



---

**UNIVERSIDAD MICHOACAN DE SAN  
NICOLAS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA  
PARA LA DETECCION DE FALLAS INCIPIENTES”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:  
FELIPE BENITES LOPEZ**

**ASESOR:  
M.C. JOSE ALBERTO AVALOS GONZALEZ**

**MORELIA, MICHOACAN, NOVIEMBRE 2012**



## AGRADECIMIENTOS

A mi hermano RAYMUNDO por que sin su apoyo incondicional esto nunca se hubiera hecho realidad, por siempre representar para mí un gran ejemplo a seguir.

A mi esposa ELIZABETH quien día a día con su amor y paciencia me impulsó y me apoyó para que esta tesis fuera una realidad y así poder concluir con lo que un día empecé.

A mi BEBE por que aun sin nacer me dio la fuerza y la ilusión de terminar este trabajo para que el este orgulloso de mi.

A mis padres GUADALUPE Y LAURENTINO por darme la vida para poder estudiar lo que a mí me gusta y así poder realizar este trabajo.

Al MC. JOSE ALBERTO AVALOS GONZALEZ por ser parte de mi formación académica y por asesorarme en este trabajo final para obtener mi título.

## CONTENIDO

### CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1.- Antecedentes.....	Pág. 3
1.2.- Objetivo.....	Pág. 3
1.3.- Justificación.....	Pág. 4
1.4.- Metodología.....	Pág. 5
1.4.1.- Prueba de corriente de excitación.....	Pág. 5
1.4.2.- Prueba de factor de potencia.....	Pág. 6
1.4.3.- Prueba de reactancia de dispersión.....	Pág. 6
1.4.4.- Prueba de respuesta al barrido de frecuencia.....	Pág. 6
1.5.- Contenido de la tesis.....	Pág. 7

### CAPITULO 2 EL TRANSFORMADOR Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

2.1.-Definición.....	Pág. 8
2.2.-Funcionamiento.....	Pág. 9
2.3.-Circuito equivalente de un Transformador.....	Pág. 10
2.4.-Corriente de excitación en un transformador.....	Pág. 12
2.5.-Factor de potencia para la carga en los transformadores.....	Pág. 16

### CAPITULO 3 DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS Y PRUEBAS REALIZADAS

3.1.- Analizador de aislamiento M4000 marca doble.....	Pág. 18
3.1.1.- Componentes que forman al M4000.....	Pág. 18
3.1.1.1.- Instrumento M4100.....	Pág. 18
3.1.1.2.- M4200 computadora portátil.....	Pág. 19
3.1.1.3.- Software M4000.....	Pág. 20
3.1.1.4.- M4150 referencia para calibración en el campo.....	Pág. 20
3.1.2.-Componentes auxiliares para el M4000.....	Pág. 20
3.1.2.1.-M4110 interfaz de reactancia de dispersión.....	Pág. 20
3.2.- Prueba de corriente de excitación para transformadores.....	Pág. 23

3.2.1.- Consideraciones para la prueba .....	Pág. 23
3.2.2.-Procedimiento para realizar la prueba y diagramas de conexión.....	Pág. 24
3.2.2.1.-Medición de $I_E$ para transformadores con devanados conectados en estrella (método de rutina).....	Pág. 24
3.2.2.2.- Medición de $I_E$ para transformadores con devanados conectados en Delta (método de rutina).....	Pág. 25
3.2.2.3.- Medición de $I_E$ para transformadores con devanados conectados en Estrella (método alternativo).....	Pág. 26
3.2.2.4.- Medición de $I_E$ para transformadores con devanados conectados en Delta (método alternativo).....	Pág. 27
3.2.2.5.- Medición de $I_E$ para transformadores con devanados conectados en Delta (método alternativo 2).....	Pág. 28
3.2.3.- Análisis de los resultados obtenidos.....	Pág. 29
3.3.- Prueba de factor de potencia también conocida como prueba general de Doble ( <i>overall test</i> ).....	Pág. 30
3.3.1.- Limitaciones de las pruebas de factor de potencia en corriente alterna.....	Pág. 30
3.3.2.-Opciones de conexión para el método doble .....	Pág. 33
3.3.2.1.-Método 1 espécimen aterrizado ( <i>gst-ground</i> ).....	Pág. 33
3.3.2.2.-Método 2 espécimen aterrizado en guarda ( <i>gst-guard</i> ).....	Pág. 34
3.3.2.3.- Especimen sin Aterrizar (UST).....	Pág.34
3.3.3.-Análisis de resultados de la prueba general de DOBLE.....	Pág. 39
3.4.- Prueba de reactancia de dispersión .....	Pág. 40
3.4.1.-Procedimiento de la prueba para transformadores trifásicos de dos devanados.....	Pág. 40
3.4.1.1.- Prueba para el equivalente trifásico .....	Pág. 41
3.4.1.2.- Prueba por fase.....	Pág. 43
3.4.2.- Interpretación de Resultados.....	Pág. 45
3.5.- M5100 analizador de la respuesta al barrido de frecuencia.....	Pág. 45
3.5.1.-Elementos del SFRA.....	Pág. 46
3.5.2.- Teoría del SFRA para las pruebas.....	Pág. 47
3.5.3 Análisis de resultados.....	Pág. 53

**CAPITULO 4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A  
LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

4.1.- Resultados de la Prueba de Corriente de Excitación.....	Pág. 58
4.2.- Resultados de la Prueba de Factor de Potencia.....	Pág. 60
4.3.- Resultados de la Prueba de Reactancia de Dispersión.....	Pág. 62
4.4.- Resultados de la Prueba de Respuesta al Barrido de Frecuencia.....	Pág. 64

**CAPITULO 5 CONCLUSIONES**

Conclusiones.....	Pág. 68
Referencias Bibliográficas.....	Pág. 69

## LISTA DE FIGURAS

2.1.- Esquema General de un Transformador.....	Pág. 9
2.2.- Transformador Ideal.....	Pág.10
2.3.- Transformador Real.....	Pág.11
2.4.- Circuito Equivalente para un Transformador.....	Pág.11
2.5.- Transformador en Vacío.....	Pág.13
2.6.- Tensión inducida y flujo.....	Pág.14
2.7.- Corriente de Excitación a partir de la curva de Histéresis.....	Pág.15
2.8.- Diagrama Fasorial de la corriente de Excitación.....	Pág.15
2.9.- Corriente de Excitación y la tensión aplicada al primario.....	Pág.16
2.10.- Triángulo de Potencias.....	Pág.17
3.1.- M4100 Analizador de Aislamiento.....	Pág.19
3.2.- Computadora Portátil de uso rudo.....	Pág.19
3.3.- M4150 Calibrador.....	Pág.20
3.4.- M4100 Modulo de Prueba de Reactancia de Dispersión.....	Pág.21
3.5.- M4300 Incluye los componentes del M4000.....	Pág.22
3.6.- Método de rutina para conexión Estrella.....	Pág.24
3.7.- Método de rutina para conexión Delta.....	Pág.25
3.8.- Método alternativo para conexión Estrella.....	Pág.26
3.9.- Método alternativo para conexión Delta.....	Pág.27
3.10.- Método alternativo 2 para conexión Delta.....	Pág.28
3.11.- Representación simple de modelos de Aislamiento.....	Pág.31
3.12.- Flujos de corrientes.....	Pág.31
3.13.- Flujos y Vectores de las Corrientes.....	Pág.32
3.14.- Ángulos del Factor de Potencia y del Factor de Dispersión.....	Pág.32
3.15.- Modo de Conexión GST.....	Pág.33
3.16.- Modo de Conexión GST-Guard.....	Pág.34
3.17.- Modo de Conexión UST.....	Pág.34
3.18.- Representación de un Transformador Trifásico de dos devanados.....	Pág.35
3.19.- Componentes resultantes de un Aislamiento para un Transformador de dos devanados en conexión Delta-Delta.....	Pág.36
3.20.- Transformador de dos devanados.....	Pág.36

3.21.- Circuito Dieléctrico.....	Pág.37
3.22.- Procedimiento DTA pre programado.....	Pág.38
3.23.- Conexión entre M4000 y M4100 para el equivalente Trifásico.....	Pág.41
3.24.- Conexiones de los devanados para la prueba del equivalente Trifásico...	Pág.42
3.25.- Conexión entre M4000 y M4100 para la prueba por fase.....	Pág.43
3.26.- Conexiones de los devanados para la prueba por fase.....	Pág.44
3.27.- SFRA M5100.....	Pág.45
3.28.- M5100 listo para calibrar.....	Pág.46
3.29.- Respuesta de un Inductor ideal.....	Pág.48
3.30.- Respuesta de un Capacitor ideal.....	Pág.48
3.31.- Medición del SFRA.....	Pág.49
3.32.- Medición de la Impedancia.....	Pág.49
3.33.- Circuito Paralelo RLC .....	Pág.50
3.34.- Impedancia de un Circuito Paralelo RLC.....	Pág.51
3.35.- Respuesta de un Circuito Paralelo RLC.....	Pág.51
3.36.- Pantalla para ingresar datos de placa del Transformador.....	Pág.52
3.37.- Pantalla que muestra las gráficas de las Respuestas a la Frecuencia.....	Pág.52
3.38.- Pantalla para seleccionar las gráficas a mostrar.....	Pág.53
4.1.- Datos del Transformador 1.....	Pág.56
4.2.- Datos del Transformador 2.....	Pág.56
4.3.- Datos del Transformador 3.....	Pág.57
4.4.- Datos del Transformador 4.....	Pág.57
4.5.- Resultados de la Prueba de Corriente de Excitación del Transformador 1.	Pág.58
4.6.- Resultados de la Prueba de Corriente de Excitación del Transformador 2.	Pág.58
4.7.- Resultados de la Prueba de Corriente de Excitación del Transformador 3.	Pág.59
4.8.- Resultados de la Prueba de Corriente de Excitación del Transformador 4.	Pág.59
4.9.- Resultados de la Prueba del Factor de Potencia del Transformador 1.....	Pág.60
4.10.- Resultados de la Prueba del Factor de Potencia del Transformador 2.....	Pág.60
4.11.- Resultados de la Prueba del Factor de Potencia del Transformador 3.....	Pág.61
4.12.- Resultados de la Prueba del Factor de Potencia del Transformador 4.....	Pág.61
4.13.- Resultados de la Prueba de Reactancia de Dispersión del Transf. 1.....	Pág.62
4.14.- Resultados de la Prueba de Reactancia de Dispersión del Transf. 2.....	Pág.62
4.15.- Resultados de la Prueba de Reactancia de Dispersión del Transf. 3.....	Pág.63

4.16.- Resultados de la Prueba de Reactancia de Dispersión del Transf. 4.....	Pág.63
4.17.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 1 Lado de alta.....	Pág.64
4.18.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 1 Lado de baja....	Pág.64
4.19.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 2 Lado de alta.....	Pág.65
4.20.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 2 Lado de baja....	Pág.65
4.21.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 3 Lado de alta.....	Pág.66
4.22.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 3 Lado de baja....	Pág.66
4.23.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 4 Lado de alta.....	Pág.67
4.24.- Resultados de la Prueba de SFRA del Transformador 4 Lado de baja....	Pág.67

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Procedimiento de rutina de la Prueba para devanados en Estrella.....	Pág. 24
Tabla 2.- Procedimiento de rutina de la Prueba para devanados en Delta.....	Pág. 25
Tabla 3.- Procedimiento de la Prueba (método alternativo) para devanados en Estrella.....	Pág. 26
Tabla 4.- Procedimiento de la Prueba (método alternativo) para devanados en Delta.....	Pág. 27
Tabla 5.- Procedimiento de la Prueba (método alternativo 2) para devanados en Delta.....	Pág. 28
Tabla 6.- Comparaciones entre factor de Potencia y factor de Dispersión.....	Pág. 33
Tabla 7.- Procedimiento de la Prueba.....	Pág. 38
Tabla 8.- Conexiones para la prueba de un Transformador de dos devanados..	Pág. 50
Tabla 9.- Datos de los Transformadores.....	Pág. 55

## **SIMBOLOS Y ABREVIATURAS**

<b>Ω</b>	Ohms
<b>K</b>	Kilo
<b>V</b>	Volts
<b>A</b>	Ampers
<b>W</b>	Webers
<b>Hz</b>	Hertz
<b>X</b>	Reactancia
<b>Θ</b>	Angulo
<b>Jw</b>	Frecuencia Angular
<b>L</b>	Inductancia
<b>R</b>	Resistencia
<b>dB</b>	Decibeles
<b>Z</b>	Impedancia
<b>C</b>	Capacitancia
<b>M</b>	Mili
<b>F</b>	Frecuencia
<b>Π</b>	Pi
<b>SFRA</b>	Sweep Frequency Response Analyzer (Analizador de Respuesta al Barrido de Frecuencia)
<b>GST</b>	Ground Specimen Test (Especimen en Prueba Aterrizado)
<b>UST</b>	Unground Specimen Test (Especimen en Prueba sin Aterrizar)

## RESUMEN

El transformador de potencia es un elemento esencial en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), la transportación de grandes bloques de energía de manera eficiente no sería posible sin la elevación a niveles de altos y extra altos voltajes, aspecto que permite reducir considerablemente los niveles de corriente y con ello se minimizan las pérdidas de transmisión de energía, por efecto Joule, a niveles económicamente aceptables.

Mantener el servicio de energía eléctrica de manera continua es vital para el desarrollo económico de un país, la falta de este servicio por una hora o más tiempo resulta en grandes pérdidas económicas tanto para el sector productivo como para el sector financiero principalmente, ya que además de las pérdidas por falta de producción en el primer caso se acentúan fallas en el sistema de producción al reiniciar el mismo. De la misma manera los hospitales, bancos, sistemas de seguridad tanto pública como privada, etc. se ven fuertemente afectadas ante la pérdida del suministro eléctrico, volviéndose un problema de seguridad nacional cuando esta falta del fluido eléctrico afecta una parte importante de la población.

Por lo anterior, un mantenimiento preventivo y/o correctivo en los diferentes elementos que conforman los SEP es absolutamente necesario, la aplicación de los mismos normalmente se realiza de manera periódica a los diferentes dispositivos que operan en los SEP. Sin embargo, esa periodicidad ha mostrado que no está bien fundamentada ocasionando la realización de mantenimiento en ocasiones innecesarios y en otros casos un mantenimiento tardío que ha llevado a fallas en el equipo que pudo haberse evitado.

Las fallas incipientes son un antecedente de una falla franca, y tomando en cuenta el alto costo de los transformadores, así como el costo de reparación de una falla franca, es un método de prevención la realización de las pruebas para la detección de fallas incipientes.

Las pruebas para detección de fallas incipientes deben realizarse cada vez que se tenga un mal funcionamiento del transformador o sospecha de alguna falla, o bien cuando están programadas para su mantenimiento.

Es recomendable realizar estas pruebas cuando los transformadores son nuevos, para tener así los resultados obtenidos como referente para pruebas posteriores, lo cual nos va a permitir detectar cualquier cambio mínimo en los valores para darle seguimiento y en su caso ubicar las fallas a tiempo; reduciendo así el costo de reparación del equipo.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCION

### INTRODUCCIÓN

Los transformadores son máquinas cuyo objetivo es cambiar el nivel de voltaje y la corriente de una red eléctrica ya sea dentro de una industria, en la transmisión de energía o en el hogar con menor escala de voltaje; al ser indispensables para el manejo de la energía su costo varía, dependiendo uso y finalidad.

Los transformadores son muy utilizados en cualquier ámbito, ya que son necesarios para la transformación de energía eléctrica ya sea para elevar o para reducir los niveles de tensión; si bien son muy usados, su costo es alto, por lo que requieren de un mantenimiento preventivo para que siga funcionando de manera eficaz.

Las pruebas contenidas en este proyecto son para la detección oportuna y correcta de fallas incipientes, en equipos que ya están en operación o nuevos, para utilizar los resultados como base para comparaciones futuras y para detectar daños al momento de transportarlos al sitio donde serán instalados.

### 1.1 Antecedentes

El transformador es un aparato que realiza una función muy poco vistosa –no realiza ningún trabajo mecánico (salvo vibrar) – pero en cambio sí muy útil para el transporte de la energía eléctrica.

La función de los transformadores es la de cambiar los parámetros de la energía eléctrica. De forma tal, que no sea preciso generar, transportar y consumir la energía a una misma tensión, aspecto que generaría altas pérdidas en el sistema eléctrico.

El primer sistema de distribución de electricidad lo puso en servicio Edison, en Nueva York, en el año 1882. Se trataba de una pequeña central eléctrica que suministraba corriente

continua a 120V. Esta tensión tan baja requería que por los cables circularan grandes corrientes, lo que daba lugar a enormes caídas de tensión y enormes pérdidas. De modo que en la práctica una central sólo podía alimentar a una manzana de edificios.

La invención del transformador y los desarrollos de las fuentes de corriente alterna, resolvieron los graves problemas que tenía la distribución de energía eléctrica en corriente continua.

Si se eleva por ejemplo en diez veces la tensión en la distribución, la corriente se reduce justamente en esas diez veces, con lo que las caídas de tensión también se reducen en ese factor, y las pérdidas en los cables en 100 veces.

## **1.2 Objetivo**

El objetivo de esta Tesis, es presentar las pruebas que se pueden realizar a los transformadores para poder detectar fallas incipientes e incluso fallas francas, ya que si se detectan a tiempo se pueden reducir los costos de reparación, o bien determinar si el transformador debe cambiarse por completo, o si no se presentan cambios en los resultados se puede llevar un control de los transformadores a los cuales se les apliquen estas pruebas y así poder determinar a tiempo cualquier cambio.

## **1.3 Justificación**

Una de las máquinas eléctricas más eficiente es el transformador con valores cercanos al 98%, y por el uso que éste tiene dentro de la industria y en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica es necesario realizar pruebas para medir el nivel de aislamiento y detectar fallas que se presentan por nivel bajo de aislamiento, movimientos de las bobinas o fisuras en las espiras dando así pequeñas fugas de corriente, todo esto afecta al rendimiento del transformador, lo cual representa pérdidas y gastos económicos.

Dependiendo de los resultados que las pruebas arrojan podemos determinar la solución, ya que si son pequeñas fallas incipientes se pueden corregir, realizando reparaciones solo de

las secciones dañadas, y evitar así el daño a todo el equipo realizando un gasto mayor al tener que comprar equipos nuevos.

## **1.4 Metodología**

Para conocer las condiciones en las que se encuentra el aislamiento de un transformador y detectar movimientos entre las bobinas fueron realizadas las pruebas que a continuación se mencionan, de esta forma se pueden detectar fallas incipientes que se pueden reparar evitando así un costo mayor de reparación. Las pruebas que se presentan se realizaron en campo a transformadores de horno de arco eléctrico (69 KV/0.96 KV), lo anterior con la finalidad de validar la efectividad de las pruebas y mostrar como es el comportamiento grafico de los transformadores ante estas pruebas.

### **1.4.1 Prueba de Corriente de Excitación**

Constructivamente, los transformadores trifásicos de núcleo común, al estar en buenas condiciones su corriente de excitación es alrededor del 1% al 2% de su corriente nominal y el devanado que está colocado en la pierna central consumirá una corriente de excitación de alrededor del 50% de la corriente consumida por las piernas laterales.

Por tanto corrientes de excitación anormales serán indicativo principalmente de daños internos en los devanados como posibles cortos circuitos entre espiras, entre devanados o aterrizamiento de los mismos, incluso puede ser debido a fenómenos interesantes como lo es la presencia de magnetismo remanente en los núcleos lo cual debido a la no-linealidad de los mismos afecta esta prueba.

Esta prueba se realiza al mayor nivel de tensión posible proporcionado por el equipo de prueba, el cual es de hasta 12 KV dependiendo del envejecimiento que se conozca del equipo a probar, con el fin de no dañar los aislamientos.

### **1.4.2 Prueba de Factor de Potencia**

Los devanados de los transformadores de potencia así como la mayor parte de los transformadores de distribución se encuentran inmersos en aceite con todo y núcleo, La peculiaridad de este aceite es que presenta una rigidez dieléctrica considerablemente grande por lo que al aplicarle una diferencia de potencial el consumo de potencia es mínimo y a su vez, esta potencia al estar puro el aceite es solamente capacitiva implicando un factor de potencia muy bajo cercano a cero. Al contaminarse este aceite debido a las partículas de carbón o del mismo papel aislante dañado, así como posible humedad que absorba éste, habrá un consumo de potencia real que incrementará el factor de potencia medido en el transformador.

### **1.4.3 Prueba de Reactancia de Dispersión**

Un parámetro importante que permite detectar el deterioro de un transformador es la medición de su impedancia, el propio envejecimiento de los aislamientos provoca que la impedancia del transformador se vea alterada, cortocircuitos entre espiras o devanados altera el valor de la impedancia del transformador, esta prueba permite medir la impedancia del transformador y al compararla con la de placa si se encuentra un valor con una variación por encima del 5% del valor de placa será necesario probar cada fase en forma independiente para detectar cual de los devanados es el que esta dañado o tiene el mayor deterioro de los tres.

### **1.4.4 Prueba de Respuesta al Barrido de Frecuencia**

Los transformadores representan circuitos eléctricos con elementos inductivos y capacitivos tanto entre devanados como entre espiras de un mismo devanado como entre los devanados y el tanque mismo en que se introduce el núcleo con sus devanados, la presencia de estos elementos RLC provoca que existan un gran número de frecuencias de resonancia para el transformador en su conjunto, las cuales excitan los diferentes modos de operación del circuito eléctrico del transformador.

Esta prueba aprovecha esta conformación del transformador e inyecta una señal de baja amplitud (20 V de pico a pico) pero con un barrido de frecuencias que va de los 20 Hz a los 2 MHz y para cada punto inyectado se mide la impedancia y se identifica el comportamiento de la misma ante tales frecuencias.

## **1.5 Contenido de la Tesis**

El capítulo 1 contiene una introducción de la importancia de realizar las pruebas en los transformadores, mostrando una breve explicación de las mismas.

El capítulo 2 contiene una descripción del transformador y sus principales características.

En el capítulo 3 se describen cada una de las pruebas y los equipos con los que se realizaron las mismas.

El capítulo 4 contiene los resultados de las pruebas y un análisis de sus resultados.

El capítulo 5 contiene las conclusiones y propuestas para trabajos futuros.

## CAPÍTULO 2

### EL TRANSFORMADOR Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

En este Capítulo se conocerá los principios de funcionamiento del transformador, la explicación de su funcionamiento y características eléctricas, las cuales son motivo de estudio para estas pruebas.

#### 2.1 Definición

Se denomina transformador a una máquina de conversión electromagnética que permite aumentar o disminuir el nivel de voltaje o tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia constante.

La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

Si suponemos un equipo ideal y consideramos, simplificando, la potencia como el producto del voltaje o tensión por la intensidad, ésta debe permanecer constante (ya que la potencia a la entrada tiene que ser igual a la potencia a la salida, por la ley de la conservación de la energía).

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce o hierro al silicio.

Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios según correspondan a la tensión de entrada o a la tensión de salida, respectivamente. También existen transformadores con más devanados, en este caso puede existir un devanado "terciario", de menor tensión que el secundario, el cual puede emplearse para filtrar las componentes de secuencia cero y terceras armónicas al conectarse en delta, así como emplearse para la alimentación de servicios propios o bien una red de una tensión distinta a la del secundario del transformador.

## 2.2 Funcionamiento

Si se aplica una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, las variaciones de intensidad y sentido de la corriente alterna crearán un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente.

Este campo magnético variable originará, por inducción, la aparición de una fuerza electromotriz en los extremos del devanado secundario.

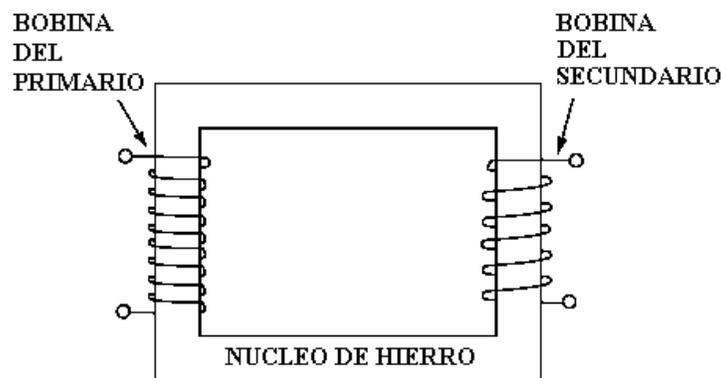


Figura 2.1.- Esquema general de un transformador

La relación entre la fuerza electromotriz ( $E_p$ ) aplicada al devanado primario y la fuerza electromotriz inducida ( $E_s$ ) obtenida en el secundario, es directamente proporcional al número de espiras de los devanados primario ( $N_p$ ) y ( $N_s$ ) espiras del secundario.

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.1)$$

A la relación entre el número de vueltas o espiras del primario y las del secundario se le llama relación de vueltas del transformador o relación de transformación.

Ahora bien, como la potencia aplicada en el primario, en caso de un transformador ideal, debe ser igual a la obtenida en el secundario, el producto de la fuerza electromotriz por la intensidad (potencia) debe ser constante.

Esta particularidad tiene su utilidad para el transporte de energía eléctrica a largas distancias, al poder efectuarse el transporte de alta tensión y pequeños niveles de corriente y por lo tanto las pérdidas también serán menores.

### 2.3 Circuito equivalente de un Transformador

Los transformadores se pueden representar con un circuito eléctrico, la figura 2.2 muestra las características de un transformador ideal.

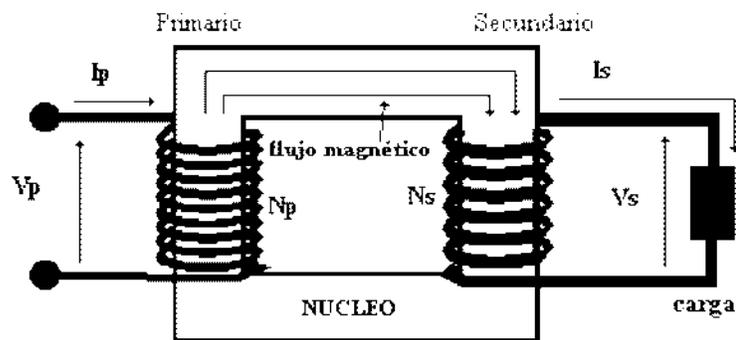


Figura 2.2.-Transformador ideal

Donde:

$N_p$  = número de espiras del primario

$N_s$  = número de espiras del secundario

$V_p$  = voltaje aplicado

$V_s$  = voltaje aplicado a la carga

$I_p$  = corriente del primario

$I_s$  = corriente de la carga

La figura anterior muestra el diagrama de un transformador ideal, por lo cual no se toma en cuenta las pérdidas que este tiene, sin embargo, se sabe que los transformadores tienen pérdidas por la naturaleza de los materiales con los que está fabricado a continuación se muestra el diagrama de un transformador pero indicando donde se presenta el flujo de dispersión, el cual es uno de los factores que ocasiona pérdidas en el dispositivo.

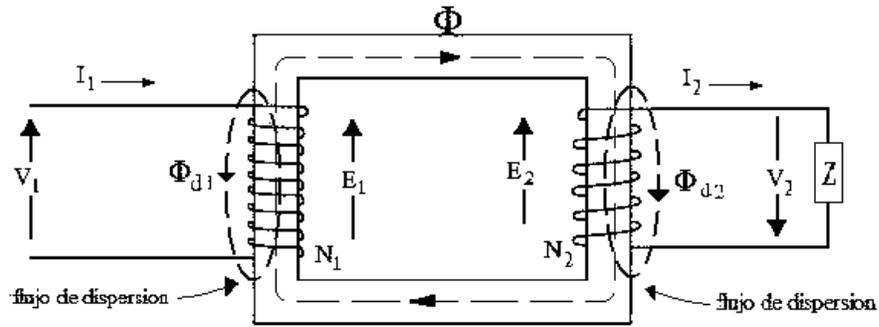


Figura 2.3.-Transformador real

Después de observar la figura anterior se puede representar el circuito eléctrico de un transformador real de la siguiente forma:

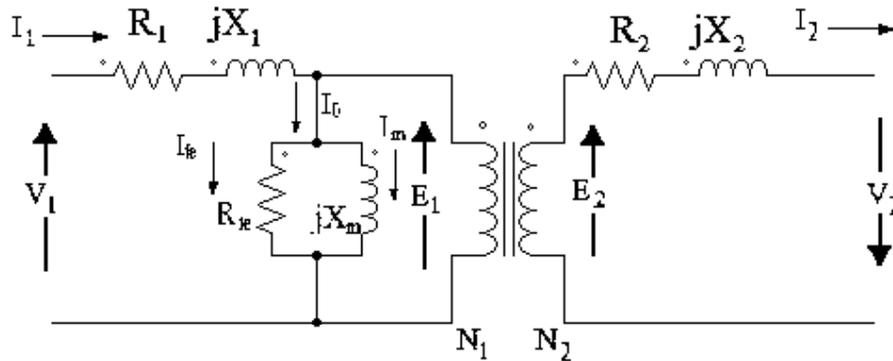


Figura 2.4.- Circuito eléctrico equivalente para un transformador

Donde las ecuaciones, características de este circuito y a su vez del transformador son las siguientes:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 \quad (2.2)$$

$$V_2 = E_2 - R_2 I_2 + jX_2 I_2 \quad (2.3)$$

Donde:

$V_1$  = voltaje aplicado

$I_1$  = corriente del primario

$E_1$  = voltaje inducido por el primario

$X_1$  = reactancia de dispersión del primario

$X_2$  = reactancia de dispersión del secundario

$R_1$  = resistencia de los conductores del primario

$V_2$  = voltaje aplicado a la carga

$I_2$  = corriente de la carga

$E_2$  = voltaje inducido

$R_2$  = resistencia de los conductores del secundario

Como se puede observar en las formulas, la resistencia de los conductores del primario y secundario representan las perdidas en el transformador, más aún si el aislante de estos esta dañado, de ahí la necesidad de realizar pruebas para conocer el estado del aislante, ya que se pueden evitar perdidas si se detectan a tiempo estas deficiencias en el aislante.

De igual forma la reactancia de dispersión representa pérdidas en los transformadores para el estudio y detección de fallas respecto a la reactancia de dispersión se toma en cuenta que la reactancia esta definida por la siguiente ecuación:

$$X = 2\pi fL \quad (2.4)$$

Se observa que la reactancia depende de la frecuencia, y de la inductancia del material pero para la realización de pruebas podemos variar la frecuencia para observar el comportamiento de la reactancia ya que L representa la inductancia de los devanados por lo tanto una de las pruebas que se realiza es haciendo un barrido de frecuencia.

## 2.4 Corriente de Excitación en un Transformador

En la figura 2.6, se puede observar un transformador donde el primario esta conectado a una fuente de CA y el devanado secundario está abierto, el funcionamiento del transformador viene definido por la ley de Faraday.

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

Donde:

$\lambda_1$ : Es el flujo concatenado al devanado del primario.

$N_1$ : Número de vueltas del devanado primario.

$\Phi$ : Flujo promedio por vueltas confinado al núcleo.

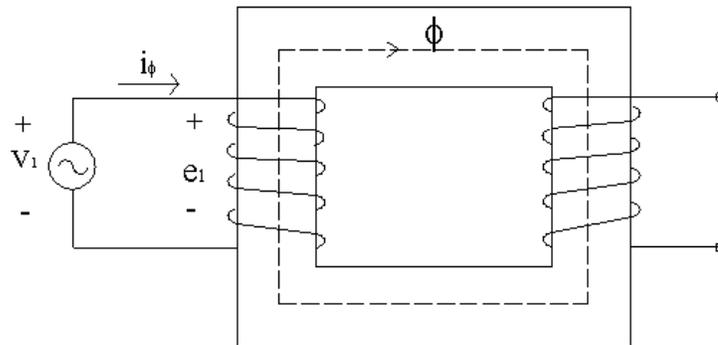


Figura 2.5.- Transformador en vacío.

El voltaje inducido  $e_{ind} = e_1$  está en voltios cuando el flujo  $\Phi$  está en weber, y la fem inducida  $e_1$  es casi igual a la tensión aplicada al primario  $V_1$ , debido a que la resistencia sin carga (o de vacío) es muy pequeña en la mayoría de los transformadores de potencia, la onda de voltaje y de flujo son casi senoidales.

Así el flujo instantáneo es:

$$\phi = \phi_{max} \text{sen}(\omega t) \quad (2.6)$$

El voltaje inducido es:

$$e_{ind} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

$$e_{ind} = \omega N_1 \phi_{max} \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

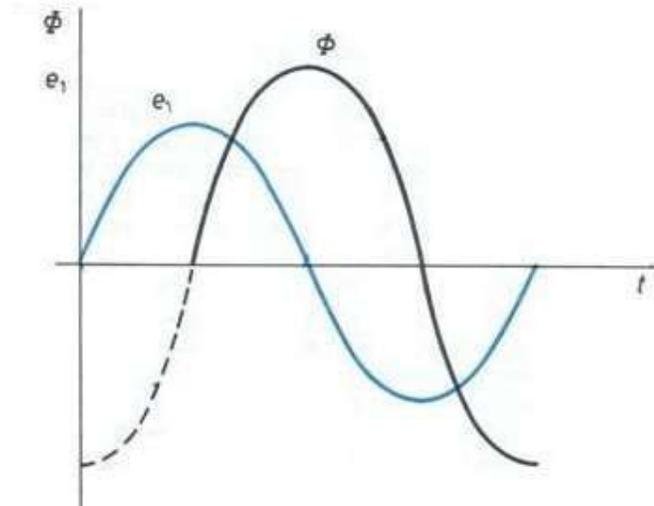


Figura 2.6.- Tensión inducida y flujo

Para un flujo máximo el  $\cos(wt) = 1$ ,  $w = 2\pi.f$ , entonces el valor rms de la fuerza electromotriz inducida es:

$$e_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f N_1 \phi_{\max} \quad (2.9)$$

Esta fuerza electromotriz (fem) inducida  $e_1$  en el primario del transformador se debe a los encadenamientos de flujo establecidos en el circuito magnético los cuales se deben a una corriente que fluye en el circuito primario aún cuando el secundario se encuentre abierto, esta corriente de estado estacionario  $i_F$  se llama corriente de excitación.

Las propiedades magnéticas del núcleo determinan la corriente de excitación, debido a las propiedades no lineales del hierro, la forma de onda de la corriente de excitación difiere de la forma de onda del flujo.

Una curva de la corriente de excitación en función del tiempo se puede encontrar a partir del lazo de histéresis de ca, tal como lo muestra la figura 2.8.

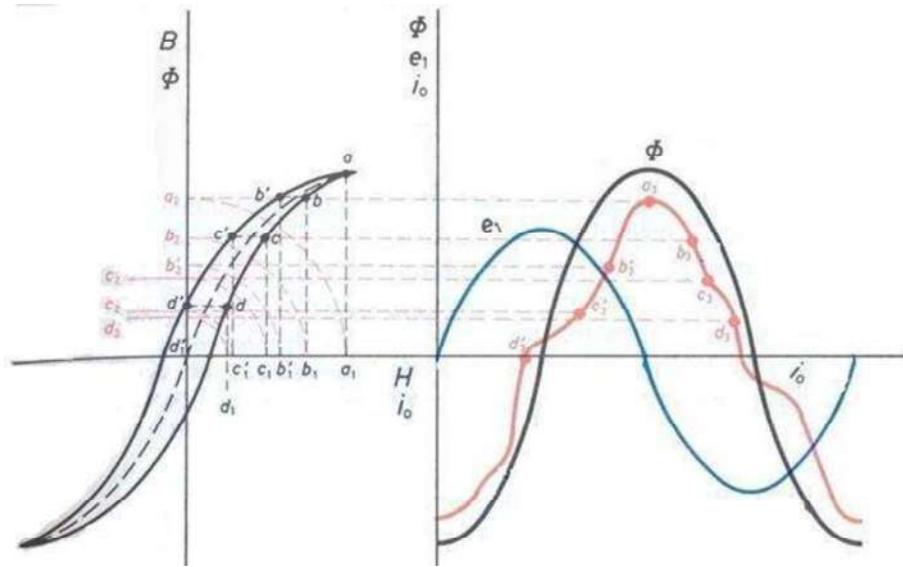


Figura 2.7.- Corriente de excitación a partir de la curva de histéresis.

A partir de la aplicación del estudio de series de Fourier a la corriente de excitación se obtiene una componente fundamental y armónicos impares. La componente fundamental consta a su vez de dos componentes.

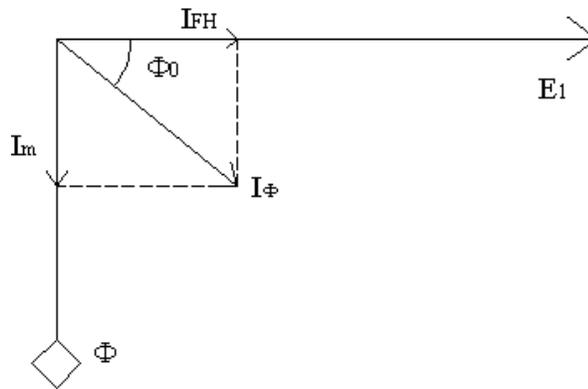


Figura 2.8.- Diagrama fasorial de la corriente de excitación

La corriente de magnetización,  $I_m$ , que es la requerida para producir el flujo en el núcleo del transformador y está atrasada  $90^\circ$  eléctricos con respecto a la fuerza contra-electromotriz y a todos los armónicos.

La corriente de pérdidas en el núcleo,  $I_{FE} = I_{HE}$ , que es la requerida para compensar la histéresis y las pérdidas de corrientes parásitas en el núcleo y está en fase con la fuerza

contra-electromotriz. Esta corriente es no lineal debido a los efectos no lineales de la histéresis.

La corriente de excitación es:

$$I_{excitacion} = I_{\phi} = I_m + I_{FE} \quad (2.10)$$

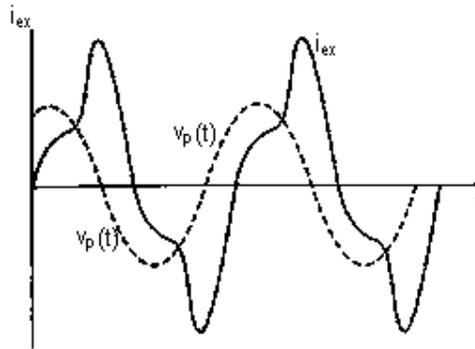


Figura 2.9.- Corriente de excitación y la tensión aplicada al primario.

## 2.5 Factor de Potencia para la carga en los Transformadores

El factor de potencia se define como el cociente de la relación de la potencia activa entre la potencia aparente; esto es:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (2.11)$$

Comúnmente, el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

Existen varios tipos de potencia como lo son:

**Potencia efectiva:** La potencia efectiva o real es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo. Se simboliza por la letra  $P$  y sus unidades son los watts (W).

**Potencia reactiva:** La potencia reactiva es la encargada de generar el campo magnético que requieren para su funcionamiento los equipos inductivos como los motores y transformadores. Se simboliza por la letra  $Q$  y sus unidades son los VARS

**Potencia aparente:** La potencia aparente es la suma geométrica de las potencias efectiva y reactiva se simboliza por la letra  $S$  y sus unidades son en VA

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.12)$$

El triángulo de potencias

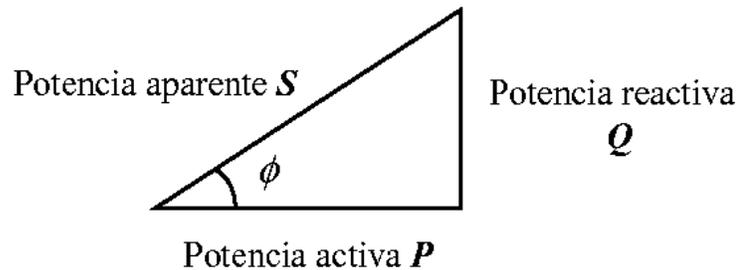


Figura 2.10.- Triangulo de potencias

De la figura se observa que:

$$\frac{P}{S} = \cos \phi \quad (2.13)$$

Por lo tanto

$$fp = \cos \phi \quad (2.14)$$

## **CAPITULO 3**

### **DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y PRUEBAS REALIZADAS**

#### **3.1 Analizador de Aislamiento M4000 Marca Doble**

El analizador de aislamiento M4000 es usado para determinar la calidad del aislamiento en equipos de alto voltaje que están en operación. Este equipo portátil cuenta con una alta exactitud y sensibilidad sobre un amplio rango de valores, cuenta también con una mínima susceptibilidad a interferencia causada por la electrostática o el ruido.

El M4000 genera una señal de prueba de 0-12KV ya que cuenta con un generador de señales senoidal un amplificador de voltaje de 3KVA por lo tanto el equipo mide la corriente, el voltaje del transformador en prueba, también realiza una comparación de la impedancia que aparece en los datos de placa del transformador con la que va calculando internamente debido a las mediciones que realiza, reportando en forma de vector estos resultados, las pérdidas de potencia, factor de potencia y capacitancia se pueden obtener del vector de corriente y voltaje.

#### **3.1.1 Componentes que forman al M4000**

##### **3.1.1.1 Instrumento M4100.**

Es la fuente de donde obtenemos la corriente y el voltaje para realizar las pruebas y también contiene circuitos que determinan la condición del aislamiento del transformador en prueba, cuenta con dos interruptores manuales para seguridad ya que este equipo maneja corriente y voltaje altos se debe de poder detener la prueba en caso de que se corra algún riesgo, estos interruptores son dos botones que la persona que este realizando la prueba debe de mantener presionados durante todo el tiempo que el equipo dure realizando trabajando así si se presenta algún problema solo deja de presionarlos y el equipo dejara de generar el voltaje y la corriente de prueba.

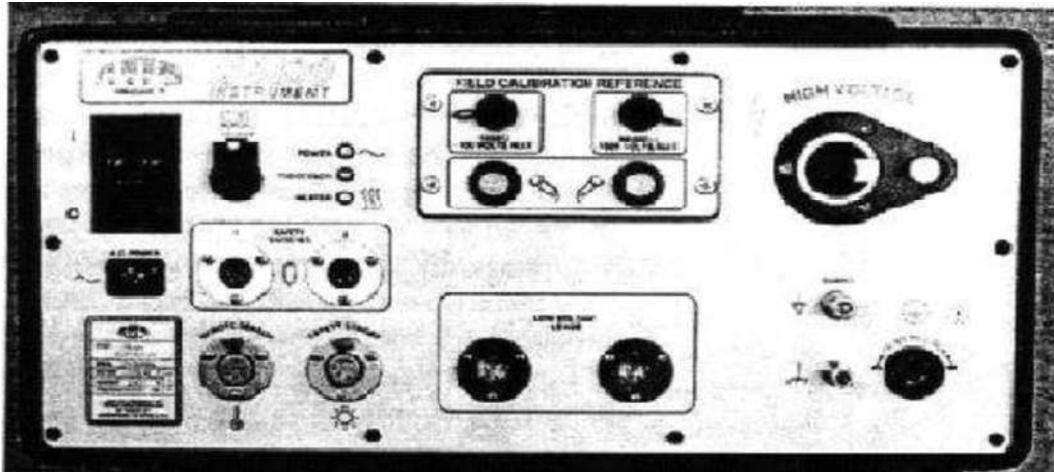


Figura 3.1.- M4100 Analizador de aislamiento

### 3.1.1.2 M4200 Computadora Portátil

Esta es la interfaz entre el operador y el M4100, es una computadora portátil diseñada para resistir uso rudo, ha sido aislada para que no le afecten las descargas electrostáticas ya que las pruebas son de campo, cuenta con un procesador que le permite ejecutar el software M4000 bajo la supervisión del sistema operativo de Microsoft Windows versión 3.1, se comunica con el M4100 por medio de un cable conector que llega al puerto serie.

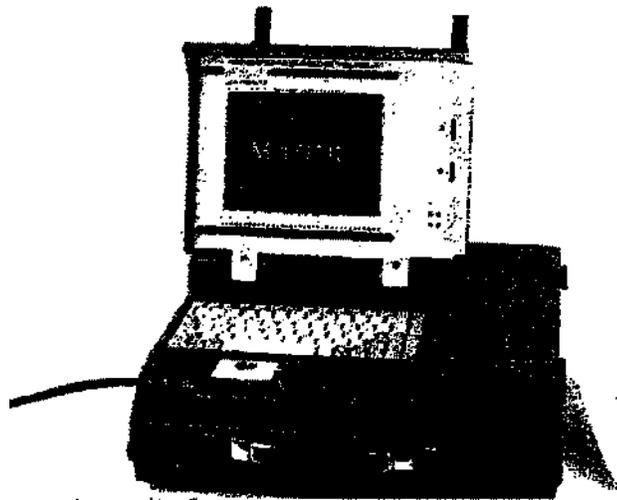


Figura 3.2.- Computadora portátil de uso rudo

### 3.1.1.3 Software M4000

Brinda un ambiente grafico para realizar las pruebas ya que nos permite introducir los datos de placa del transformador como observar los resultados de una manera ordenada, este software viene incluido en el M4200 o en discos de 3 1/2 pulgadas para ser cargado en el M4200.

### 3.1.1.4 M4150 Referencia para la Calibración en el Campo

Permite calibrar el M4100 con referencia a las características climáticas del lugar geográfico donde se realizaran las pruebas, el M4150 ya viene montado en el M4100.

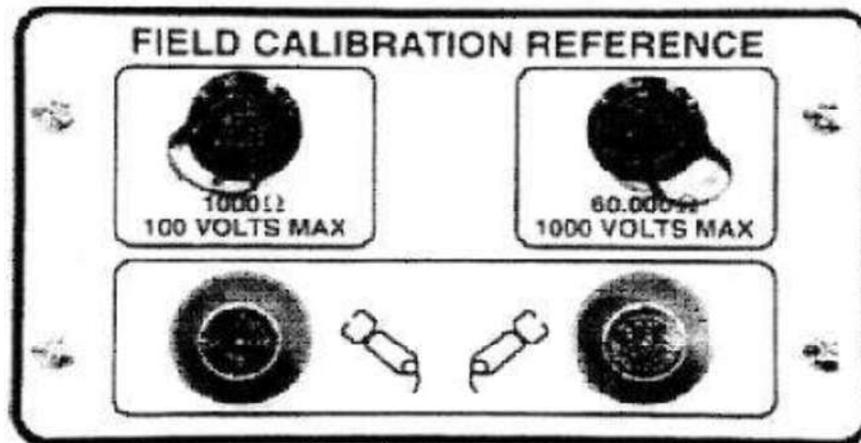


Figura 3.3.- M4150 Calibrador

## 3.1.2 Componentes Auxiliares para el M4000:

### 3.1.2.1 M4110 Interfaz de Reactancia de Dispersión

Es la interfaz que contiene el circuito necesario para convertir el voltaje y la corriente medida durante la prueba de reactancia de dispersión realizada a un transformador, en la forma que pueda ser medida por el instrumento M4100. También tiene un variador para obtener el apropiado voltaje de prueba, la prueba de reactancia de dispersión no puede ser realizada sin esta interfaz.

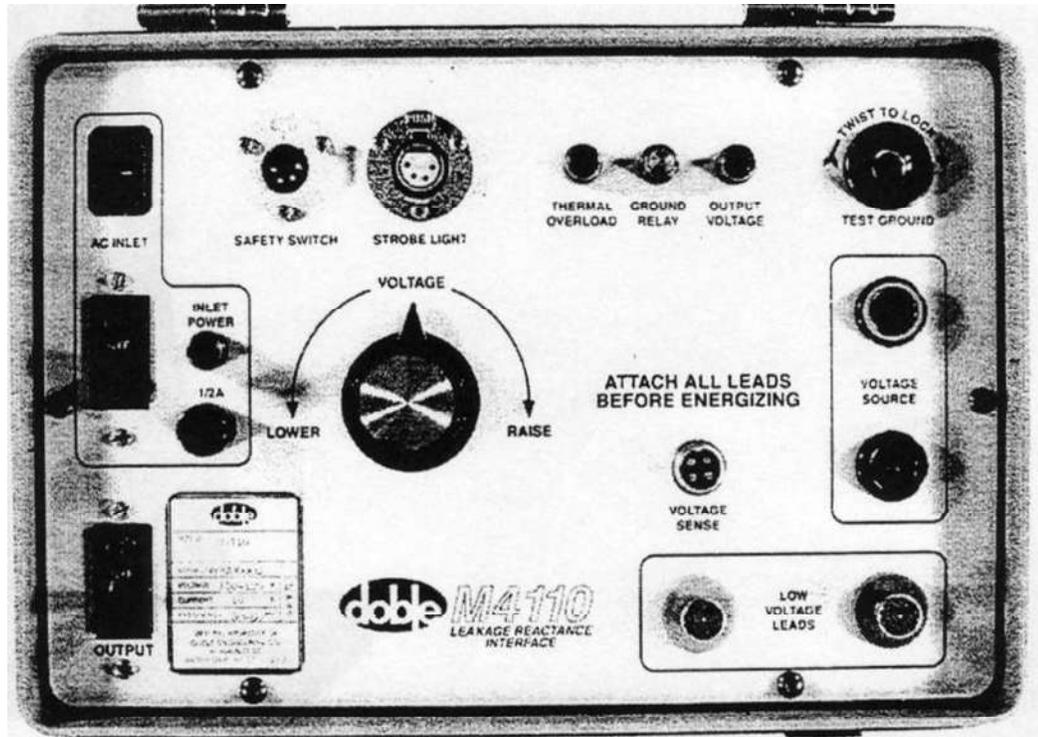


Figura 3.4.- M4110 Módulo de prueba de reactancia de dispersión

Este modulo viene por separado del M4100 lo cual significa que se necesita conectarlos entre si mas adelante se mostraran los diagramas de conexión entre los dos equipos.

El M4300 es el medio para transportar todos los componentes del M4000 y cuenta con todas las comodidades para facilitar su desplazamiento con todos sus componentes conectados facilitando así el transporte de todo el equipo ya que las pruebas son realizadas en campo.

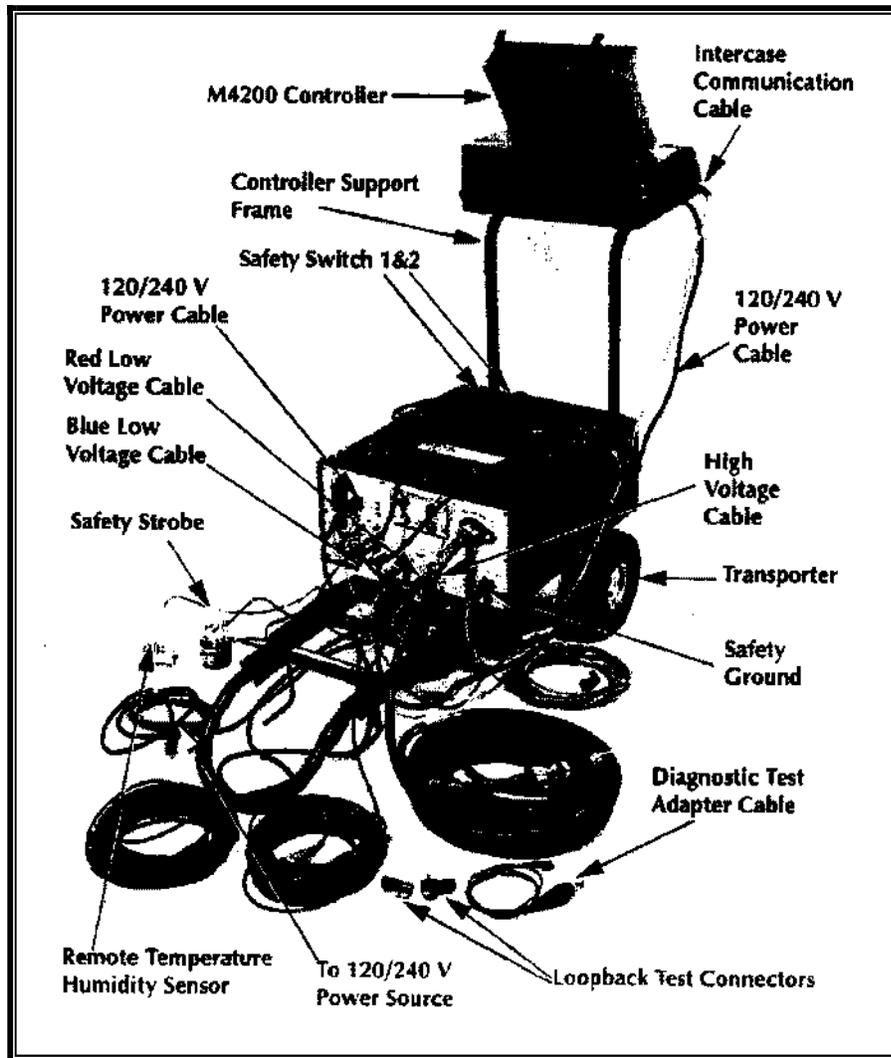


Figura 3.5.- M4300 incluye los componentes del M4000

Con este equipo y sus componentes descritos anteriormente se pueden realizar tres de las cuatro pruebas que se presentan en este documento. A continuación se muestra una explicación de ellas y una explicación dada por el fabricante para el análisis de los resultados obtenidos de cada una de ellas.

### **3.2 Prueba de Corriente de Excitación para Transformadores**

El uso de equipo de prueba doble en la medición de corrientes de excitación ( $I_e$ ) durante pruebas de rutina para mantenimiento preventivo, han sido recomendadas desde 1967. Estas pruebas han sido efectivas en la detección y confirmación de fallas como:

- Corto circuito en aislamiento entre espiras
- Problemas en el cambiador de carga
- Aterrizamiento anormal del Núcleo

#### **3.2.1 Consideraciones para la Prueba**

El procedimiento de esta prueba para realizar la medición de las corrientes de excitación de los transformadores ha sido modificado para mejorar la efectividad de esta técnica en la detección de posibles defectos, y para reducir el tiempo de realización en las pruebas de rutina. Las siguientes instrucciones resumen esta técnica y puede servir como una útil guía en la realización de pruebas de este tipo.

-Todas las cargas deben ser desconectadas y se debe de desenergizar el transformador.

-Las pruebas usualmente son limitadas a los devanados de alto voltaje, los defectos en los devanados de bajo voltaje serán detectados, y las corrientes de carga serán reducidas.

-Las terminales de los devanados que en servicio se encuentran aterrizadas se deben de conectar a tierra durante la prueba, excepto por el devanado que se encuentre energizado para la prueba.

-Se debe de tener precaución en la proximidad de todas las terminales del transformador porque un voltaje será inducido durante la prueba.

-El seleccionador de TAP deberá estar en la posición neutral.

-Todas las pruebas de corriente de excitación realizadas con esta técnica de Doble son llevadas a cabo sin aterrizar el espécimen en prueba (modo UST).

-Los voltajes de prueba deben ser los mas altos posibles pero estos no deben exceder el rango de voltaje de línea a línea en el caso de que los devanados se encuentren conectados en Delta, y el rango de línea a neutro en el caso de que los devanados se encuentren conectados el Estrella (Y).

-La probabilidad de que el magnetismo residual de magnitud considerable afecte a los resultados es muy poca.

### 3.2.2 Procedimiento para realizar Prueba y Diagramas de Conexión

A continuación se resumen las conexiones de prueba recomendadas para pruebas de rutina y pruebas investigatorias, así como, patrones para el análisis de resultados obtenidos.

#### 3.2.2.1 Medición de $I_E$ para Transformadores con Devanados Conectados en Estrella (Método de Rutina).

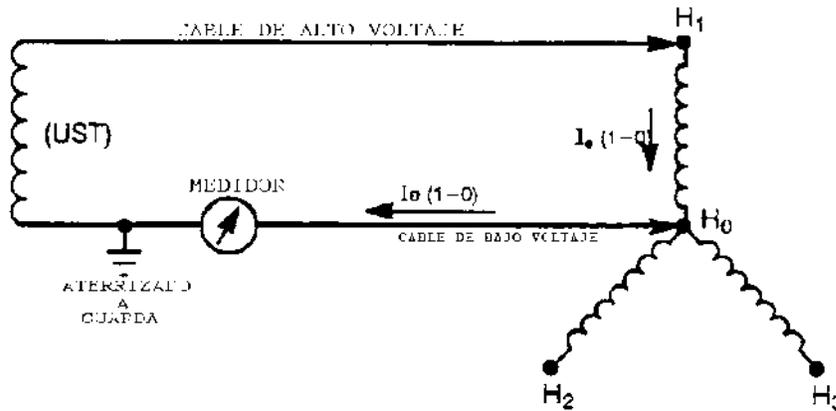


Figura 3.6.- Método de rutina para conexión Estrella

No. de Prueba	Modo De Prueba	Energizar	Aterrizar a Guarda	Aterrizar	Dejar Flotando	$I_e$ Medida
1	UST	H <sub>1</sub>	H <sub>0</sub>	*	H <sub>2</sub> H <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> (Y <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> )	H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub>
2	UST	H <sub>2</sub>	H <sub>0</sub>	*	H <sub>1</sub> H <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> (Y <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> )	H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub>
3	UST	H <sub>3</sub>	H <sub>0</sub>	*	H <sub>1</sub> H <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> (Y <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> )	H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub>

\* Las terminales normalmente aterrizadas de los devanados X y/o Y deben ser aterrizadas.

Tabla 1.- Procedimiento de rutina de la prueba para devanados en Estrella

**3.2.2.2 Medición de  $I_E$  para Transformadores con Devanados Conectados en Delta (Método De Rutina).**

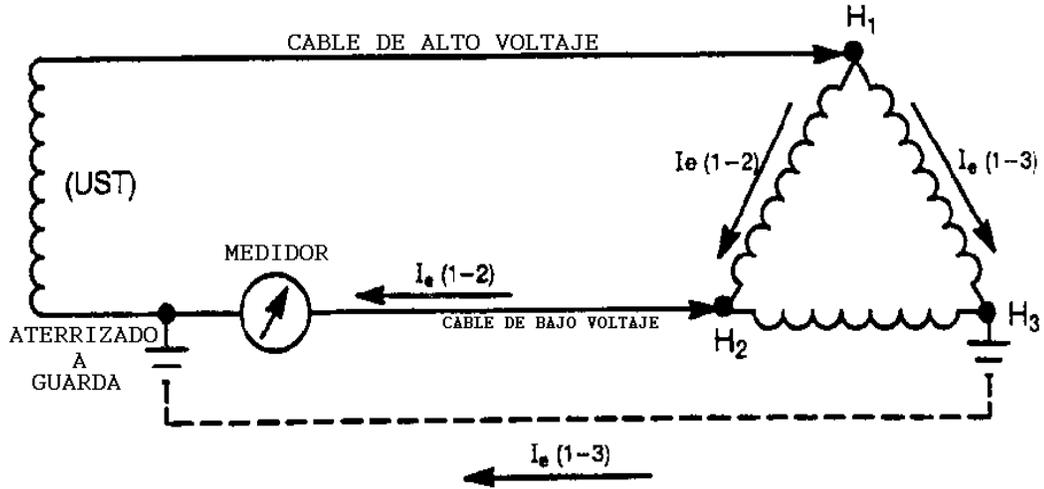


Figura 3.7.- Método de rutina para conexión Delta.

Para este tipo de conexión la corriente que circula de  $H_1$  a  $H_3$  no afecta a la medición de la corriente que circula de  $H_1$  a  $H_2$

No. de Prueba	Modo de Prueba	Energizar	Aterrizar a Guarda	Aterrizar	Dejar Flotando	$I_e$ Medida
1	UST	$H_1$	$H_2$	$H_3^*$	$X_1X_2X_3$ $(Y_1Y_2Y_3)$	$H_1-H_2$
2	UST	$H_2$	$H_3$	$H_1^*$	$X_1X_2X_3$ $(Y_1Y_2Y_3)$	$H_2-H_3$
3	UST	$H_3$	$H_1$	$H_2^*$	$X_1X_2X_3$ $(Y_1Y_2Y_3)$	$H_3-H_1$

\* Las terminales normalmente aterrizadas de los devanados X y/o Y deben ser aterrizadas.

Tabla 2.- Procedimiento de la prueba para devanados en Delta

Si los resultados no dan un resultado claro, Doble presenta los siguientes procedimientos alternativos para verificarlos, estos procedimientos se basan en el funcionamiento anteriormente descrito por lo tanto no requieren de una explicación específica.

### 3.2.2.3 Medición de $I_E$ para Transformadores con Devanados Conectados en Estrella (Método Alternativo).

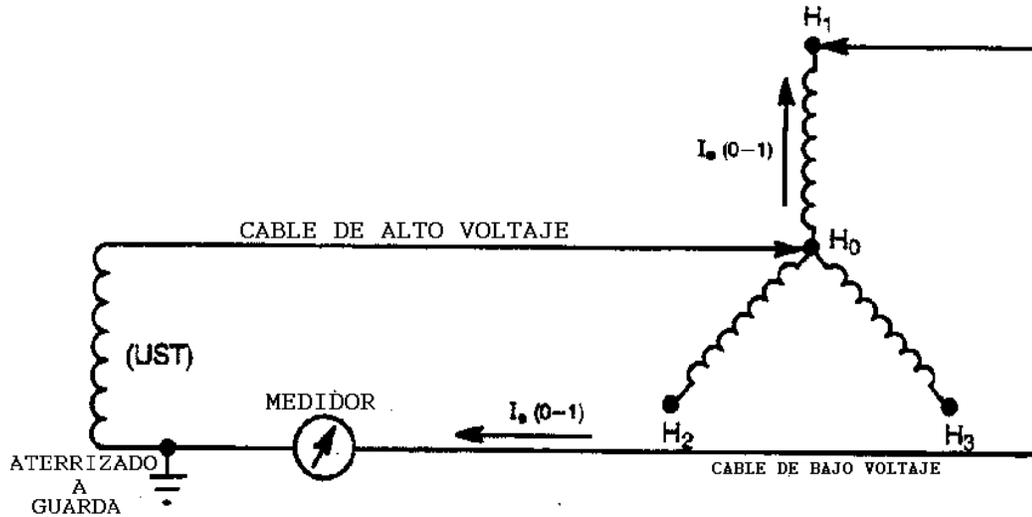


Figura 3.8.- Método alternativo para conexión Estrella

No. De Prueba	Modo De Prueba	Energizar	Aterrizar a Guarda	Aterrizar	Dejar Flotando	$I_e$ Medida
1	UST	H <sub>0</sub>	H <sub>1</sub>	*	H <sub>2</sub> H <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> (Y <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> )	H <sub>0</sub> -H <sub>1</sub>
2	UST	H <sub>0</sub>	H <sub>2</sub>	*	H <sub>1</sub> H <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> (Y <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> )	H <sub>0</sub> -H <sub>2</sub>
3	UST	H <sub>0</sub>	H <sub>3</sub>	*	H <sub>1</sub> H <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> (Y <sub>1</sub> Y <sub>2</sub> Y <sub>3</sub> )	H <sub>0</sub> -H <sub>3</sub>

\*Las terminales normalmente aterrizadas de los devanados X y/o Y deben ser aterrizadas.

Tabla 3.- Procedimiento de la prueba (método alternativo) para devanados en Estrella.

**3.2.2.4 Medición de  $I_E$  para Transformadores Con Devanados Conectados En Delta (Método Alternativo).**

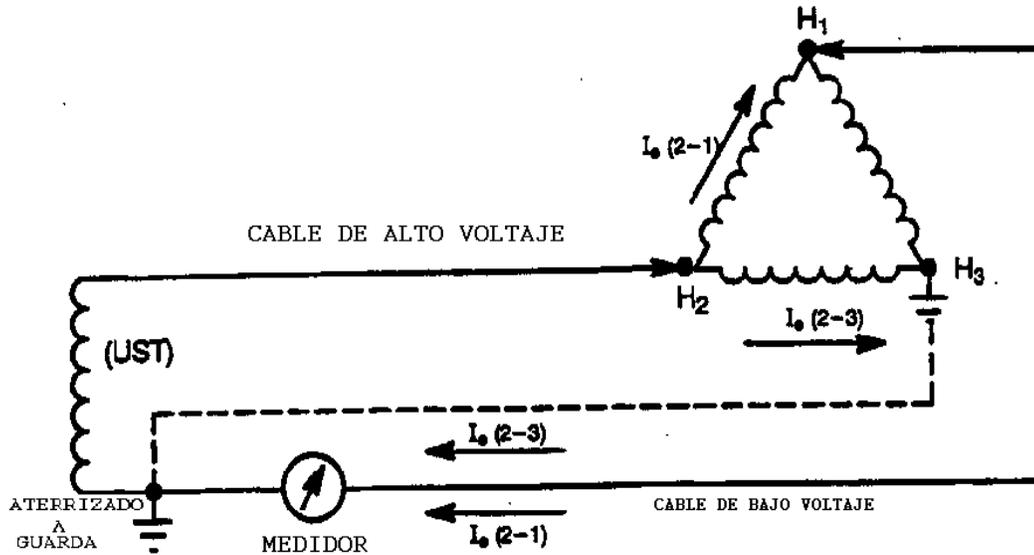


Figura 3.9.- Método alternativo para conexión en Delta

No. De Prueba	Modo De Prueba	Energizar	Aterrizar a Guarda	Aterrizar	Dejar Flotando	$I_e$ Medida
1	UST	$H_1$	$H_2$	$H_3^*$	$X_1X_2X_3$ ( $Y_1Y_2Y_3$ )	$H_1-H_2$
2	UST	$H_2$	$H_3$	$H_1^*$	$X_1X_2X_3$ ( $Y_1Y_2Y_3$ )	$H_2-H_3$
3	UST	$H_3$	$H_1$	$H_2^*$	$X_1X_2X_3$ ( $Y_1Y_2Y_3$ )	$H_3-H_1$

\*Las terminales normalmente aterrizadas de los devanados X y/o Y deben ser aterrizadas.

Tabla 4.- Procedimiento de la prueba (método alternativo) para devanados en Delta.

**3.2.2.5 Medición de  $I_E$  para Transformadores con Devanados Conectados en Delta (Método Alternativo 2).**

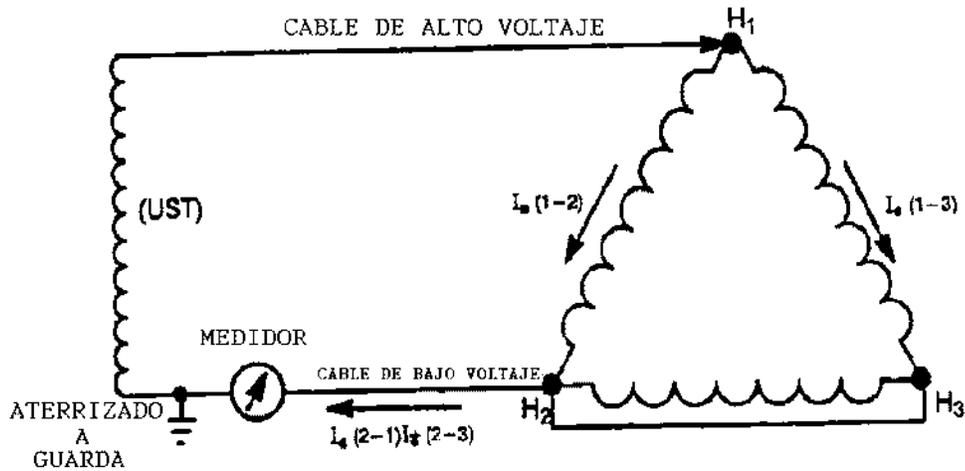


Figura 3.10.- Método alternativo 2 para conexión Delta

No. de Prueba	Modo de Prueba	Energizar	Aterrizar a Guarda	Aterrizar	Dejar Flotando	$I_e$ Medida
1	UST	$H_1$	$H_2, H_1$	*	$X_1 X_2 X_3$	$(H_1 - H_2) + (H_1 - H_3)$
2	UST	$H_2$	$H_1, H_3$	*	$X_1 X_2 X_3$	$(H_2 - H_1) + (H_2 - H_3)$
3	UST	$H_3$	$H_1, H_2$	*	$X_1 X_2 X_3$	$(H_3 - H_2) + (H_3 - H_1)$

\*Si los devanados de bajo voltaje están conectados en Estrella  $X_0$  debe ser aterrizada

Tabla 5.- Procedimiento de la prueba (método alternativo 2) para devanados en Delta.

### 3.2.3 Análisis de los Resultados Obtenidos

Las corrientes de los devanados de alto voltaje obtenidas con el desarrollo de estas pruebas, pueden ser comparadas con las obtenidas de transformadores similares, o con las obtenidas en pruebas previas al mismo transformador.

Para transformadores de potencia trifásicos, los resultados obtenidos de cada fase también pueden ser comparados entre ellos, observando el siguiente patrón, particularmente en los transformadores conectados en estrella, para las fases laterales del transformador respecto al núcleo, las cuales deben tener corrientes similares con alrededor del doble de la obtenida para la fase central. La corriente más baja del devanado enrollado en la pierna central de un núcleo de tres piernas, es atribuida a la baja reluctancia del circuito magnético de la fase central.

En el diagrama para el método de rutina para un transformador conectado en Delta, se muestra el devanado que está desenergizado ( $H_2-H_3$ ) para esta conexión hay una desviación en el medidor durante la prueba, en muchos de los casos esta desviación tiene un efecto casi nulo en las mediciones de la prueba, el patrón que siguen las corrientes es que son dos corrientes similares y grandes y la tercera es más baja.

Cuando se obtienen resultados que no cumplen con este patrón, mejor dicho cuando se tiene una corriente baja y dos corrientes altas pero estas no son similares. Este último patrón puede ser atribuido al magnetismo residual ó al efecto de desviación del devanado que esta desenergizado. Para eliminar este efecto cuando se tienen duda acerca de los resultados Doble recomienda utilizar el método alternativo 2. Con este método se obtiene la medición de dos corrientes paralelas, un patrón de comportamiento es que existen dos corrientes similares, con una tercera un poco más alta que la más baja obtenida por fases individuales.

Asumiendo que las corrientes obtenidas de forma individual son las mismas sin importar el orden de las puntas del equipo de medición, esto es de  $H_1$  a  $H_2$  y  $H_2$  a  $H_1$ , entonces las corrientes individuales pueden ser calculadas sumando las corrientes

obtenidas para cualquiera de las dos mediciones, restando la tercera, y dividirla entre dos. Dividiendo entre dos obtendremos la corriente del devanado  $H_1 - H_2$ .

### **3.3 Prueba de Factor de Potencia, también conocido como prueba general de Doble (Overall Test)**

Su efectividad se debe a que los parámetros medidos son las características fundamentales del aislamiento. Cualquier cambio (movimiento físico, deformación, deterioro ó contaminación), en una o más de las características fundamentales del aislamiento, son detectables.

Ventajas de pruebas (ensayos) en corriente alterna vs. corriente directa:

- Las pruebas en CA, no son obstaculizadas por una capa de aislamiento en "buen estado" en serie con una capa en "mal estado", puesto que solo requiere de acoplamiento capacitivo.
- Las pruebas en CA tienen un común denominador basado en una relación (porcentaje de Factor de Potencia). Esta relación es independiente de la cantidad de aislamiento del espécimen.
- Las pruebas en CA proveen un método de medición directo de pérdidas en el dieléctrico y capacitancia. Ambos parámetros son usados para la evaluación del deterioro del aislamiento.

#### **3.3.1 Limitaciones de las pruebas de Factor de Potencia en Corriente Alterna.**

- La facultad para detectar fallas y su ubicación, se reduce proporcionalmente al incremento de las pérdidas y capacitancia inherentes al espécimen. Es decir, a mayores pérdidas y mayor capacitancia, menor efectividad para detectar fallas y su ubicación.
- Los defectos ó fallas dependientes de un voltaje determinado, no serán detectados si el voltaje de prueba no es mayor a ese voltaje.

En la teoría de corriente alterna, un sistema de aislamiento sin importar su complejidad, puede ser representado como un elemento capacitivo primario, considerando también el efecto resistivo del mismo.

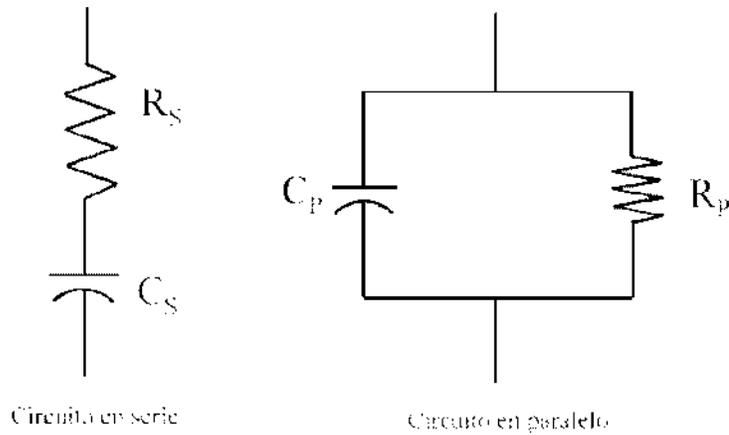


Figura 3.11.- Representación simple de modelos de aislamiento.

Para explicar un poco mejor los diagramas se toman en cuenta estas leyes básicas de la electricidad:

- Para que haya flujo de corriente entre dos puntos de un circuito, debe existir una diferencia de potencial
- La corriente SIEMPRE regresa a su fuente de origen.
- La corriente SIEMPRE toma el camino de menor resistencia.

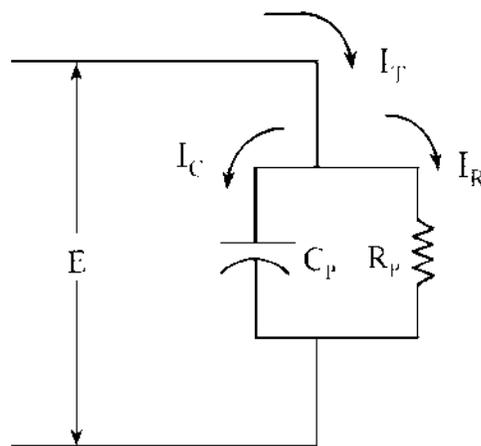


Figura 3.12.- Flujos de corrientes

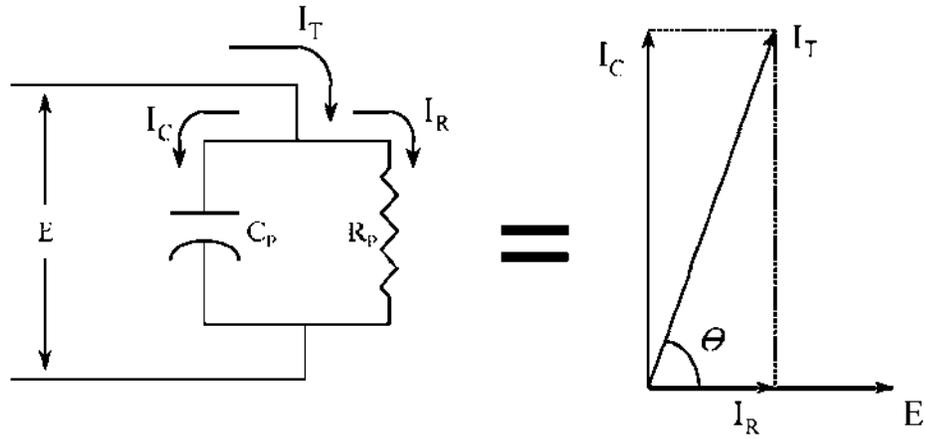


Figura 3.13.- Flujos y vectores de las corrientes

Para la generalidad de los sistemas de aislamiento  $I_C \gg I_R$

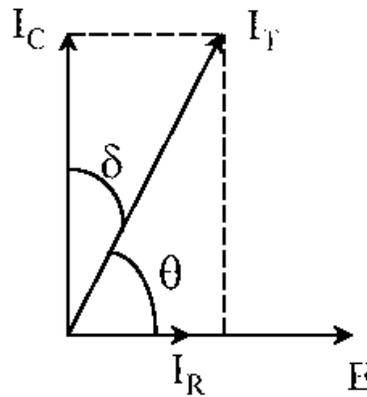


Figura 3.14.- Ángulos del factor de potencia y del factor de disipación

De la figura obtenemos que:

$$\cos \theta = \frac{I_R}{I_T} \quad \text{Factor de Potencia} \quad (3.1)$$

$$\tan \theta = \frac{I_R}{I_C} \quad \text{Factor de Disipación} \quad (3.2)$$

Ejemplos de comparación entre el Factor de Potencia y el Factor de Disipación.

$\phi$	% FP ( % $\cos \phi$ )	$\delta$	% FD ( % $\tan \delta$ )
90	0	0	0
89.71	0.5	0.29	0.5
84.26	10	5.74	10.05
0	100	90	$\infty$

Tabla 6.- Comparaciones entre el factor de Potencia y el factor de Disipación

### 3.3.2 Opciones de Conexión para el Método Doble

El método Doble nos da las opciones de tres modos para conectar el espécimen al equipo para realizar las pruebas.

#### 3.3.2.1.- Método 1: Especimen Aterrizado (Gst-Ground)

En este método el espécimen en prueba se conecta junto con el equipo a tierra.

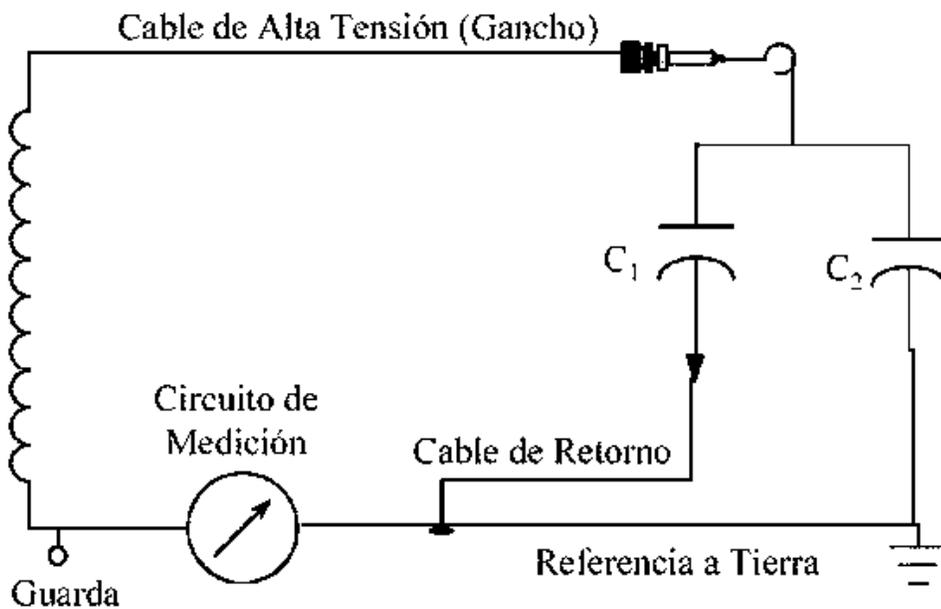


Figura 3.15.-Modo de conexión GST

### 3.3.2.2.-Metodo 2: Espécimen Aterrizado en Guarda (Gst-Guard)

En este método el espécimen en prueba se aterriza a un hilo de guarda.

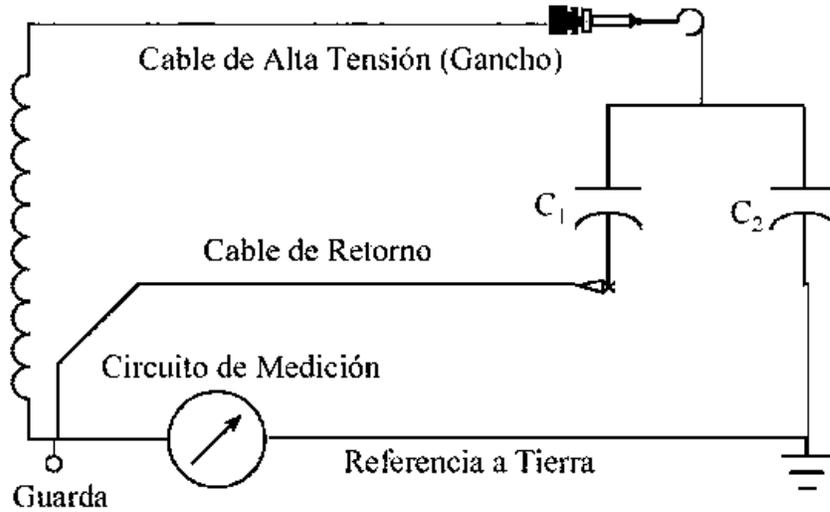


Figura 3.16.- Modo de conexión GST-Guard

### 3.3.2.3.-Espécimen sin Aterrizar (UST)

En este método el espécimen que esta en prueba no se aterriza solo el equipo de medición tiene una referencia a tierra.

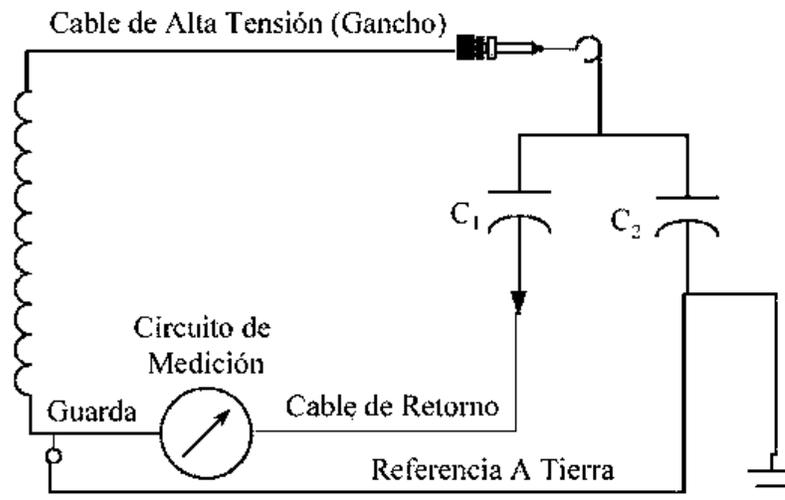


Figura 3.17.- Modo de conexión UST

Las pruebas Doble para el sistema de aislamiento de Transformadores, son un método comprensivo para detectar: Humedad, Contaminación y Falla Mecánica.

La técnica de prueba facilita la separación de los componentes del sistema de aislamiento del transformador, para un análisis más efectivo.

Para representar un transformador de dos devanados y sus componentes para entender mejor como están constituidos y cuales son los componentes que DOBLE toma para la realización de estas pruebas podemos observar las siguientes figuras.

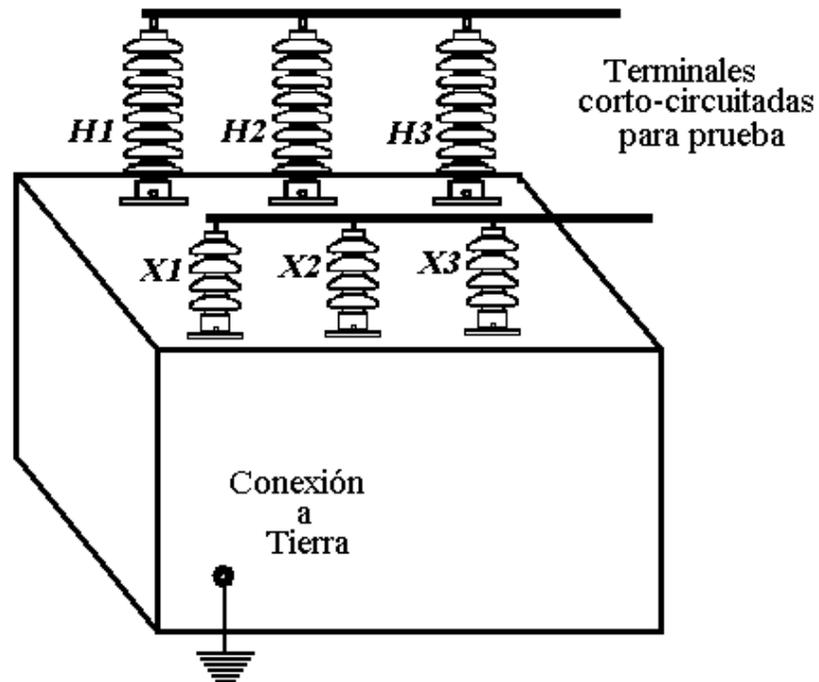


Figura 3.18.- Representación de un transformador trifásico de dos devanados

Por lo que al cortocircuitar las terminales de los dos devanados lo podemos representar de la siguiente forma:

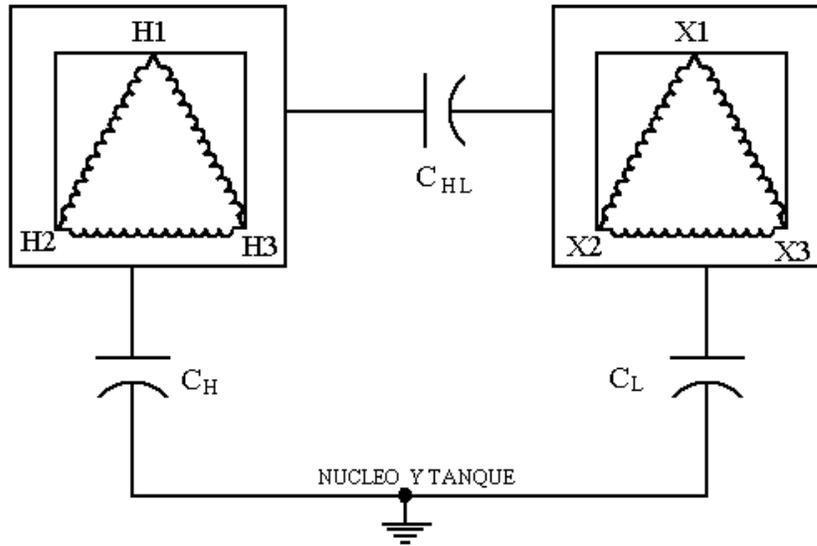


Figura 3.19.- Componentes resultantes de Aislamiento para un transformador de dos devanados en conexión delta – delta

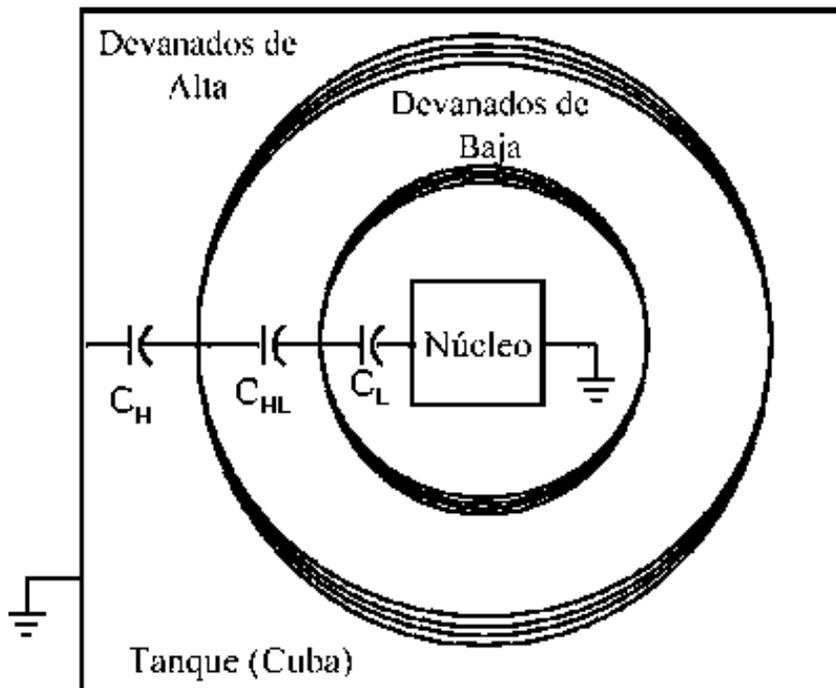


Figura 3.20.- Transformador de dos devanados

De la figura anterior podemos obtener el circuito dieléctrico de un transformador de dos devanados el cual seria de la siguiente forma.

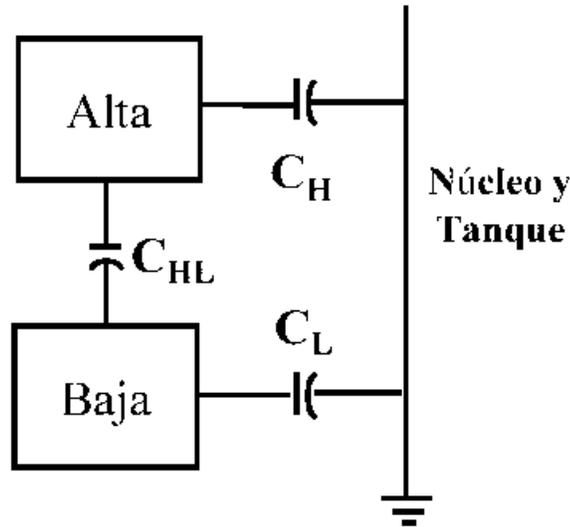


Figura 3.21.- Circuito dieléctrico

Donde:

$C_H$  - Aislamiento entre conductores de Alta y Tierra (Núcleo más el Tanque aterrizado, incluyendo Boquillas de Alta, Devanado, elementos estructurales, y Aceite).

$C_L$  - Aislamiento entre conductores de Baja y tierra (Núcleo más el Tanque aterrizado, incluyendo Boquillas de Baja, Devanado, elementos estructurales, y Aceite).

$C_{HL}$  - Aislamiento entre Devanados (Barreras aislantes, Aceite).

Conociendo los componentes que se utilizan en la técnica Doble para las pruebas se deben tomar consideraciones para preparar un transformador antes de empezar a realizar las pruebas tales como:

- El transformador deberá estar desenergizado y aislado del sistema.
- Estar adecuadamente aterrizado.
- Tener las terminales de cada devanado conectadas (incluyendo neutrales), para eliminar el efecto inductivo en las mediciones.
- Si tiene cambiador de TAP (LTC); deberá estar fuera de la posición neutral.

Para la realización de las pruebas Doble recomienda seguir un procedimiento donde se dice el orden de las pruebas, de igual forma nos da las conexiones de los devanados y en que modo de los anteriormente descritos se debe de conectar el espécimen, este orden se da en la siguiente tabla.

No. De Prueba	Modo	Energizar	Aterrizar	Guarda	Sin Aterrizar	Medición
1	GST	Alta	Baja	-	-	$C_H + C_{HL}$
2	GST	Alta	-	Baja	-	$C_H$
3	UST	Alta	-	-	Baja	$C_{HL}$
4	GST	Baja	Alta	-	-	$C_L + C_{HL}$
5	GST	Alta	-	Alta	-	$C_L$
6	UST	Baja	-	-	Alta	$C_{LH}$

Tabla 7.- Procedimiento de la prueba

Este procedimiento Doble lo programó en el software en la computadora portátil que acompaña al M4000 llamado Asistente Digital de Prueba, en sus siglas en ingles DTA, como se muestra en la figura siguiente.

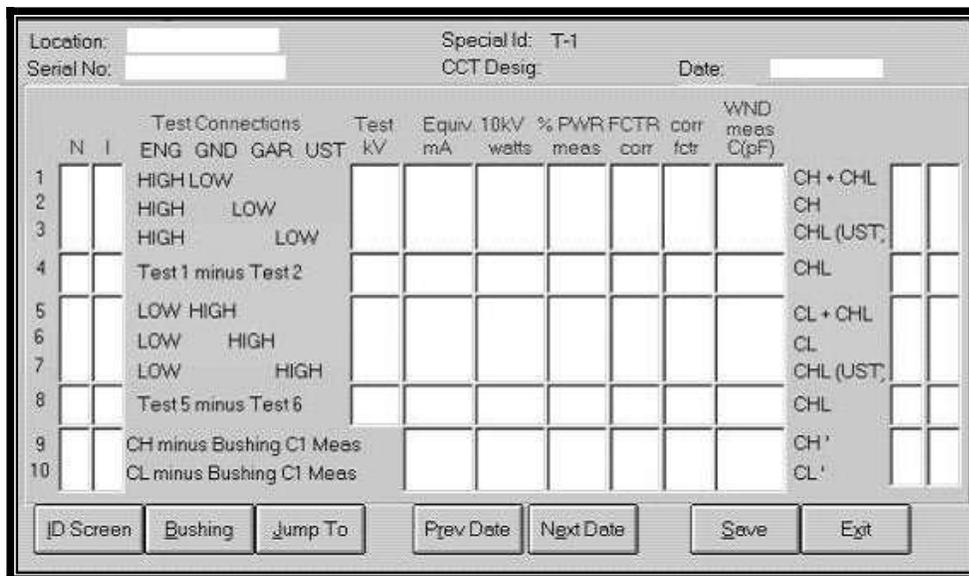


Figura 3.22.- Procedimiento DTA preprogramado

### **3.3.3 Análisis de Resultados de la Prueba General de Doble (OVERALL TEST)**

Para que los resultados obtenidos de esta prueba sean bien entendidos y se pueda dar un dictamen acerca de la condición del aislamiento del transformador se deben tomar en cuenta las siguientes instrucciones.

- Transformadores construidos después de 1957, deben presentar un Factor de Potencia menor ó igual a 0.5% corregido a 20° C.
- Transformadores construidos anteriormente a 1957 podrán presentar Factor de Potencia mayor a 0.5%.
- En transformadores construidos recientemente se encuentran valores del factor de potencia alrededor de 02%.
- En casos de transformadores construidos después de 1990 puede presentar valores menores a 5%, para realizar un buen diagnostico es necesario apoyarse en otras pruebas como son: corriente de excitación, reactancia de dispersión y respuesta a la frecuencia.
- La Capacitancia es una función de la geometría del espécimen y no se esperan cambios con la edad. Cambios de capacitancia son indicativos de cambios físicos.
- Factor de Potencia anormal (muy alto, muy bajo, ó negativo), puede ser indicativo de aterrizamiento dudoso ó blindaje entre devanados.
- Los datos obtenidos deben de compararse con datos de placa (fábrica), resultados previos o con unidades similares.

### **3.4 Prueba de Reactancia de Dispersión**

La medición de reactancia de dispersión nos revela movimiento de los devanados, circuitos abiertos o espiras en corto circuito. Cuando ocurre un corto circuito en el sistema de potencia una corriente muy alta fluye a través de los transformadores, estas a su vez desarrollan fuerzas electromagnéticas que exponen a los devanados a esfuerzos radiales y axiales extremadamente altos que causan desplazamientos mecánicos que mas tarde se convertirán en fallas en los transformadores.

Estos desplazamientos se presentan afectando el transformador de las siguientes formas:

- Los devanados se mueven axialmente.
- Los devanados se deforman o distorsionan.
- Los devanados se tornan en forma oblicua.
- En transformadores tipo acorazado se colapsan en forma de abanico.

Cuando estos desplazamientos ocurren afectan varias propiedades del transformador provocando cambios que afectan su funcionamiento:

- Suceden cambios en la capacitancia de los devanados.
- Suceden cambios en la corriente de excitación.
- La reactancia de dispersión cambia si el movimiento es notable o solo con una pequeña distorsión.
- Suceden pequeños cambios en la relación de transformación si el desplazamiento es fuerte, si es pequeño no puede ser notorio.

Todo flujo que no se aprovecha en ambos devanados se dispersa hacia el tanque, hacia el espacio entre devanados y hacia el espacio confinado para el medio aislante se representa como una inductancia por cada devanado y se le denomina de dispersión. Este flujo de dispersión depende mucho de la geometría del devanado por lo que cualquier cambio en ella modificara la reactancia de dispersión.

#### **3.4.1 Procedimiento de Prueba para Transformadores Trifásicos de Dos Devanados.**

Con el analizador de aislamiento M4000 de Doble, la reactancia de dispersión de un transformador trifásico puede ser medida usando dos métodos: prueba para el equivalente trifásico o prueba por fase.

### 3.4.1.1 Prueba para el Equivalente Trifásico.

Se desarrollan tres pruebas solo con conectar la fuente de voltaje y las puntas de prueba del modulo de reactancia de dispersión M4110 las terminales de alto y bajo voltaje respectivamente, las tres terminales de alto voltaje son conectadas juntas con puentes, así también las terminales de bajo voltaje, como se muestra en las siguientes figuras, donde se muestran las diferentes conexiones para esta prueba.

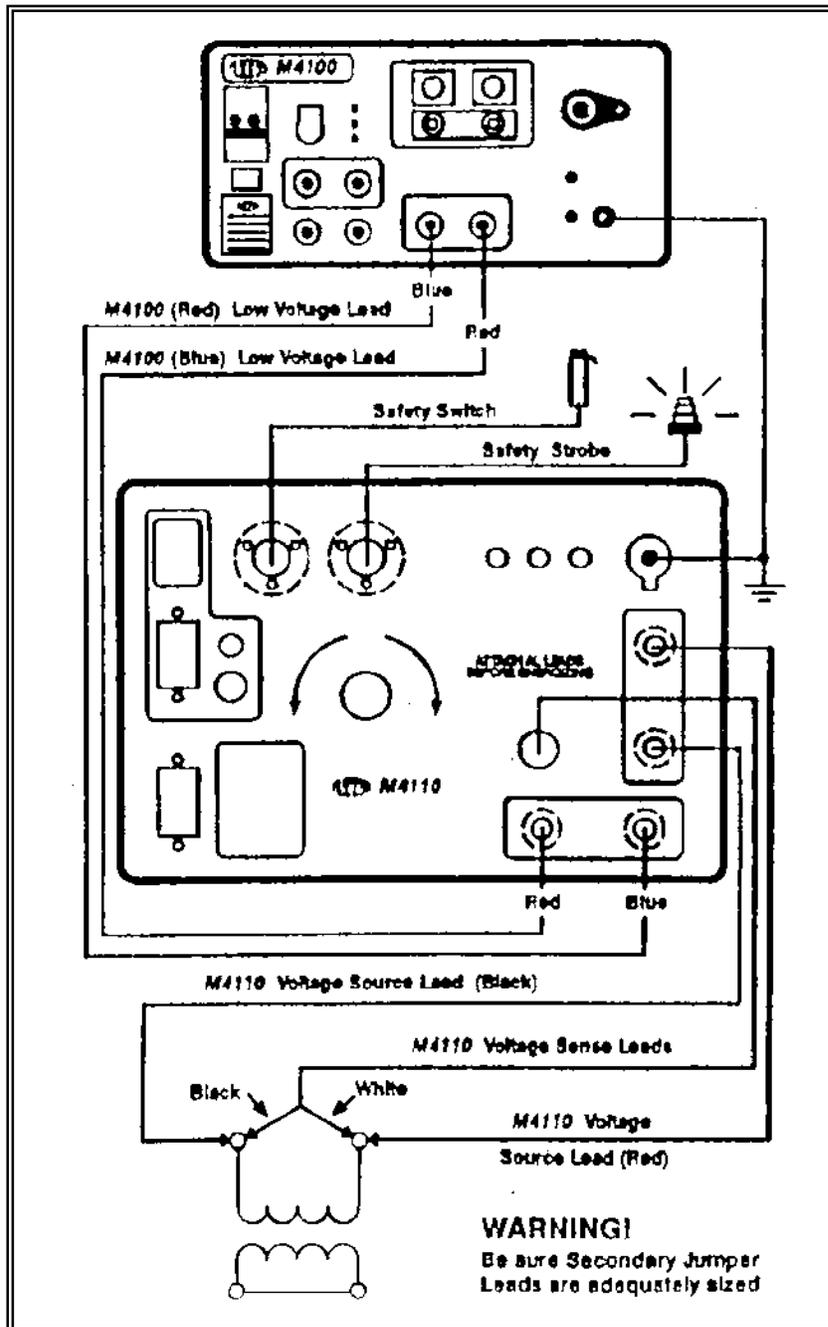


Figura 3.23.- Conexión entre M4000 y M4100 para el equivalente trifásico

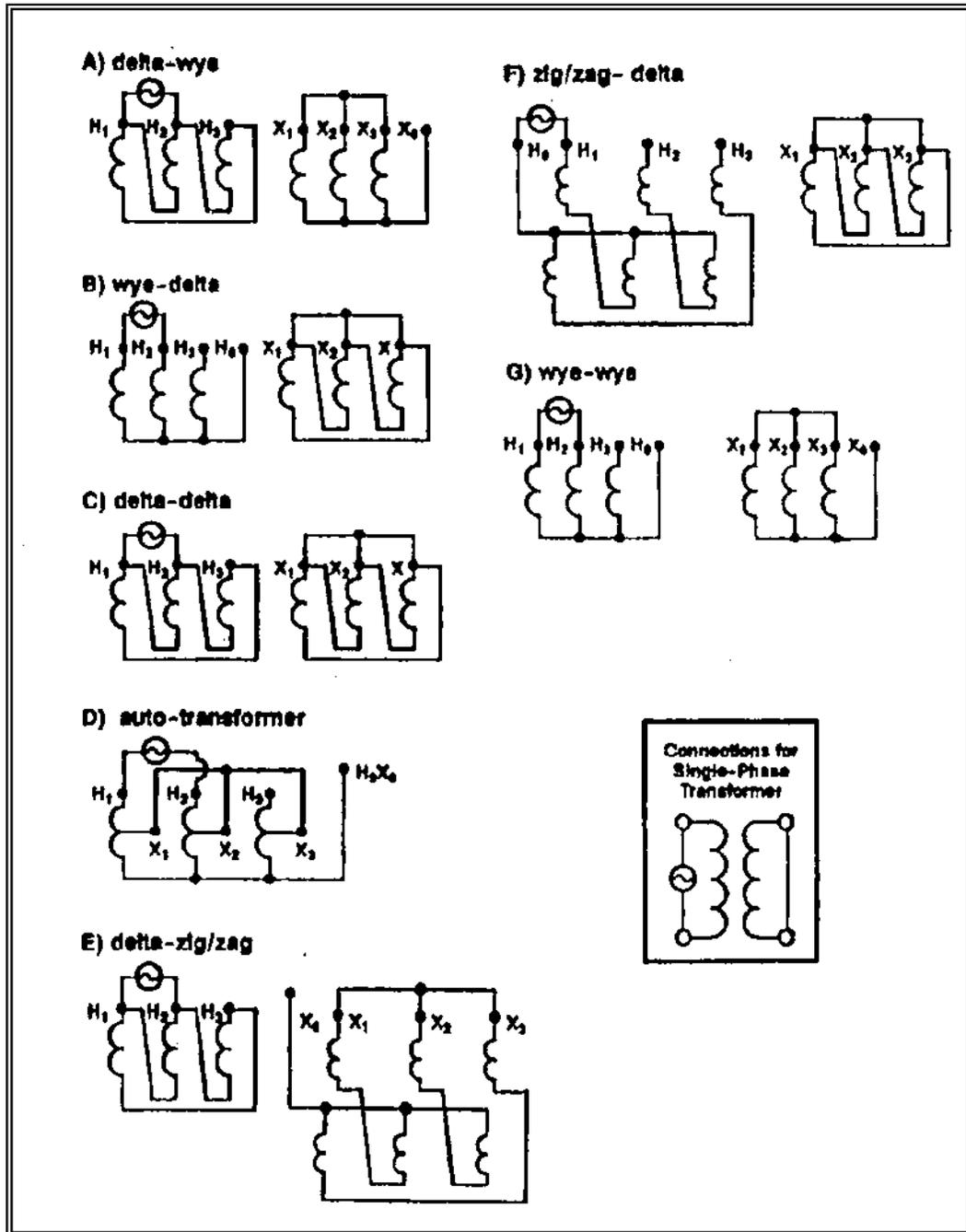


Figura 3.24.- Conexiones de los devanados para la prueba del equivalente trifásico

### 3.4.1.2 Prueba por Fase.

En este caso se desarrolla una prueba por cada fase, se conectan las puntas de prueba de la interfaz de reactancia de dispersión a la línea y al neutro, en el caso de devanados conectados en Estrella y Zig-Zag, y a cada par de líneas para devanados conectados en Delta, como se muestra en las siguientes figuras.

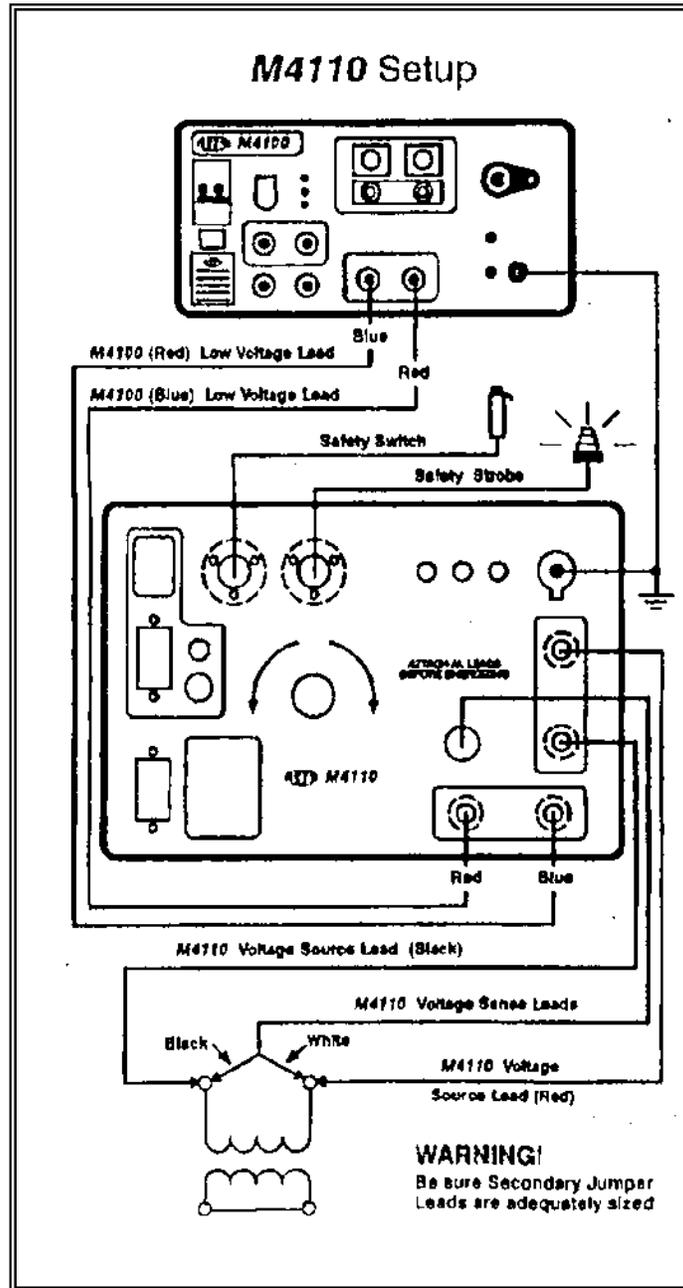


Figura 3.25.- Conexión del M4000 y el M4100 para la prueba por fase

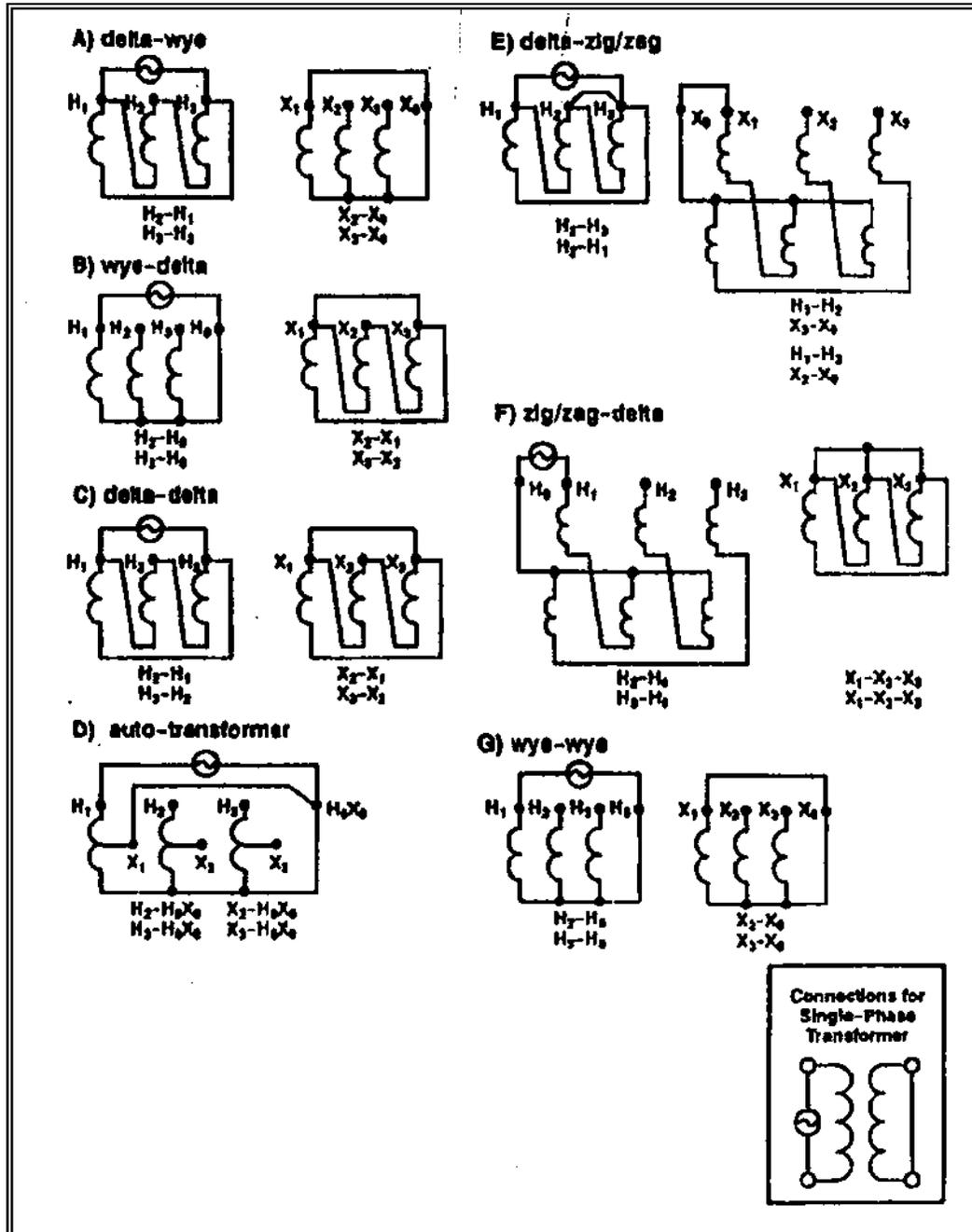


Figura 3.26.- Conexiones de los devanados para la prueba por fase

### 3.4.2 Interpretación de Resultados

Si al analizar los resultados se encuentran variaciones que estén dentro del  $\pm 3 \%$ , indicado en la Norma ANSI/IEEE 62- 1995, esto nos daría el indicativo de que tiene un posible desplazamiento mecánico.

Los resultados de la prueba del equivalente trifásico pueden ser comparados con los datos de placa o con pruebas previas, la prueba por fase se debe analizar tomando en cuenta resultados de otras pruebas como son: factor de potencia, corriente de excitación y análisis en respuesta a la frecuencia, para tomar una buena decisión acerca del destino del transformador probado.

### 3.5 M5100 Analizador de la Respuesta al Barrido de Frecuencia

El Analizador de la respuesta al barrido de frecuencia o SFRA por sus siglas en ingles (Sweep Frequency Response Analyzer) es una herramienta que puede dar una indicación de movimientos de los devanados en los transformadores o cualquier falla en los mismos. Esto se hace realizando una medición para observar la forma en que el transformador transmite una señal de bajo voltaje a la cual se le aplica una variación en su frecuencia. La forma en que el transformador transmita esta señal se relaciona con su impedancia, o sea, a los elementos capacitivos e inductivos que están íntimamente relacionados con la construcción física del transformador. Los cambios en la respuesta de la señal aplicada medidos por las técnicas del SFRA indican un cambio físico dentro del transformador.



Figura 3.27 SFRA M5100

El SFRA es una herramienta para investigar la integridad mecánica de los transformadores, reactores y motores ya sea en la fábrica, puestos en operación o después de alguna falla o para tener una referencia.

El M5100, es un instrumento que mide la relación de entrada/salida a lo normalmente se le llama función de transferencia. Haciendo pruebas aplicando un pequeño voltaje y haciendo variar su frecuencia, se obtienen las graficas que representan la respuesta de los devanados del transformador y que al compararse con otras graficas obtenidas con anterioridad o de unidades hermanas, en base a esas comparaciones se deduce el estado del transformador y se toman decisiones acerca de las acciones que se realizaran.

### 3.5.1 Elementos del SFRA

El SFRA es un equipo que ya viene empaquetado todo a excepción de los cables de conexión, el paquete contiene: CPU, unidad de disco duro, teclado con mouse, software, indicadores tipo led, puertos USB y conectores BNC para los cables de prueba. El software es versión 2.0 que inicia automáticamente al encender el equipo permite guardar de forma automática los resultados de las pruebas realizadas así como los datos de placa del transformador en prueba, esto, con la finalidad de generar una base de datos para realizar mas fácilmente las comparaciones, también cuenta con un sistema operativo Windows 2000 instalado.

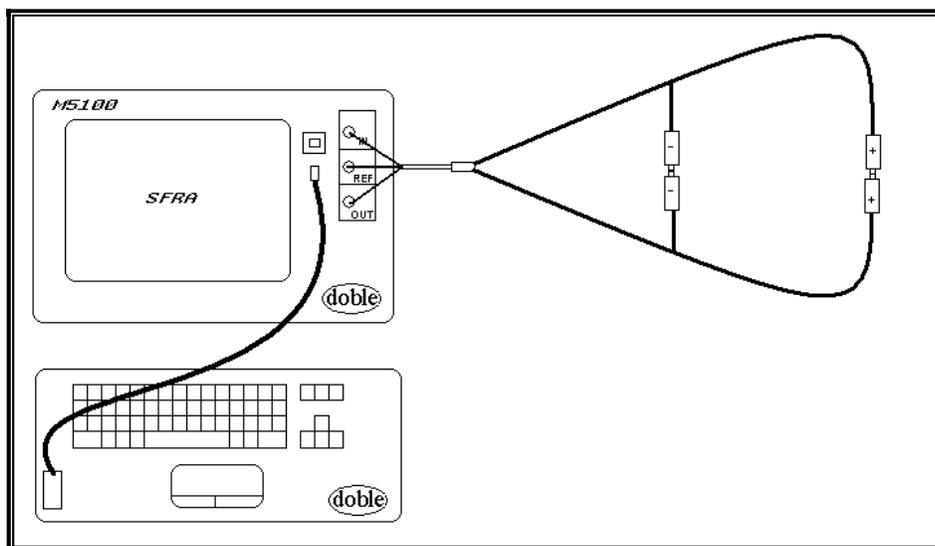


Figura 3.28.- M5100 listo para calibrar

### 3.5.2 Teoría del SFRA para las Pruebas

El análisis de la respuesta al barrido de frecuencia es una gran herramienta para investigar la integridad mecánica de los devanados de los transformadores, este análisis se puede realizar cuando:

- Relocalización del transformador.
- Incidente en línea.
- Para establecer una referencia.
- Prueba de rutina.
- Control de calidad.

En realidad el SFRA es solo una gran cantidad de mediciones individuales realizadas en un amplio rango de frecuencia, con esto el SFRA proporciona graficas de respuesta de cada uno de los devanados, estas a su vez forman lo que se puede llamar firma o huella digital del equipo.

Los componentes R, L y C existen en muchas formas dentro de los transformadores, L y C contribuyen a una frecuencia de resonancia individual, estos a su vez tienen una gran dependencia a la geometría de los devanados por lo tanto cualquier cambio en la respuesta que estos presenten será indicativo de un cambio en la geometría del devanado y esta a su vez podrá provocar una falla.

Si se pueden medir cambios en la respuesta a la frecuencia de una bobina causado por un movimiento en esa bobina, entonces se puede detectar movimientos en las bobinas, esto realizando pruebas con SFRA.

En un transformador se encuentran resistores, inductores y capacitores, cada uno tiene diferente respuesta a una señal de AC, esta, está estrechamente relacionada a su geometría interna y en relación a los demás componentes.

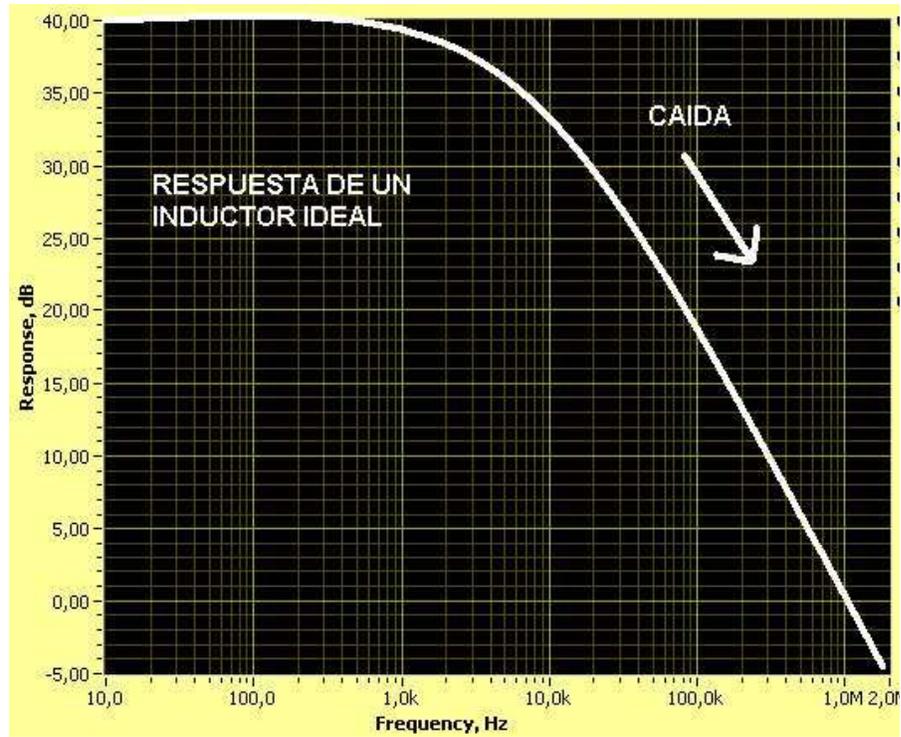


Figura 3.29.- Respuesta de un inductor ideal

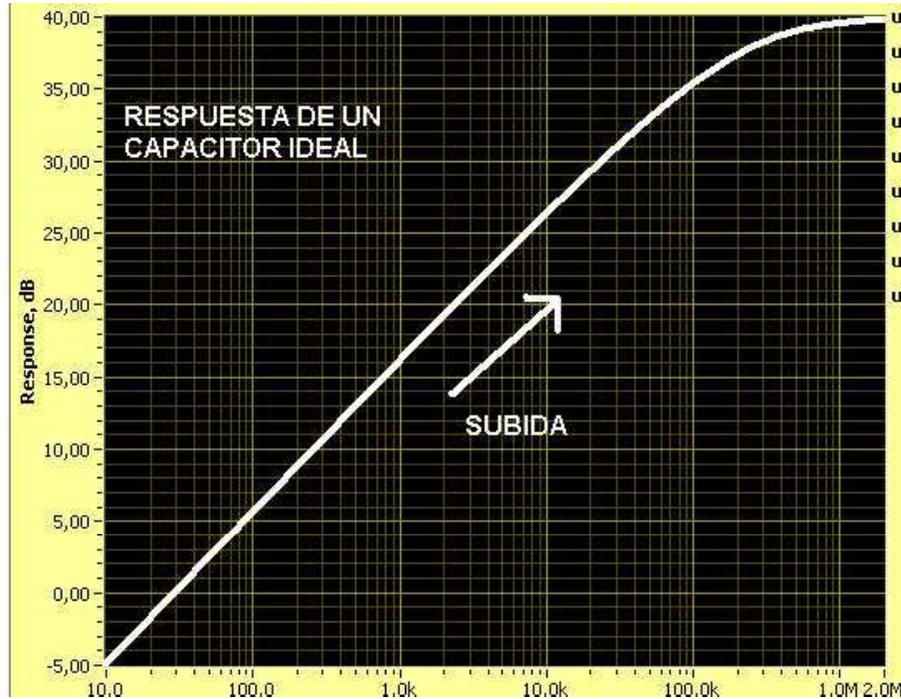


Figura 3.30.- Respuesta de un capacitor ideal

Lo que el SFRA hace es realizar una división de la señal salida sobre la señal de entrada ósea:

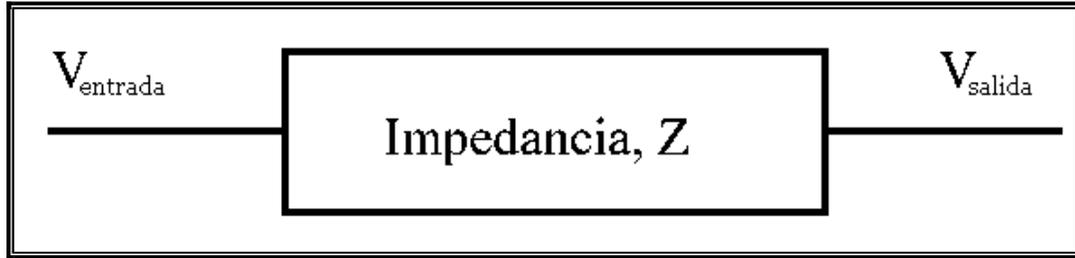


Figura 3.31.- Medición del SFRA

Cada punto en la grafica de respuesta dada por SFRA esta dada como una ganancia en decibeles (dB's), esta dado por la siguiente ecuación:

$$Ganancia(dB's) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} \right) \quad (3.3)$$

Las mediciones se realizan bajo el siguiente diagrama de conexión donde se muestran que es necesaria referencia de tierra para cada prueba así como la resistencia de los cables de conexión con los que cuenta el equipo la cual no afecta a las mediciones ya que se calibra antes de realizar cualquier prueba.

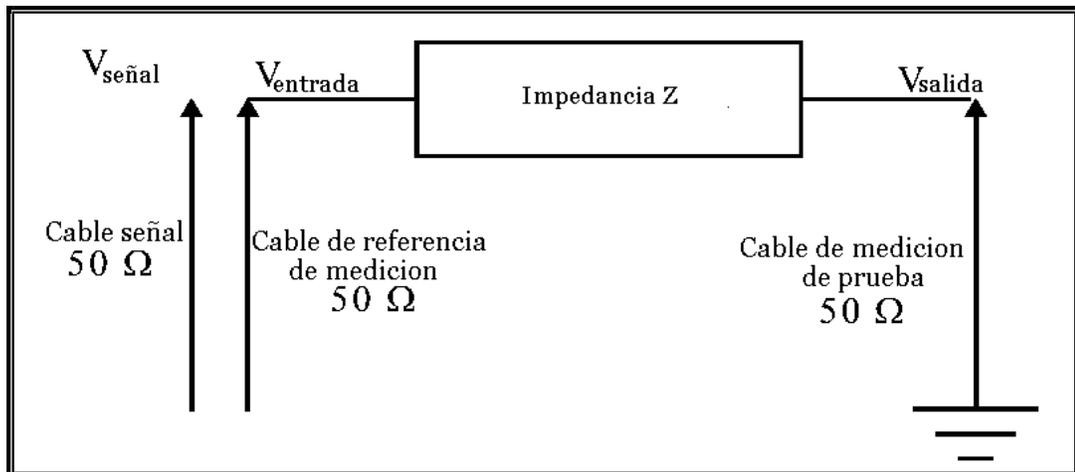


Figura 3.32.- Medición de la impedancia

	PRUEBA DE CORTO CIRCUITO						PRUEBA DE CORTO CIRCUITO		
	TODOS LOS DEMAS FLOTANDO						X1, X2, X3 JUNTOS EN CORTO CIRCUITO FLOTANDO X0		
	DEVANADOS DE ALTA (HV)			DEVANADOS DE BAJA (LV)					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9
Delta-Estrella	H1-H3	H2-H1	H3-H2	X1-X0	X2-X0	X3-X0	H1-H3	H2-H1	H3-H2
Estrella-Delta	H1-H0	H2-H0	H3-H0	X1-X3	X2-X1	X3-X2	H1-H0	H2-H0	H3-H0
Delta-Delta	H1-H3	H2-H1	H3-H2	X1-X3	X2-X1	X3-X2	H1-H3	H2-H1	H3-H2
Estrella-Estrella	H1-H0	H2-H0	H3-H0	X1-X0	X2-X0	X3-X0	H1-H0	H2-H0	H3-H0

Tabla 8.- Conexiones para la prueba de un transformador de dos devanados

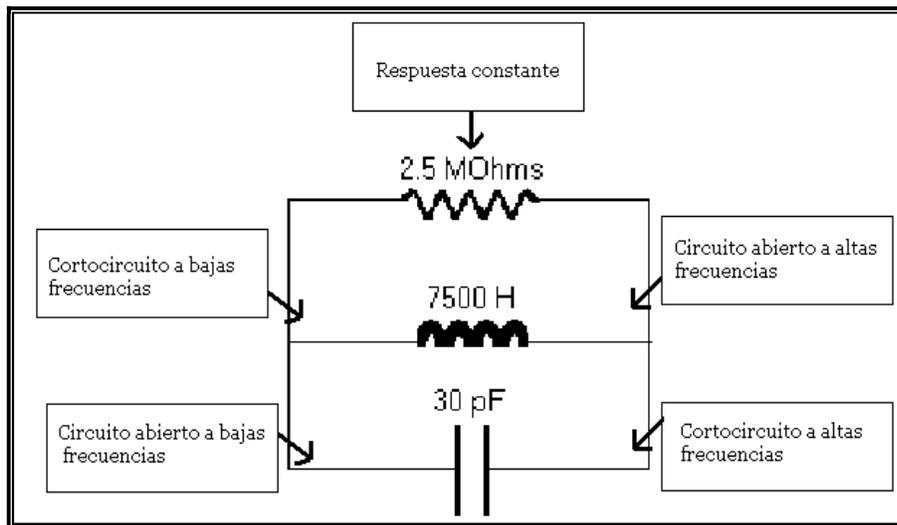


Figura 3.33.- Circuito paralelo RLC

Los componentes L, R y C dentro de un transformador, el SFRA los mide como un circuito en paralelo al hacerlo cada uno aporta en los diferentes rangos de frecuencia para darle a la forma de onda una característica que la hace única, esto contribuye a obtener una forma de onda con una frecuencia de resonancia, como se muestra a continuación.

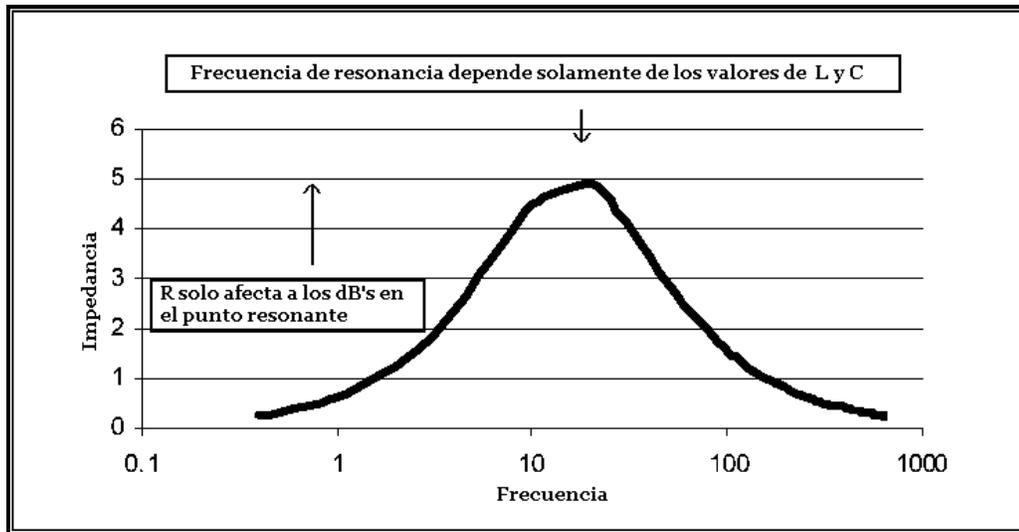


Figura 3.34.- Impedancia de un circuito paralelo RLC

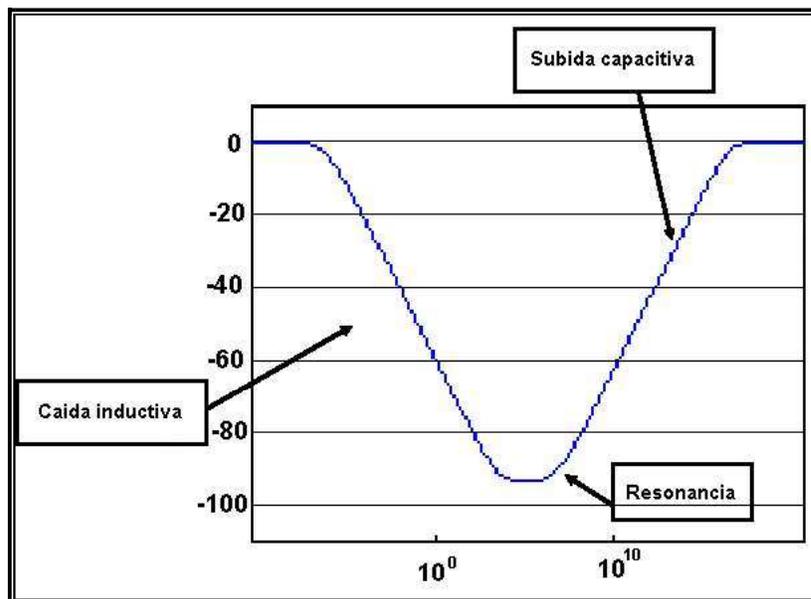


Figura 3.35.- Respuesta de un circuito paralelo RLC

Al igual que los equipos anteriores se tienen que proporcionar los datos del transformador para así generar una base de datos los cuales se llenan de la siguiente forma.

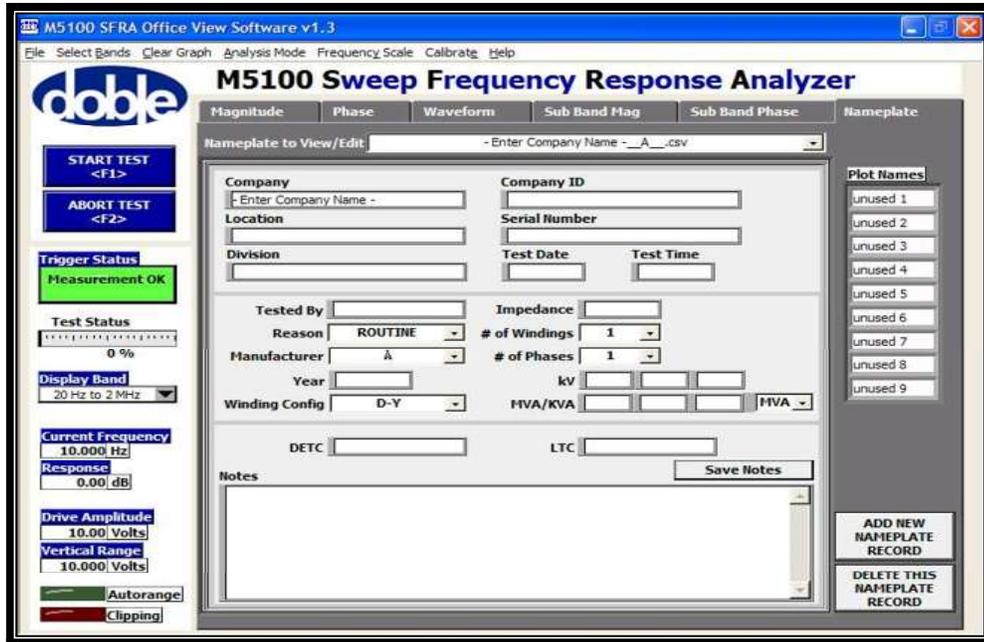


Figura 3.36.- Pantalla para ingresar datos de placa del transformador

Una vez realizadas las pruebas la pantalla nos puede mostrar las graficas obtenidas, puede mostrarnos hasta 9 gráficas en la misma pantalla y se muestran como en la siguiente figura se puede apreciar.

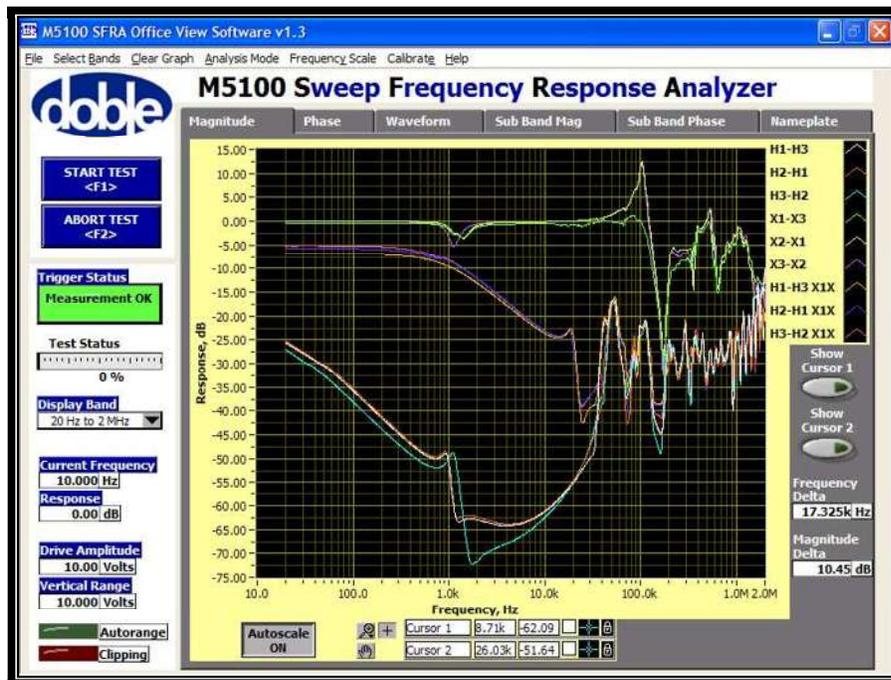


Figura 3.37.- Pantalla que muestra las gráficas de las respuestas a la frecuencia

Ya que tenemos las graficar de los resultados podemos realizar comparaciones con pruebas echas con anterioridad y que se encuentren en la base de datos, para esto podemos llamar a la graficas que se requieren mediante la siguiente pantalla.

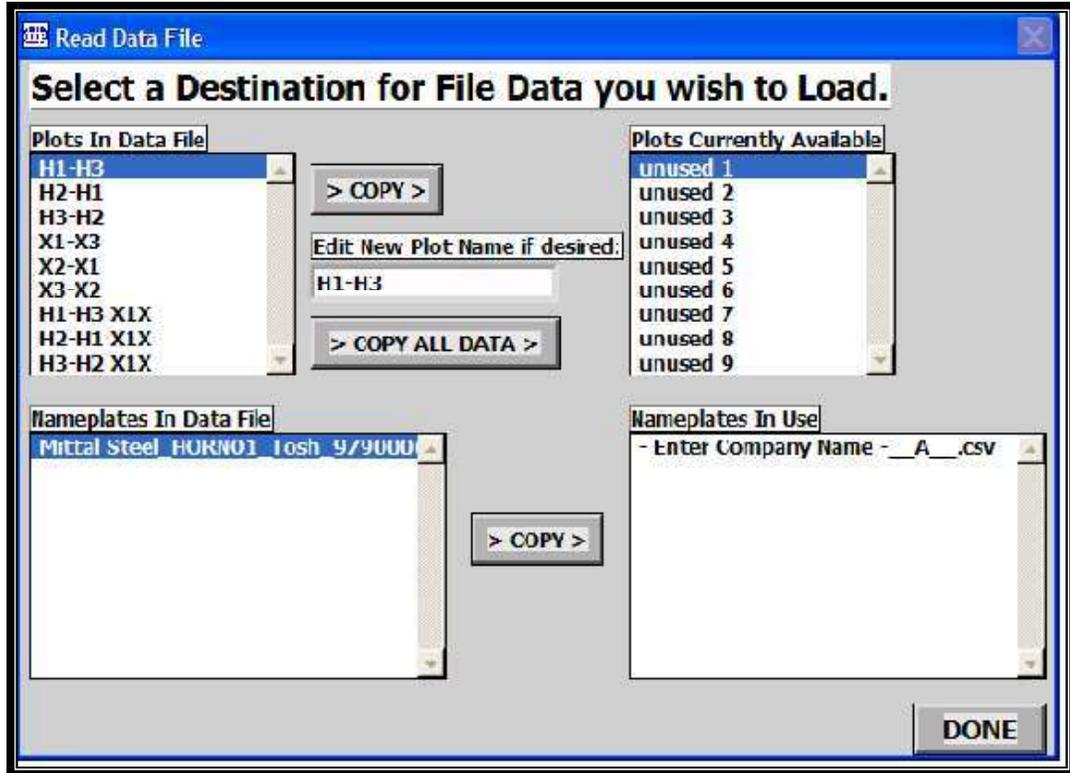


Figura 3.38.- Pantalla para seleccionar las graficas a mostrar.

### 3.5.3 Análisis de Resultados

Después de obtener la respuesta se obtiene una resonancia, la cual depende de L y C por lo cual si se realiza un cambio en estos se tendrá una nueva resonancia y una nueva forma de onda, y ya que L y C dependen directamente de la geometría del espécimen en prueba, al detectarse un cambio en la forma de onda se pueden detectar cambios en L y C, a su vez se detectan cambios en la estructura geométrica de los devanados lo cual significa que una falla puede ocurrir en cualquier momento.

Así que si se realiza esta prueba en varias ocasiones se puede tener una base de datos para poder detectar fallas incipientes, y evitar una falla mayor. Dependiendo del rango de frecuencias en los que se presenten estas variaciones es el tipo de fallas que pueda tener el transformador, a continuación se muestran estrategias de interpretación de los resultados.

- A frecuencias menores de 2kHz, los problemas pueden ser:
  - Deformación del núcleo
  - Circuitos abiertos
  - Espiras en corto
  - Magnetismo residual
- A frecuencias entre 2kHz a 10kHz, las fallas podrían ser por el movimiento relativo a otro o en la estructura de fijación del transformador.
- A frecuencias entre 20kHz a 400kHz, las fallas podrían ser deformaciones dentro de los devanados y del TAP.
- A frecuencias entre 400kHz a 2MHz, el daño que puede existir es el movimiento de las terminales principales y del TAP.

Para una mejor interpretación de los resultados, se tiene que tener los resultados de referencia. En caso de que no se cuente con estos, se pueden obtener resultados de unidades hermanas.

La comparación de las respuestas y cualquier comportamiento no esperado o raro, son indicativos para realizar pruebas complementarias como las descritas en este documento.

## CAPITULO 4

### RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Las pruebas explicadas en el capitulo anterior se le aplicaron a cuatro transformadores de potencia y para mostrar los resultados de estas, en la tabla siguiente se muestran las características de cada uno de ellos y para fines prácticos se identificaran como: transformador 1, transformador 2, transformador 3, transformador 4.

En la siguiente tabla se muestra como se identificará a los transformadores.

	TRANSFORMADOR 1	TRANSFORMADOR 2	TRANSFORMADOR 3	TRANSFORMADOR 4
<b>VOLTAJE</b>	66/0.95KV	66/0.95KV	115/23KV	110/13.8KV
<b>POTENCIA</b>	155/175MVA	155/175MVA	7.5/9.375MVA	7.5/9.375MVA
<b>NUM. DE SERIE</b>	97900066	97900067	26-1634	F-997-01006
<b>CONEXIÓN</b>	delta-delta	delta-delta	delta-estrella	delta-estrella
<b>AÑO DE CONSTRUCCION</b>	1997	1997	2009	1982
<b>NUM. DE FASES</b>	3	3	3	3

Tabla 9.- Datos de los Transformadores

A continuación se muestran las imágenes de los datos de placa de los cuatro transformadores de potencia tal y como lo muestra el M4000.

The screenshot shows the 'Two Winding Transformer - Identification' window. The 'General Info' section contains the following data: Company: Laboratorio de Maquinas Elecs., Division: CCM, Location: (empty), Test Date: (empty), Tested by: JAAG, Test Set Type: (dropdown), Reason: ROUTINE. The 'Nameplate Data' section contains: Manuf: (empty), Yr Mfr'd: 1997, Serial No: 97900066, kV: 66, 0.965, Special ID: EAF-4, Coolant: OIL-WATER, CCT Desig: (empty), Config: D-D, MVA/KVA: 155, 175, (empty), (empty), MVA (dropdown), Class: (empty), # Phases: 3, Tank: SEALED. Buttons at the bottom include Data Mgr, Overall, Jump To, Prev Date, Ngxt Date, Save, and Quick Entry.

Figura 4.1. – Datos del Transformador 1

The screenshot shows the 'Two Winding Transformer - Identification' window. The 'General Info' section contains the following data: Company: Laboratorio de Maquinas Elecs., Division: CCM, Location: (empty), Test Date: 17:02:09, Tested by: jaag, Test Set Type: (dropdown), Reason: ROUTINE. The 'Nameplate Data' section contains: Manuf: Tosh, Yr Mfr'd: 1997, Serial No: 97900067, kV: 66, 0.965, Special ID: Horno, Coolant: OIL-WATER, CCT Desig: (empty), Config: D-D, MVA/KVA: 155, 175, (empty), (empty), MVA (dropdown), Class: (empty), # Phases: 3, Tank: SEALED. Buttons at the bottom include Data Mgr, Overall, Jump To, Prev Date, Ngxt Date, Save, and Quick Entry.

Figura 4.2. – Datos del Transformador 2

The screenshot shows a software window titled "Two Winding Transformer - Identification". It is divided into two main sections: "General Info" and "Nameplate Data".

**General Info:**

- Company: Laboratorio de Maquinas Elecs.
- Division: [Empty]
- Location: [Empty]
- Test Date: [Empty] 13:36:35
- Tested by: JAAG
- Test Set Type: [Dropdown]
- Reason: INITIAL NEW

Buttons: Administration..., Test Conditions..., Note [checkbox]

**Nameplate Data:**

- Manuf: OTHER
- Yr Mfr'd: 2009
- Serial No: 26-1634
- kV: 115 | 23
- Special ID: T1
- Coolant: OIL
- CCT Desig: [Empty]
- Config: D-Y
- MVA/KVA: 7.5 | 9.375 | [Empty] | [Empty] | MVA
- Class: [Empty]
- # Phases: 3
- Tank: SEALED

Buttons: Bushing Nameplate, Nameplate Detail

Bottom navigation buttons: Data Mgr, Overall, Jump To, Prev Date, Next Date, Save, Quick Entry

Figura 4.3. – Datos del Transformador 3

The screenshot shows a software window titled "Two Winding Transformer - Identification". It is divided into two main sections: "General Info" and "Nameplate Data".

**General Info:**

- Company: Laboratorio de Maquinas Elecs.
- Division: [Empty]
- Location: [Empty]
- Test Date: [Empty] 12:37:35
- Tested by: jaag
- Test Set Type: [Dropdown]
- Reason: ROUTINE

Buttons: Administration..., Test Conditions..., Note [checkbox]

**Nameplate Data:**

- Manuf: OTHER
- Yr Mfr'd: 1982
- Serial No: F-997-01 006
- kV: 110 | 13.8
- Special ID: T-1
- Coolant: OIL
- CCT Desig: [Empty]
- Config: D-Y
- MVA/KVA: 7.5 | 9.375 | [Empty] | [Empty] | MVA
- Class: OA/FA
- # Phases: 3
- Tank: SEALED

Buttons: Bushing Nameplate, Nameplate Detail

Bottom navigation buttons: Data Mgr, Overall, Jump To, Prev Date, Next Date, Save, Quick Entry

Figura 4.4. – Datos del Transformador 4

### 4.1.- Resultados de la Prueba de Corriente de Excitación

Los resultados de esta prueba se muestran en las siguientes imágenes, los valores de la corriente de excitacion de la pierna o devanado central se marca con un circulo, asi se podra identificar su valor y compararlo con los otros dos, para verificar que su valor sea apoximadamente la mitad.

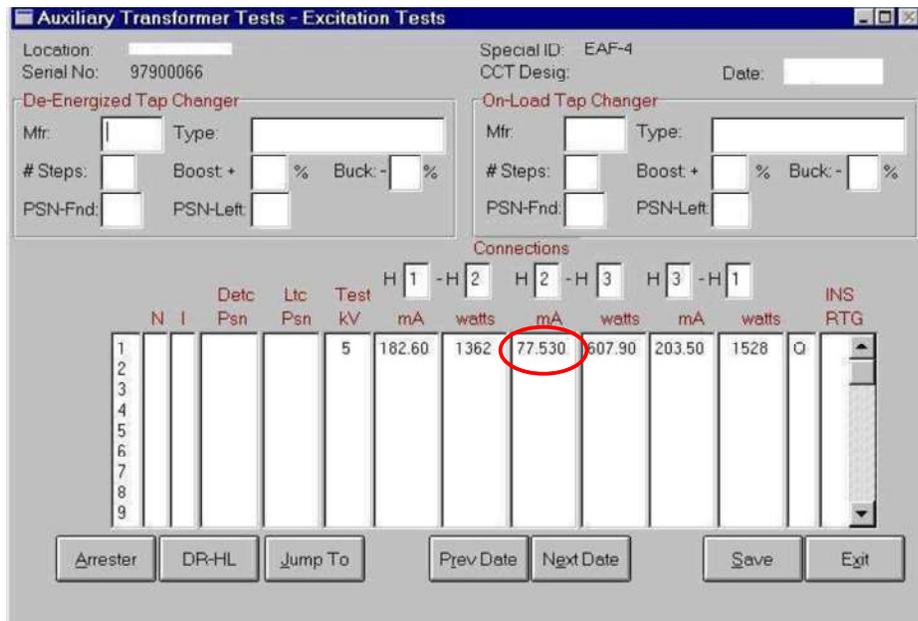


Figura 4.5.- Resultados de la prueba de Corriente de Excitación del Transformador 1

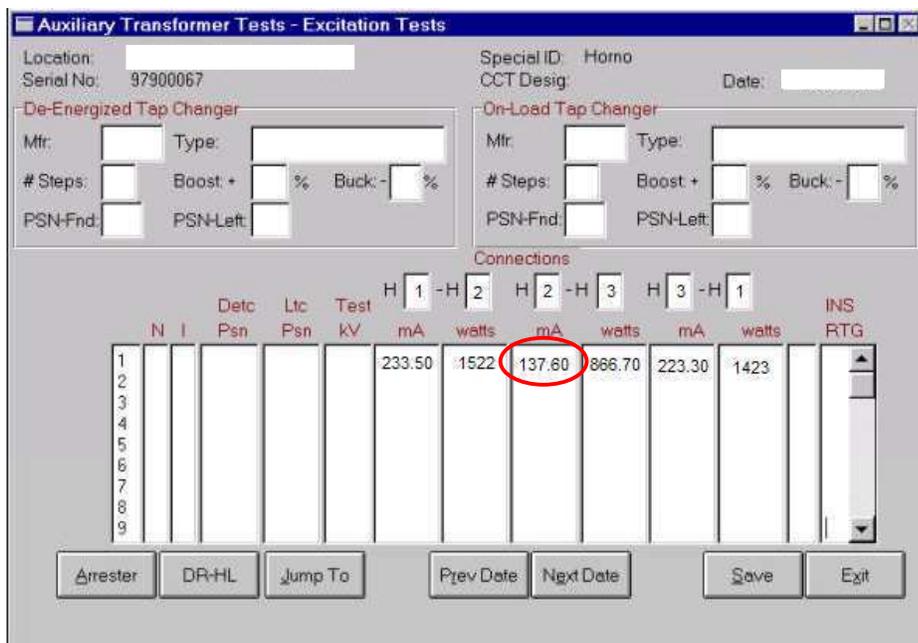


Figura 4.6.- Resultados de la prueba de Corriente de Excitación del Transformador 2

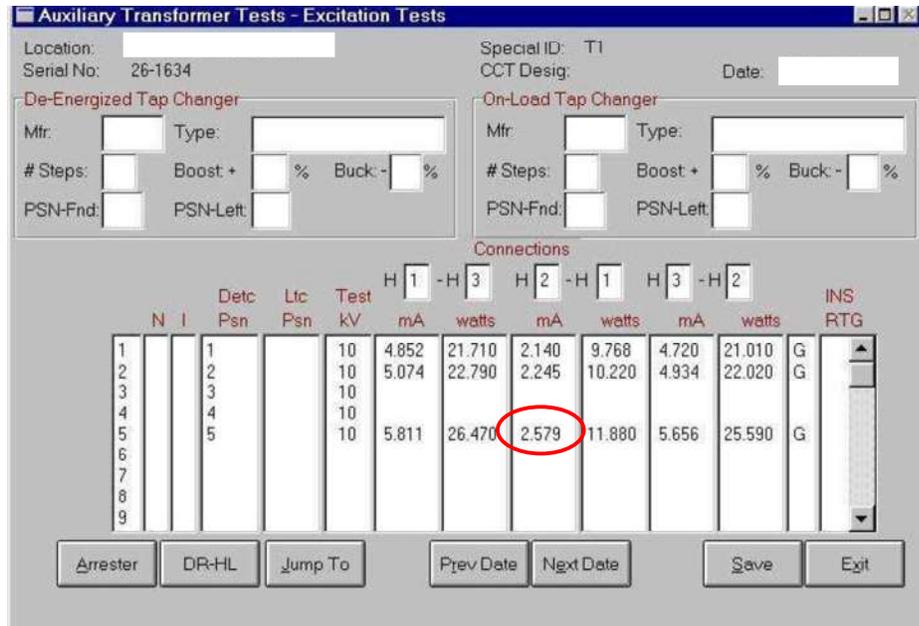


Figura 4.7.- Resultados de la prueba de Corriente de Excitación del Transformador 3

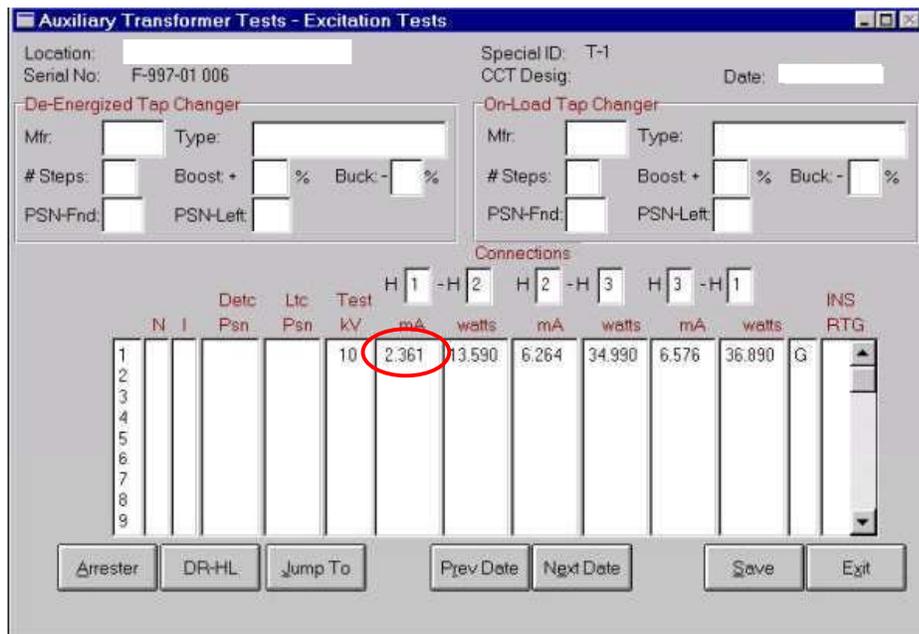


Figura 4.8.- Resultados de la prueba de Corriente de Excitación del Transformador 4

Como podemos observar los resultados de los cuatro transformadores cumplen con la norma, que el valor de la corriente de excitación de la pierna central sea aproximadamente la mitad de las dos restantes.

## 4.2 Resultados de la Prueba de Factor de Potencia

En las imágenes siguientes se muestra el valor del voltaje al cual se realizó la prueba así como valores de corriente, capacitancia, potencia y factor de potencia, éste último se marca con un círculo para su identificación.

N	I	Test Connections	Test kV	Equiv. mA	10kV watts	% PWR meas	FCTR corr	corr fctr	WND meas C(pF)		
1		HIGH LOW	10	79.450	5.337			0.75	21076	CH + CHL	
2		HIGH LOW	10	38.140	2.908	0.76	0.57	0.75	10118	CH	G
3		HIGH LOW	10	41.200	2.139	0.52	0.39	0.75	10928	CHL (UST)	G
4		Test 1 minus Test 2		41.310	2.429	0.59	0.44	0.75	10958	CHL	I
5		LOW HIGH						0.75		CL + CHL	
6		LOW HIGH						0.75		CL	
7		LOW HIGH						0.75		CHL (UST)	
8		Test 5 minus Test 6								CHL	
9		CH minus Bushing C1 Meas						0.75		CH'	
10		CL minus Bushing C1 Meas						0.75		CL'	

Figura 4.9.- Resultados de la prueba de Factor de Potencia del Transformador 1

N	I	Test Connections	Test kV	Equiv. mA	10kV watts	% PWR meas	FCTR corr	corr fctr	WND meas C(pF)		
1		HIGH LOW	10	78.140	3.476			0.80	20728	CH + CHL	
2		HIGH LOW	10	39.570	1.948	0.49	0.39	0.80	10497	CH	G
3		HIGH LOW	10	38.400	1.307	0.34	0.27	0.80	10187	CHL (UST)	G
4		Test 1 minus Test 2		38.570	1.528	0.40	0.32	0.80	10231	CHL	I
5		LOW HIGH								CL + CHL	
6		LOW HIGH								CL	
7		LOW HIGH								CHL (UST)	
8		Test 5 minus Test 6								CHL	
9		CH minus Bushing C1 Meas						0.80		CH'	
10		CL minus Bushing C1 Meas								CL'	

Figura 4.10.- Resultados de la prueba de Factor de Potencia del Transformador 2

Two Winding Transformer - Overall Tests

Location: \_\_\_\_\_ Special Id: T1  
 Serial No: 26-1634 CCT Desig: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

N	I	Test Connections ENG GND GAR UST	Test kV	Equiv. 10kV mA	% PWR watts	FCTR meas	corr	WND meas C(pF)	fctr			
1		HIGH LOW	10	20.480	0.460	0.28	0.22	0.80	0.80	5432	CH + CHL	
2		HIGH LOW	10	8.888	0.246	0.19	0.15	0.80	0.80	2357	CH	G
3		HIGH LOW	10	11.590	0.224	0.19	0.15	0.80	0.80	3074	CHL (UST)	G
4		Test 1 minus Test 2		11.592	0.214	0.18	0.14	0.80	0.80	3075	CHL	
5		LOW HIGH	10	32.120	0.756	0.27	0.22	0.80	0.80	8521	CL + CHL	
6		LOW HIGH	10	20.520	0.544	0.19	0.15	0.80	0.80	5445	CL	G
7		LOW HIGH	10	11.590	0.225	0.19	0.15	0.80	0.80	3074	CHL (UST)	G
8		Test 5 minus Test 6		11.600	0.212	0.18	0.14	0.80	0.80	3076	CHL	
9		CH minus Bushing C1 Meas						0.80			CH'	
10		CL minus Bushing C1 Meas						0.80			CL'	

ID Screen Bushing Jump To Prev Date Next Date Save Exit

Figura 4.11.- Resultados de la prueba de Factor de Potencia del Transformador 3

Location: \_\_\_\_\_ Special Id: T-1  
 Serial No: F-997-01 006 CCT Desig: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

N	I	Test Connections ENG GND GAR UST	Test kV	Equiv. 10kV mA	% PWR watts	FCTR meas	corr	WND meas C(pF)	fctr			
1		HIGH LOW	10	21.380	0.770	0.45	0.45	1.00	1.00	5671	CH + CHL	
2		HIGH LOW	10	8.263	0.372	0.31	0.31	1.00	1.00	2191	CH	G
3		HIGH LOW	10	13.110	0.411	0.30	0.30	1.00	1.00	3478	CHL (UST)	G
4		Test 1 minus Test 2		13.117	0.398	0.30	0.30	1.00	1.00	3480	CHL	
5		LOW HIGH	2.5	40.220	1.650	0.46	0.46	1.00	1.00	10669	CL + CHL	
6		LOW HIGH	2.5	27.100	1.256	0.32	0.32	1.00	1.00	7188	CL	
7		LOW HIGH	2.5	13.110	0.420	0.30	0.30	1.00	1.00	3477	CHL (UST)	
8		Test 5 minus Test 6		13.120	0.394	0.30	0.30	1.00	1.00	3481	CHL	
9		CH minus Bushing C1 Meas						1.00			CH'	
10		CL minus Bushing C1 Meas						1.00			CL'	

ID Screen Bushing Jump To Prev Date Next Date Save Exit

Figura 4.12.- Resultados de la prueba de Factor de Potencia del Transformador 4

Podemos observar los valores del factor de potencia de los cuatro transformadores en prueba, son menores a 0.5 como lo marca la interpretacion de los resultados de la prueba, por lo tanto ninguno de estos muestra daño alguno en el aislamiento de los devanados.

### 4.3 Resultados de la Prueba de Reactancia de Dispersion

En los resultados de esta prueba de equivalente trifasico se muestran los valores de reactancia de cada uno de los devanados, si estos presentan valores con diferencia del  $\pm 3\%$  entre ellos se aplicará la prueba por fase para poder dar un dictamen mas confiable acerca del estado del transformador, los resultados se marcan con un circulo.

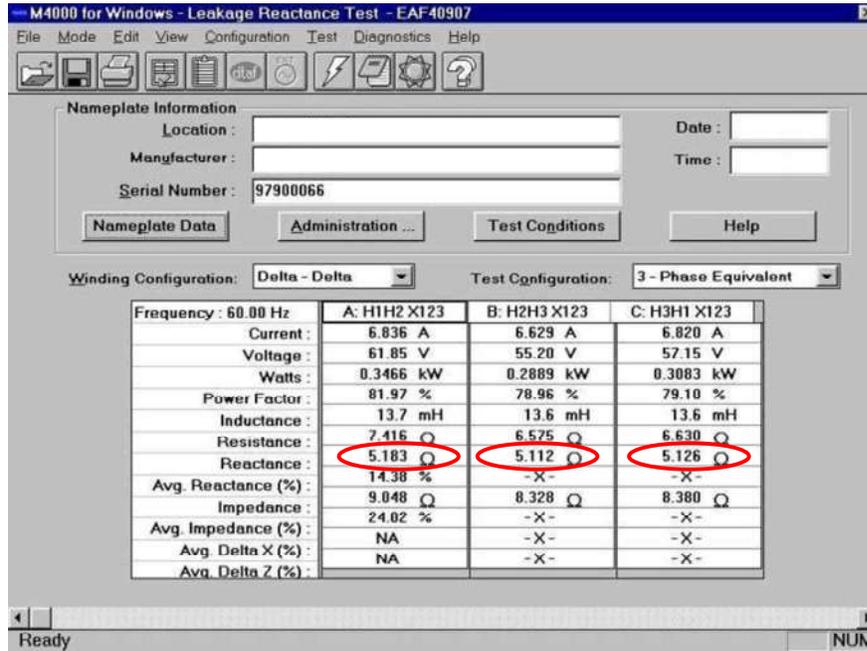


Figura 4.13.- Resultados de la prueba de Reactancia de Dispersion del Transformador 1

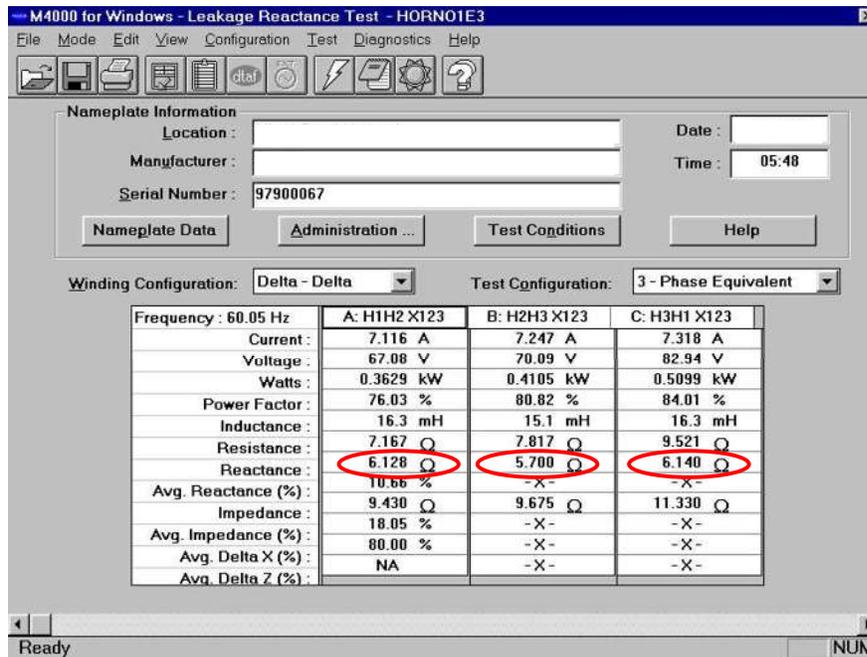


Figura 4.14.- Resultados de la prueba de Reactancia de Dispersion del Transformador 2

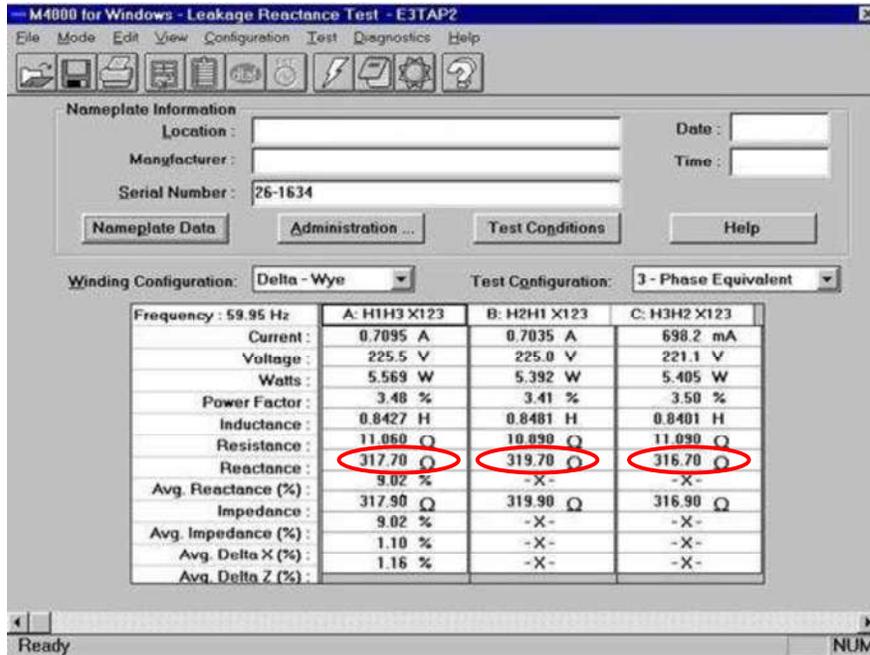


Figura 4.15.- Resultados de la prueba de Reactancia de Dispersión del Transformador 3

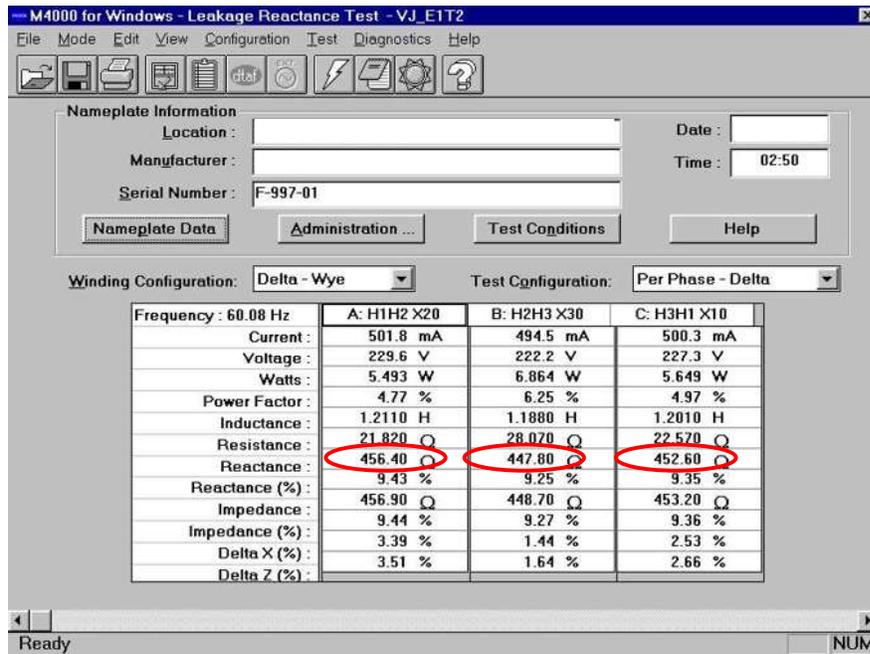


Figura 4.16.- Resultados de la prueba de Reactancia de Dispersión del Transformador 4

Como podemos observar los resultados de esta prueba no tiene variaciones mayores al 3%, por lo que no es necesario realizar la prueba por fase y podemos decir que ninguno de los cuatro transformadores en prueba presentan algún desplazamiento mecánico interno.

#### 4.4 Resultados de la Prueba de Respuesta al Barrido de la Frecuencia

Los resultados de la prueba de respuesta al barrido de frecuencia realizada a los 4 transformadores son los siguientes; para estas pruebas se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas al lado de alto voltaje y al de bajo voltaje.

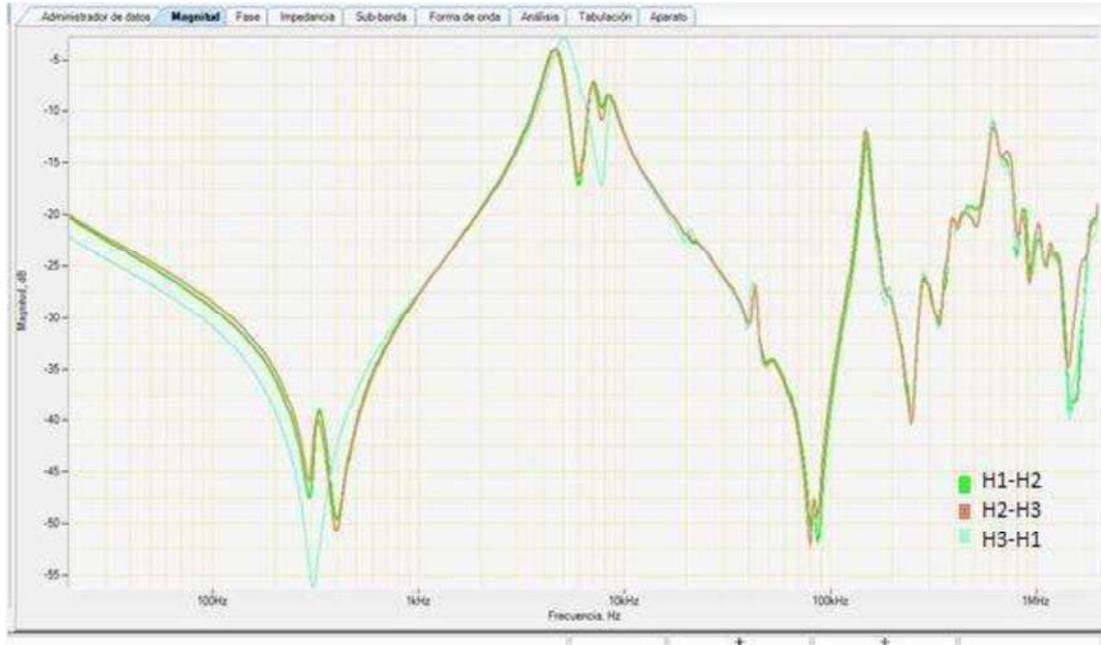


Figura 4.17.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 1 Lado de Alta

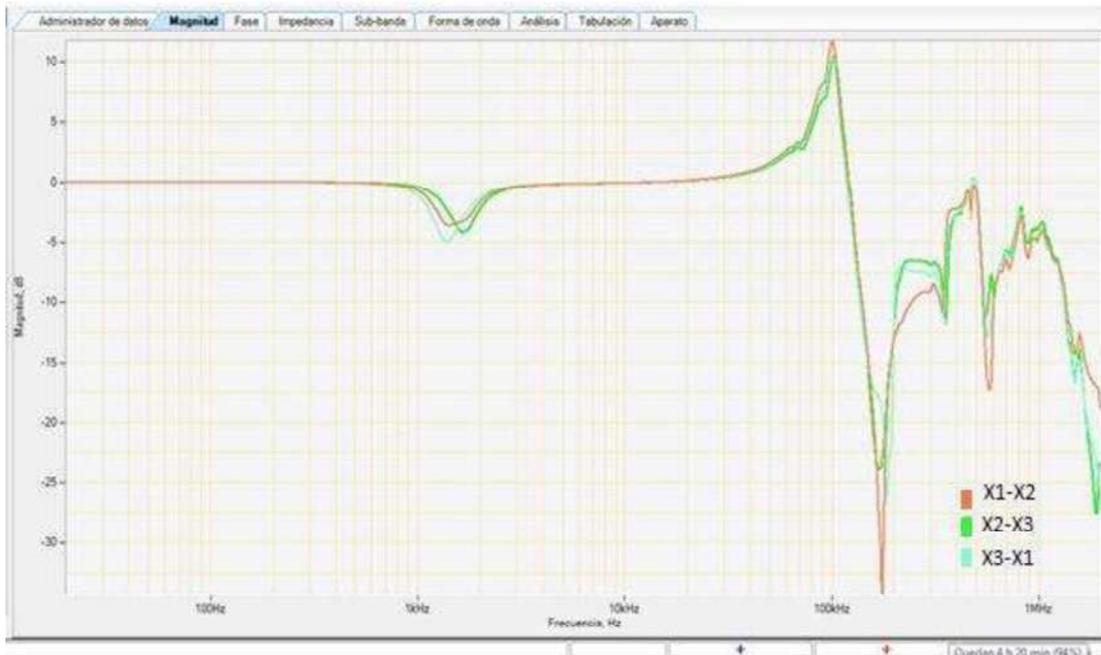


Figura 4.18.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 1 Lado de Baja

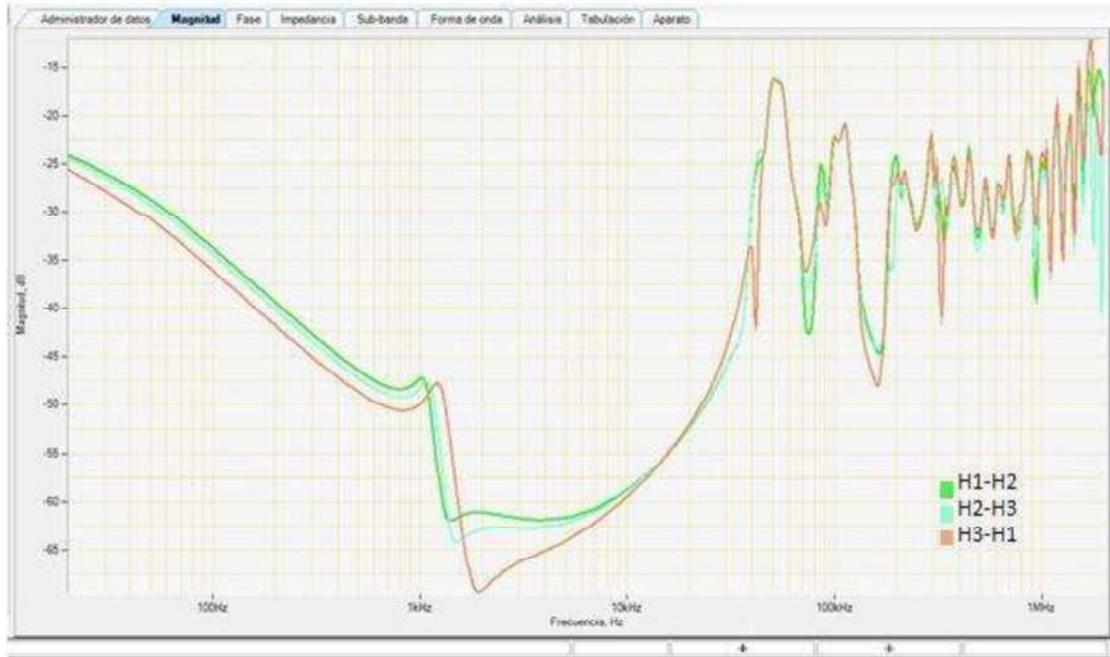


Figura 4.19.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 2 Lado de Alta

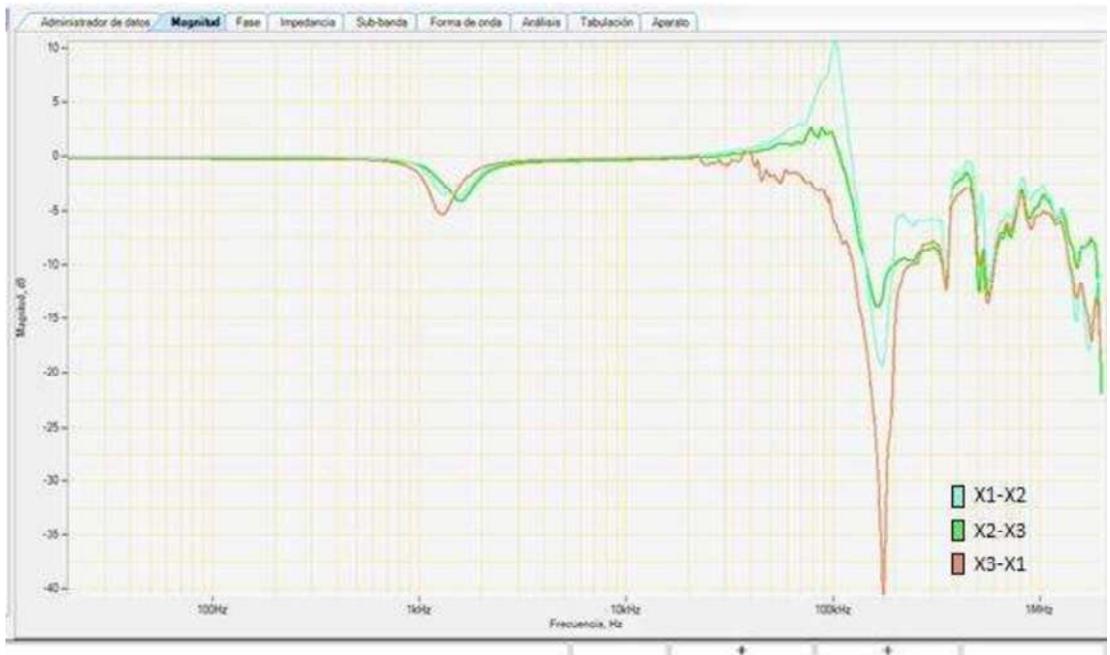


Figura 4.20.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 2 Lado de Baja

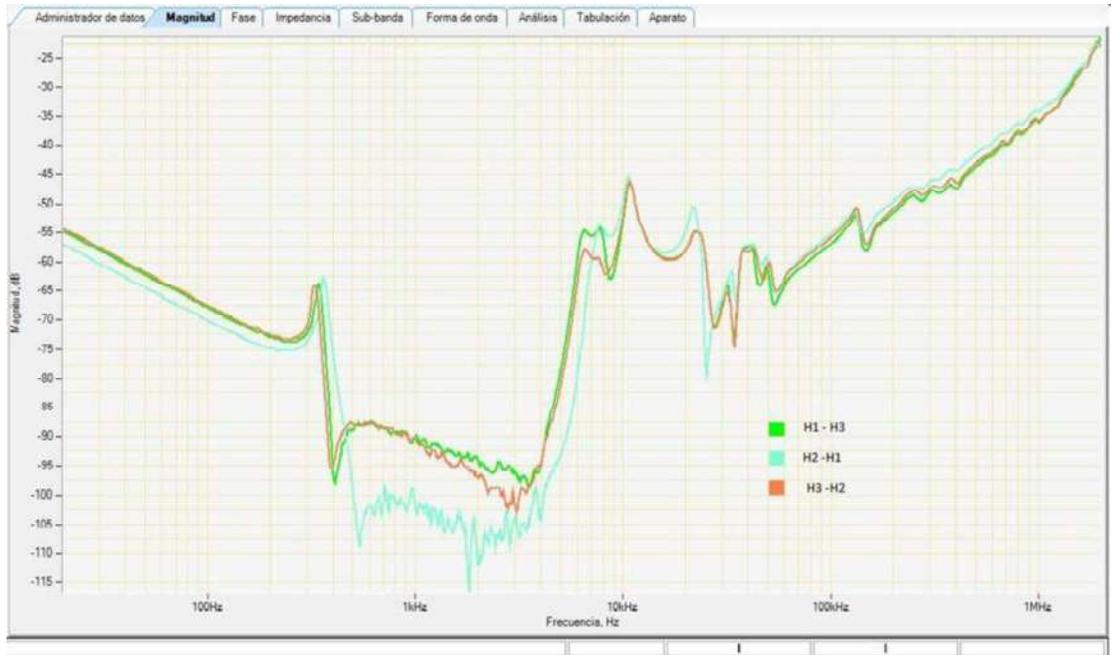


Figura 4.21.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 3 Lado de Alta

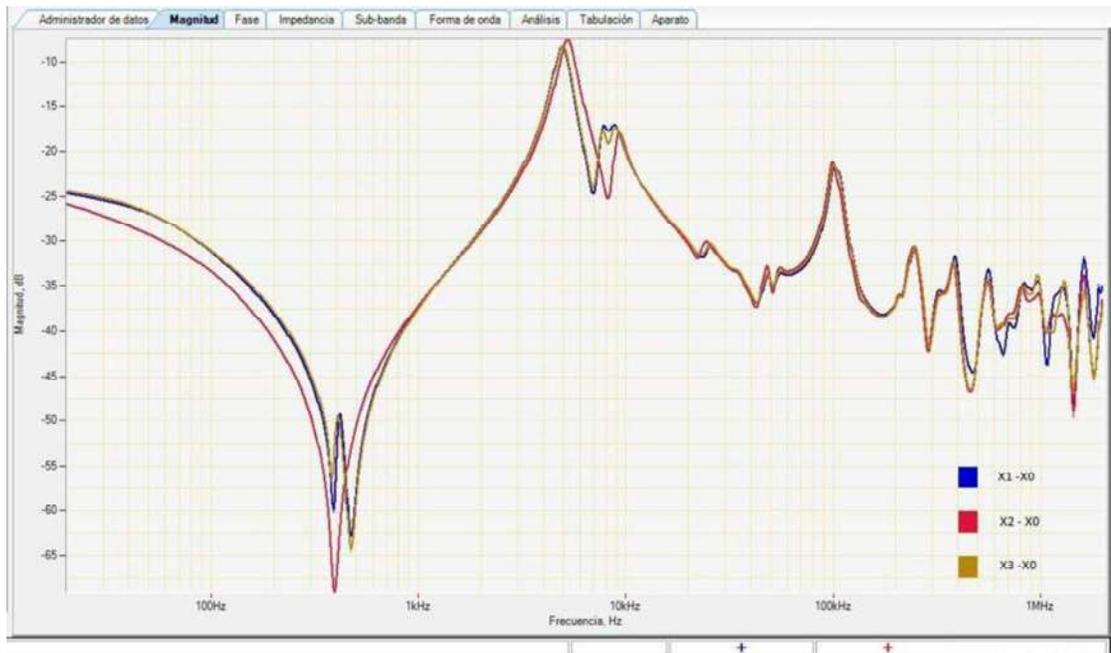


Figura 4.22.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 3 Lado de Baja

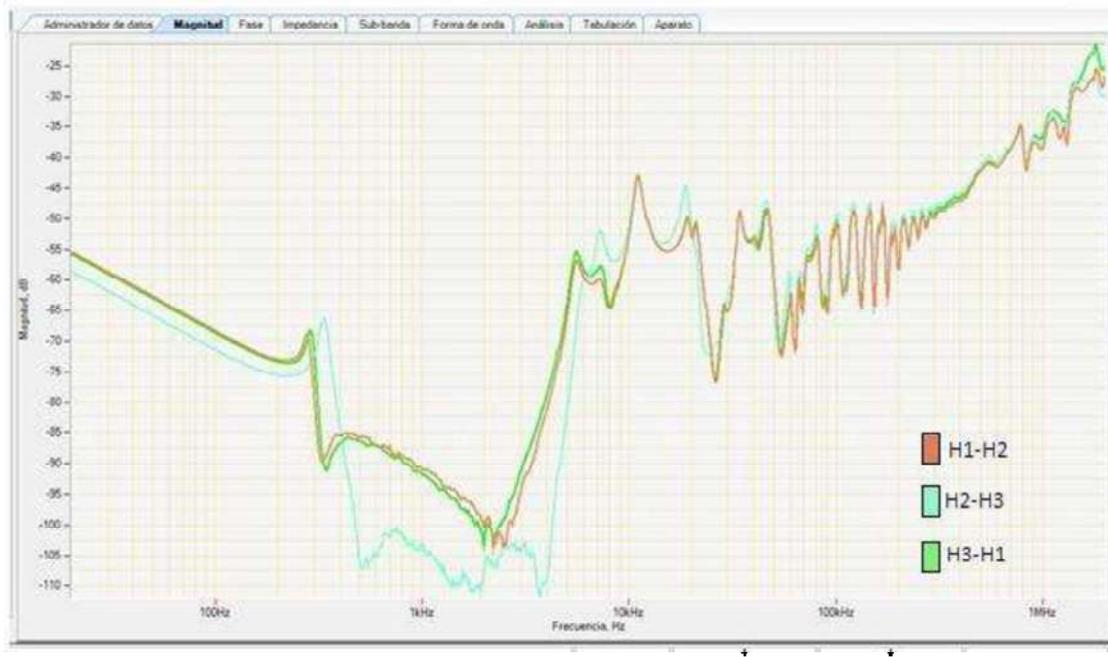


Figura 4.23.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 4 Lado de Alta

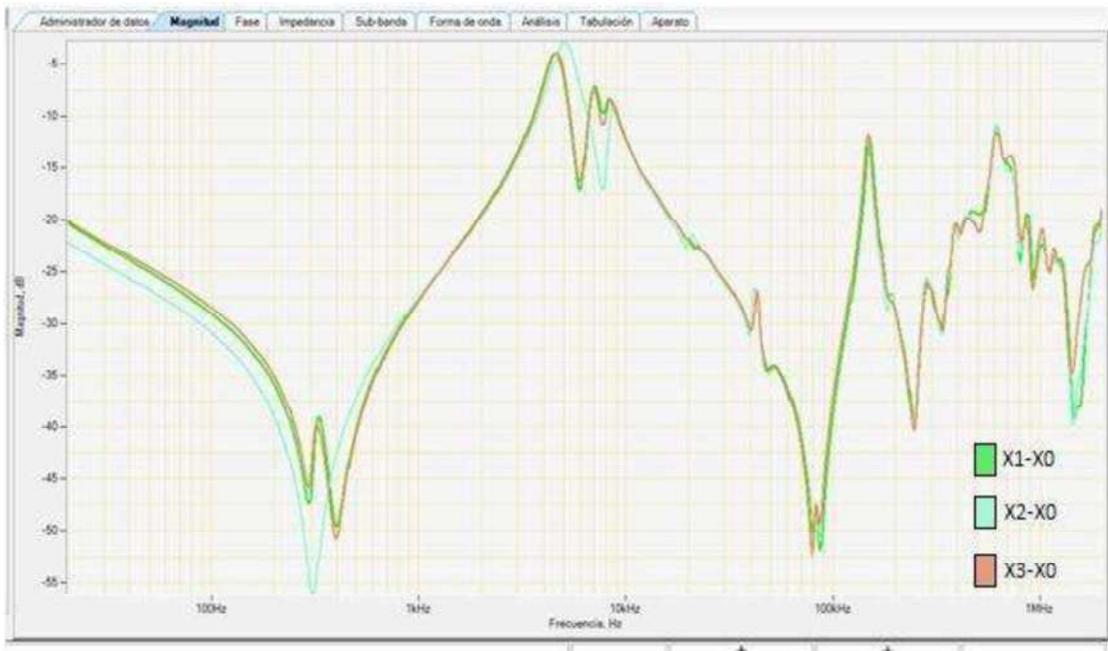


Figura 4.24.- Resultados de la prueba de SFRA del Transformador 4 Lado de Baja

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES**

Con el presente trabajo se pretende dar a conocer la importancia de realizar pruebas a los transformadores en primer lugar para conocer el estado físico del transformador y bajo que condiciones está trabajando, así como para mantenerlo en óptimas condiciones ya que cualquier variación en los valores nos podrán indicar a tiempo cualquier falla incipiente.

Las pruebas de Corriente de Excitación, Factor de Potencia, Reactancia de Dispersión y Respuesta al Barrido de Frecuencia, son algunas de las muchas opciones que existen para detectar fallas en los transformadores, sin embargo considero que son las mas fiables, sencillas de realizar y con bajo margen de error, además de que a diferencia de otras pruebas nos permite detectar desgaste de los aislamientos, aterrizamiento de los devanados y desplazamientos mecánicos, deformación en el núcleo, circuitos abiertos, espiras en corto, deformaciones dentro de los devanados y del TAP, movimiento de las terminales principales y del TAP.

Para realizar las cuatro pruebas ya mencionadas, se requieren 3 equipos: el M4000 necesario para realizar 2 pruebas: La de Corriente de Excitación y la de Factor de Potencia; y en conjunto con el equipo M4110 se realiza la prueba de Reactancia de Dispersión. El M5100 o SFRA nos sirve para realizar la prueba de Respuesta al Barrido de Frecuencia.

Si bien estos equipos representan un alto costo en la inversión inicial, las ventajas que remunera al detectar las fallas en los transformadores son mucho mayores.

Considero que cualquier maquina/equipo requiere de mantenimiento en su tiempo de vida, la importancia radica en saber cuándo el equipo comienza a fallar y requiere de mantenimiento.

Al realizar las pruebas propuestas nos indicará cualquier cambio por mínimo que éste resulte; resultados que nos pueden dar como diagnóstico una falla incipiente, misma que

podrá corregirse a tiempo reduciendo altos costos en reparación, o en algunos casos el costo total del equipo al tener que remplazarlo por uno nuevo.

Es recomendable realizar estas pruebas a los equipos nuevos antes de ponerlos en servicio, y a los que ya se encuentran en funcionamiento realizarlo de manera periódica ya que nos permitirá tener una base de datos de cada uno de ellos; y así poder compararlos. Este parámetro nos permitirá comparar y detectar cualquier variación de una manera más fácil y confiable, con lo que podremos dar un veredicto acerca del estado actual del transformador y poder tomar decisiones acerca de las acciones a tomar para su reparación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- M4000 Insulation Analyzer User Guide.-  
Doble Engineering Company, USA. Rev. Enero, 2000
  
- Desplazamiento de Bobinas en Transformadores de Potencia  
Tercera Conferencia Latinoamericana DOBLE, México DF Feb-Mar 2002
  
- Pruebas o Ensayo DOBLE  
Tercera Conferencia Latinoamericana DOBLE, México DF Feb-Mar 2002
  
- Investigating Questionable CL Power Factor Results Using an Accessible Core  
Ground  
73<sup>rd</sup> Annual International DOBLE Conference  
Doble Engineering Company, 2006
  
- Field Experiences with Sweep Frequency Response Analysis  
73<sup>rd</sup> Annual International DOBLE Conference  
Doble Engineering Company, 2006