Características de equipos del banco PIT R1 a diagnosticar con barrido de frecuencia.

<b>CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.</b>	
<b>SUBESTACION:</b> PITIRERA.	
<b>BANCO:</b> REACTOR MONOFASICO R1 FASE “A” Y FASE “B”.	
<b>MARCA:</b> PROLEC.	
<b>CAPACIDAD:</b> 25 MVAR.	
<b>TIPO DE ENFRIAMIENTO:</b> OA.	
<b>VOLTAJE:</b> 400 KV.	
<b>AÑO DE FABRICACION:</b> MARZO 2007.	
<b>SERIE</b>	<b>REACTANCIA LINEAL (MEDIDA)</b>
G1543-01	2126.8 OHMS
G1161-02	2122.3 OHMS

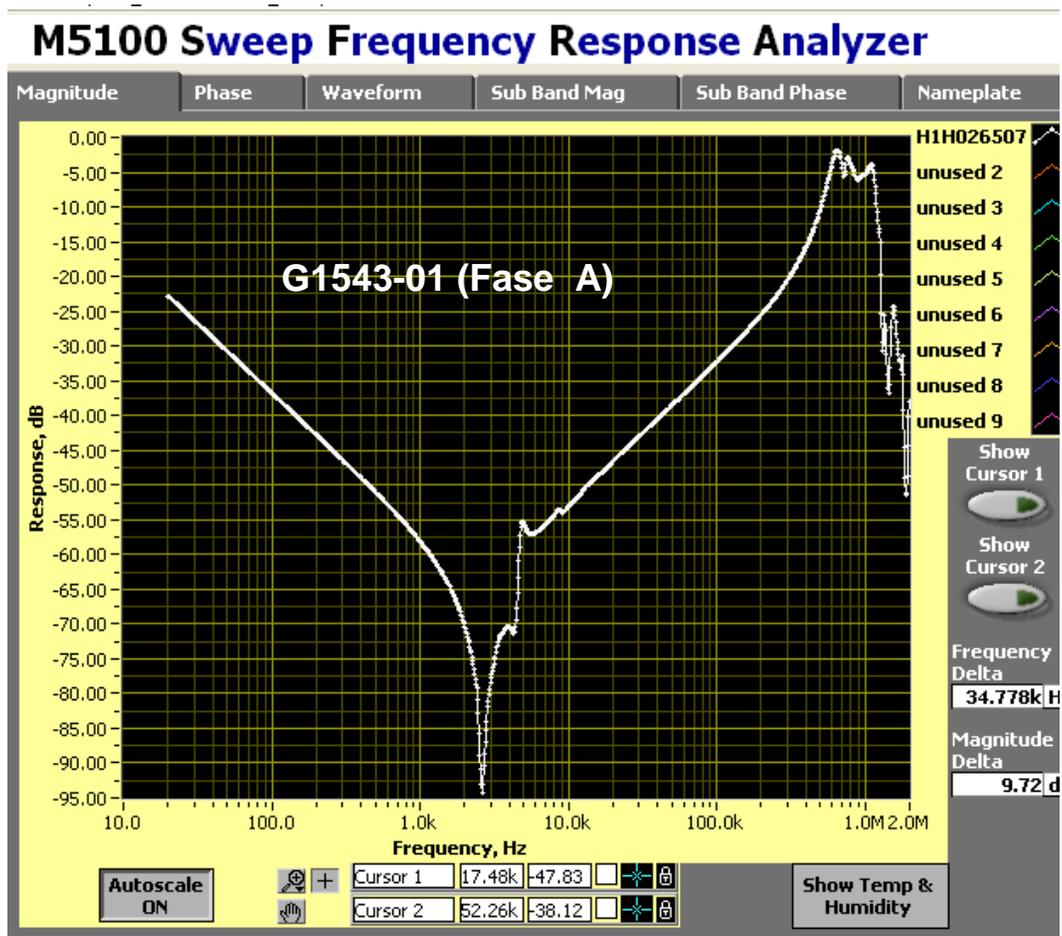
En la Tabla 4.9 se indica la conexión realizada al equipo para la medición de la respuesta a la frecuencia en los reactores instalados en el banco PIT R1.

**Tabla 4.9** Conexiones realizadas en equipos del banco PIT R1 para el barrido de frecuencia.

MEDICION	TERMINALES EN C.C.	TERMINALES C.O.
H1 – H0	-----	-----

**Gráfica de resultados de prueba a equipo serie: G1543-01.**

En la Figura 4.19, se obtienen la respuesta de las mediciones realizadas en sitio, después de la reparación por falla entre espiras del equipo, para referencia de pruebas posteriores.



**Figura 4.19** Resultados de la respuesta del devanado del equipo, serie: G1543-01.

## Gráfica de resultados de equipo serie: G1161-02.

En la Figura 4.20, se tiene el resultado de la respuesta a la frecuencia, del equipo, medición realizada en sitio, para referencia en pruebas posteriores.

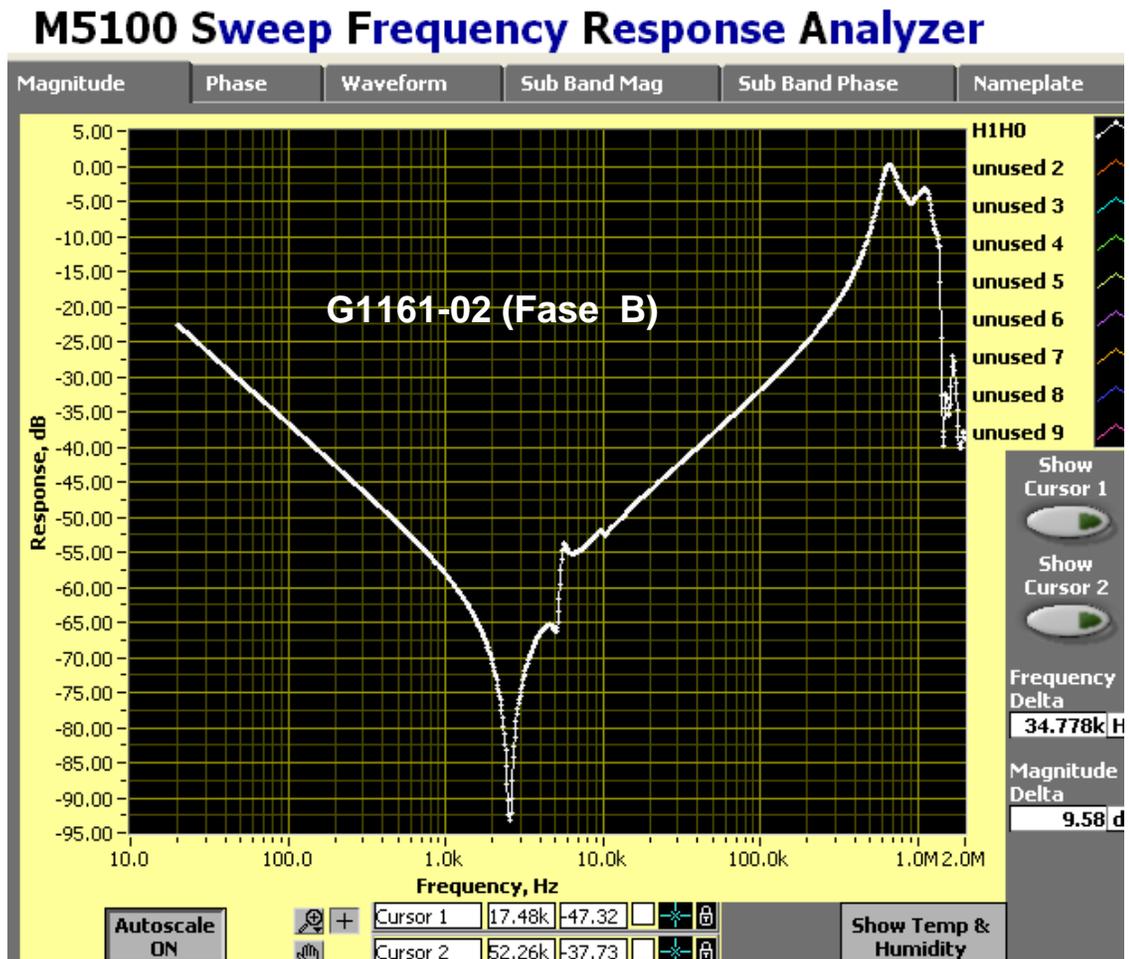


Figura 4.20 Resultados de la respuesta del devanado del equipo, serie: G1161-02.

## Comparación de respuestas entre los equipo serie G1543-01 Y G1161-02.

La Comparación realizada entre las mediciones de equipos **G1543-01** y **G1161-02**, se muestran en la Figura 4.21, en general se observa que la respuesta característica de cada equipo, es igual debido a que son equipos con características similares y del mismo fabricante.

En el rango de **2.5 KHZ a 10 KHZ** se observan desviaciones entre las gráficas de respuesta a la frecuencia, en esta región se identificarán los cambios entre espiras.

En el rango de **200 KHZ** en adelante se representarán las diferencias de respuesta a la frecuencia debido a las conexiones internas y de terminales de boquillas de los equipos.

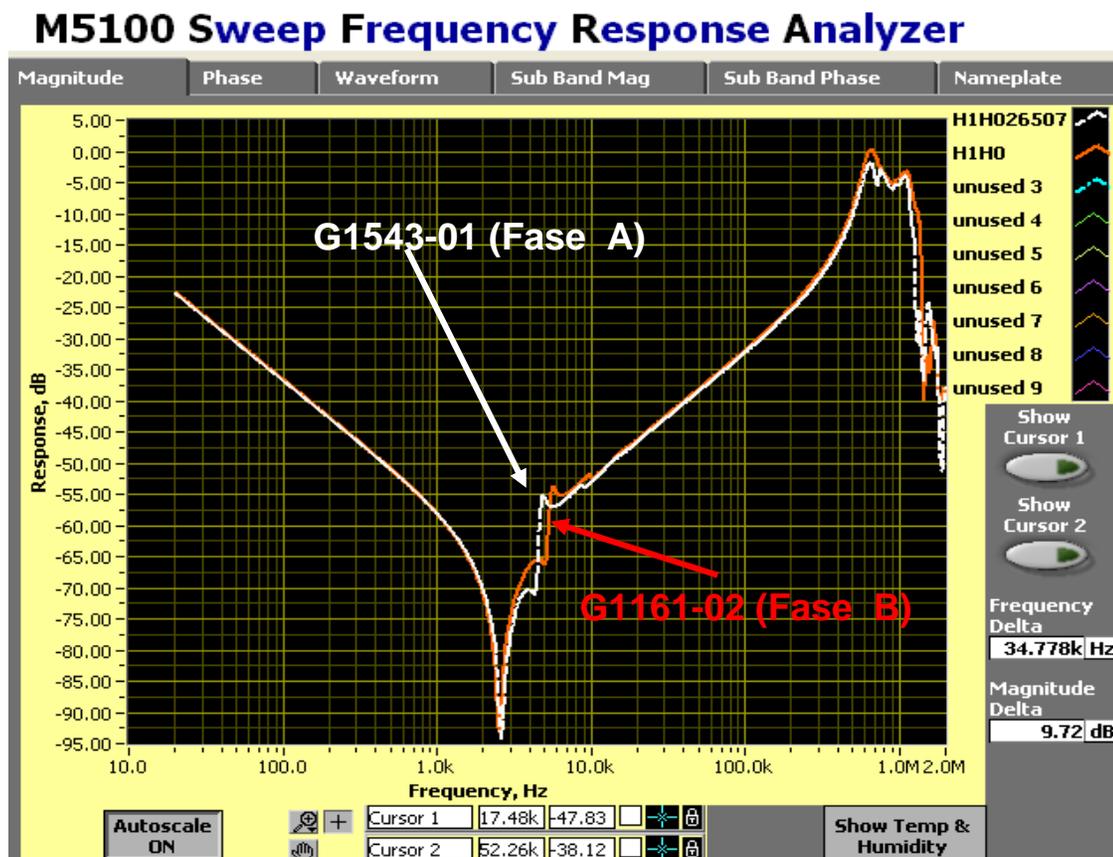


Figura 4.21 Comparación de las respuestas de los equipos, serie: G1161-02 y G1543-01.

### Conclusiones

En la medición realizada al equipo **G1543-01** se observa una respuesta en la frecuencia sin resonancias significativas, el valor inicial de respuesta depende de la reactancia del circuito medido.

Cabe hacer mención que en el diseño de este equipo el valor de reactancia lineal es igual a **2133 ohms** y la reactancia medida es de **2126.8 ohms**. De igual manera en la medición realizada al equipo **G1161-02**, se observa una respuesta en la frecuencia sin resonancias significativas, en este caso en el diseño del equipo el valor de reactancia lineal es igual a **2133.33 ohms** y la reactancia medida es de **2122.3 ohms**, por lo es posible deducir que no hay cambios significativos en los parámetros de operación de los equipos.

En la comparación de las mediciones de respuesta en frecuencia de los equipos **G1543-01** y **G1161-02**, se observa una respuesta con las características similares, sin embargo en el rango de frecuencia de 2 KHZ a 10 KHZ, existen diferencias en las gráficas derivado de las características de construcción de las bobinas (influyendo la distribución de espiras y apriete de la bobina).

La comparación entre las mediciones de repuestas al barrido de frecuencia en un mismo equipo es determinante, ya que estas son características y no deben existir resonancias durante el barrido de frecuencia aplicado.

## **4.9 Medición de Respuesta a la Frecuencia en boquillas del tipo papel impregnado en aceite (OIP), instaladas en transformadores y reactores de potencia.**

### **4.9.1 Antecedentes.**

Las boquillas son los accesorios del transformador, que nos permiten el acceso a la conexión con sus devanados, este accesorio es el mas susceptible de daño del transformador, pues esta expuesto a eventos sísmicos, temperatura, humedad y radiación solar, por lo cual debemos vigilar con mas precisión su estado y comportamiento después de eventos de falla y transitorios, con la finalidad de evitar fallas mayores a los equipos.

Existen diferentes tipos de boquillas, en base al método de fabricación, en general se trata de un capacitor fabricado sobre un tubo de aluminio que sirve de guía para la terminal del devanado, sobre este tubo es devanado un capacitor formado por hojas de aluminio y papel aislante, en la actualidad existen en el mercado los tipos siguientes.

- OIP. Papel impregnado en aceite.
- RIP. Papel impregnado en resina.

Para este trabajo estudiaremos casos con boquillas del tipo OIP, debido a que estas son las más antiguas, existen algunas con mas de 20 años de servicio.

#### 4.9.2 Medición de respuesta a la frecuencia a boquillas tipo OIP.

La prueba de respuesta en boquillas ha sido de gran apoyo en el diagnóstico de los equipos de transformación, debido a que con la generación de huellas de estos equipos, es factible la comparación entre boquillas del mismo voltaje de operación y distinto fabricante, basándose en que los valores de capacitancia sean iguales. En la Tabla 4.10, se indican las conexiones necesarias para la medición del aislamiento principal que compone el capacitor C1 y en la Figura 4.22 se esquematiza dicha conexión.

**Tabla 4.10** Conexión para medición de la respuesta a la frecuencia de boquillas.

TERMINAL ROJA	TERMINAL NEGRA	MIDE	OBSERVACIONES
CONECTOR DE BOQUILLA	TERMINAL DE TAP	C1	LAS PANTALLAS SE CONECTAN A LA BRIDA O AL TANQUE EL CUAL DEBERÁ ESTAR ATERRIZADO.



Figura 4.22 Conexión para medición de la respuesta a la frecuencia de boquillas.

### Mediciones realizadas a boquillas del tipo OIP.

En la figura 4.23 se muestra la respuesta de boquillas de diferentes voltajes donde se puede observar, el rango de respuesta predominante entre 10 KHZ a 110 KHZ. Se observa también que las respuestas pueden ser comparadas con boquillas del mismo valor de capacitancia y voltaje.

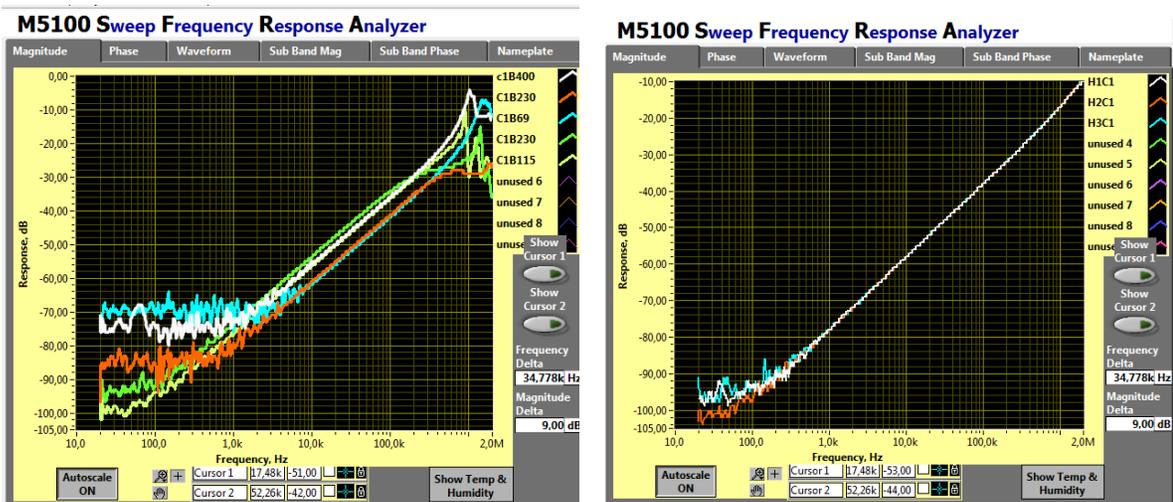
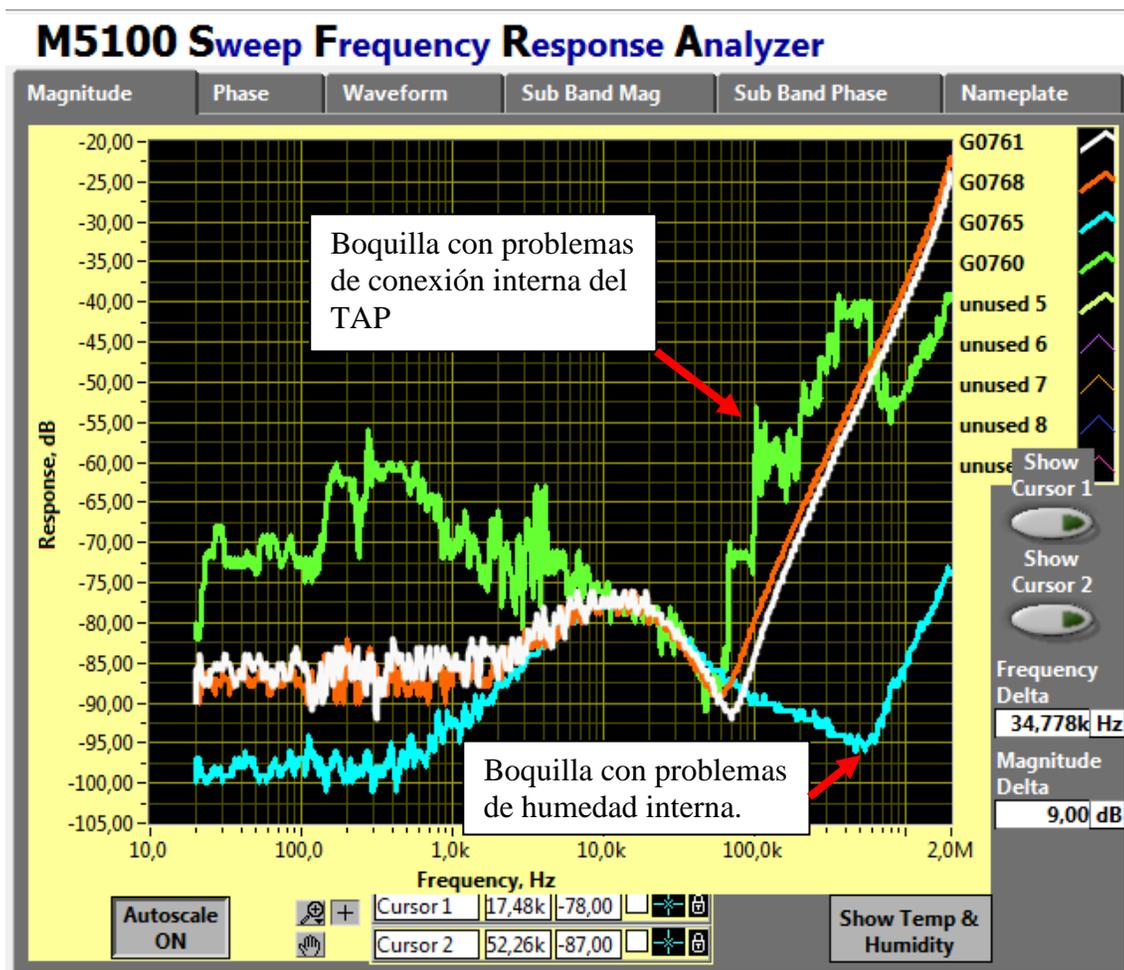


Figura 4.23 Respuesta obtenida en boquillas de diferente voltaje.

**Mediciones realizadas a boquillas del tipo OIP, donde se detectan condiciones anormales de operación.**

En la Figura 4.24, se observan las respuestas obtenidas de las mediciones a boquillas de bajo voltaje y alta corriente, en las cuales se obtuvieron las resonancias fuera de rango, en los números de serie G0765 y G0760, adicionalmente se obtuvieron valores de capacitancia y pérdidas con valores altos. Se revisaron y se encontraron problemas de conexión en los TAPs, así como la presencia de humedad.



**Figura 4.24** Respuesta obtenida en boquillas del mismo valor de Voltaje y Capacitancia.

## 4.10 Detección de fallas en transformadores y boquillas al realizar la medición de Respuesta a la Frecuencia.

En la práctica y aplicación de la medición de respuesta a la frecuencia, se han detectado condiciones de operación anormales en equipos de transformación, así como en boquillas del tipo capacitor de fabricación OIP, por lo cual se ratifica la confianza en la aplicación de este método de diagnóstico.

**Medición realizada a autotransformador monofásico, donde se detectan problemas en el cambiador de derivaciones bajo carga.**

En la Figura 4.25, se muestran los resultados de la medición a un autotransformador monofásico, de 33.33 MVA, 230/115/13.8 kV, el cual presenta daño en el cambiador de derivaciones en una de sus conexiones.

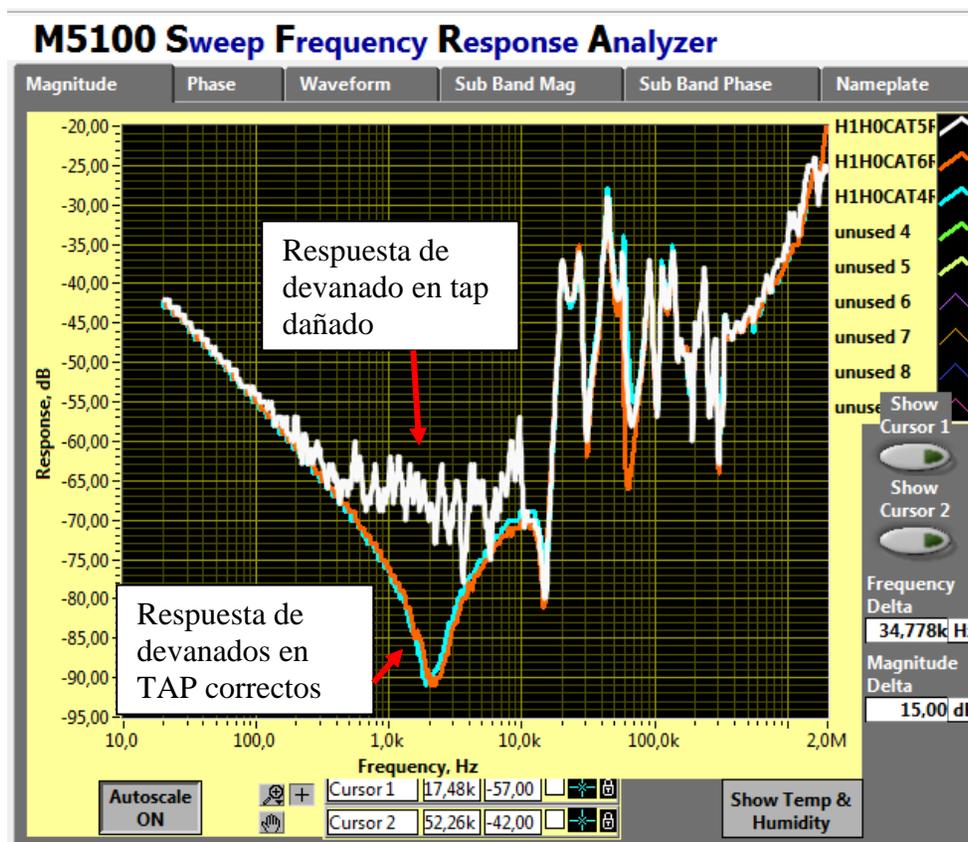
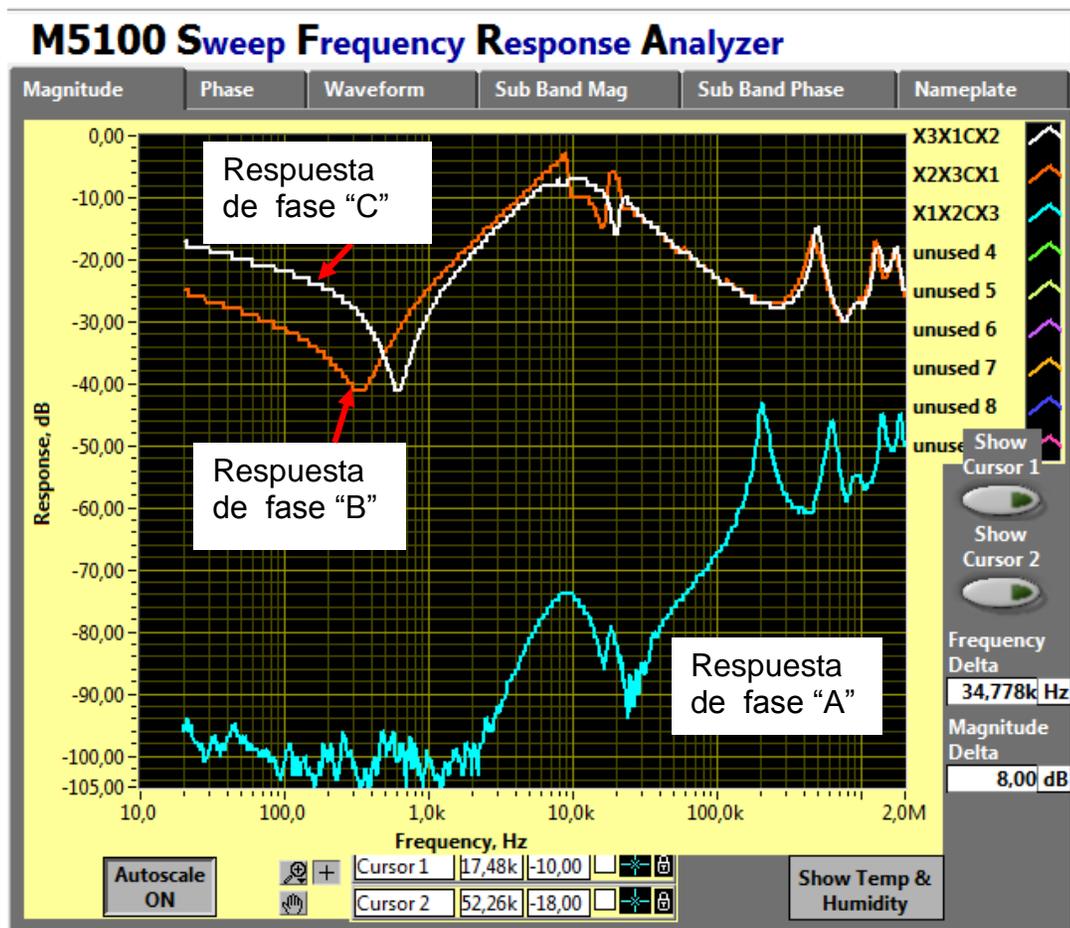


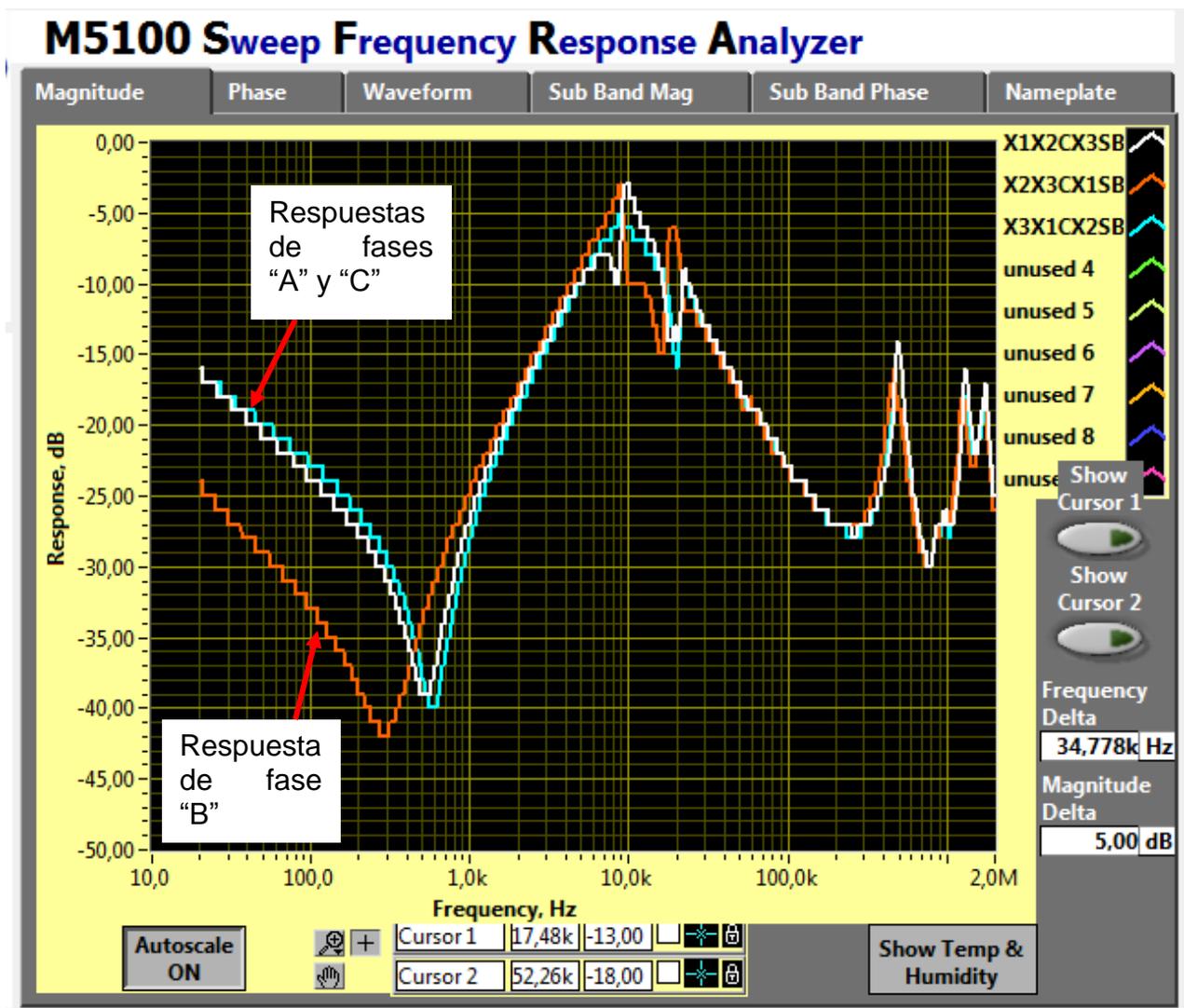
Figura 4.25 Respuesta obtenida en autotransformador con falla en cambiador de derivaciones.

**Medición realizada a transformador trifásico, donde se detectan problemas en boquillas.**

En la Figura 4.26, se muestran los resultados de la medición a un transformador trifásico, en el cual se detecto daño en una boquilla, se realizó la medición con la conexión directa a la terminal del devanado, obteniendo la respuesta mostrada en la Figura 4.27, donde se observan las características similares en las fases A y C, deduciendo el buen estado de los devanados y detectando el daño por humedad en la boquilla de la fase A.



**Figura 4.26** Respuesta obtenida en transformador trifásico con daño en boquilla.



**Figura 4.27** Respuesta obtenida en transformador trifásico con la conexión directa a terminales del devanado.

Como se observa en los resultados de las respuestas al barrido de frecuencia de las figuras anteriores, el método de prueba proporciona con certeza información de los equipos para su diagnóstico confiable, para la toma de decisiones adecuada, en la sección siguiente se realizara una comparación con las pruebas tradicionales.

#### 4.11 Comparación entre pruebas dieléctricas tradicionales y el método de Respuesta al barrido de Frecuencia, en el diagnóstico de transformadores.

En el desarrollo del presente reporte se han descrito los diferentes tipos de pruebas para el diagnóstico de transformadores, autotransformadores y reactores de potencia, haciendo énfasis en el método de RF. En la tabla 4.11 se muestran las diferencias entre la aplicación de los métodos tradicionales y el de RF.

**Tabla 4.11** Diferencias entre métodos de prueba tradicionales y RF.

PROBLEMA	TÉCNICA DE DIAGNÒSTICO EN CAMPO	NIVEL DE EFICACIA DEL MÈTODO TRADICIONAL	NIVEL DE EFICACIA DEL MÈTODO DE RF
MECÀNICO	Corriente de Excitación	Medio	Alto
	Medición de Impedancia	Medio / Alto	
	Medición de la capacitancia (Factor de Potencia)	Alto	
	Medición de la Relación de Transformación	Bajo	
	Medición de la Resistencia Ohmica	Medio	
DIELÈCTRICO	Medición de la Resistencia de Aislamiento	Medio	Alto
	Medición de las pérdidas de aislamiento (Factor de Potencia)	Alto	

De la tabla se puede observar la ventaja de la prueba de RF, para el diagnóstico del equipo. También en el tiempo de aplicación de la prueba, se tiene que es menor en el método de RF.

Los tiempos de prueba tienen su repercusión en el costo del mantenimiento predictivo y de operación, por lo que al minimizar el tiempo de indisponibilidad de los equipos y al asegurar su confiabilidad de funcionamiento, vuelve más rentable su aplicación.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Se ha observado la eficacia de la medición de Respuesta a la Frecuencia, lo cual nos da confianza en la aplicación del método; la evaluación cualitativa de las respuestas ha ayudado en el diagnóstico de campo, ya que obteniendo la huella del transformador una vez en el sitio de operación, es factible la comparación con resultados de pruebas posteriores. Las diferencias en las respuestas características de los equipos, serán indicios de anomalías en el equipo bajo prueba, se puede además comparar equipos de la misma marca e impedancia y equipos de diferente marca pero con la misma impedancia y el mismo tipo de construcción.

La prueba de barrido de frecuencia ha demostrado su utilidad no solo en el diagnóstico de transformadores, si no en el análisis de los mismos para otros efectos de resonancia del transformador y en la puesta en servicio de trampas de onda y filtros de armónicos, así como en la determinación del alcance de los daños internos de los transformadores.

Se deduce que es factible la ejecución de la medición de Respuesta a la Frecuencia sustituyendo, en los mantenimientos predictivos, la ejecución de las pruebas dieléctricas y de operación en los transformadores, aprovechando la ventaja de su tiempo de ejecución y la precisión de las pruebas, aunado a la seguridad al trabajar con bajos voltajes de prueba.

Por lo anterior se recomienda la aplicación de la medición de Respuesta a la Frecuencia utilizando el barrido de frecuencia, en los mantenimientos predictivos, apoyado con la cromatografía de gases, análisis físico químico del aceite, la medición de termografía en conectores de boquillas y sistemas de enfriamiento de los transformadores y la verificación de operación correcta de sus accesorios. Al usar este método minimizaremos el tiempo de indisponibilidad de los equipos, asegurando su correcta operación.

# Bibliografía

[CFE 2010]

Comisión Federal de Electricidad. Que es CFE. 28 de Septiembre de 2010.

[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)

[GUTIERREZ, 2003]

Alberto Gutiérrez B., Prueba de barrida de frecuencia aplicada a pruebas de equipos de subestación, 2003.

[CFE, 2007a]

Comisión Federal de Electricidad, (junio 2007). Manual de transformadores y reactores de potencia. Tomo I, México.

[CFE, 2007b]

Comisión Federal de Electricidad, (junio 2007). Manual de transformadores y reactores de potencia. Tomo II, México.

[DOBLE 2000]

Doble Engineering Company, (2000). Guía del usuario del instrumento SFRA M5100

[ANSI/IEEE, 1999]

American National Standards Institute, ANSI/IEEE C57.12.90, (1999). Process Tests & Control Points for Power Transformer.

[NMX, 1997]

Normas mexicanas, NMX-J-169-ANCE-1997, (1997). Métodos de prueba de transformadores y autotransformadores de distribución y potencia.