UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
LEÓN

ESTUDIOS CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ
OFICIAL POR DECRETO PRESIDENCIAL DEL 27 ABRIL DE 1981

GUÍA PARA CORRECCIÓN DE PROBLEMAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA, DISTRIBUCIÓN Y AUTOTRANSFORMADORES A TRAVÉS DE ANÁLISIS DE PRUEBAS

ESTUDIO DE CASO

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA DE CALIDAD

PRESENTA
GONZALO REGALADO SALAZAR

DIRECTORA
MTRA. ROSA MA. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

LEÓN, GTO. 2024

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó a un transformador elevador conectado en Delta - Estrella) (Δ-Y). Alimentando una carga equilibrada de factor de potencia de 0.95%. En el momento de realizar las pruebas de capacitancia y factor de potencia a devanados, en primera instancia, se observó fuga de aceite por las boquillas H1 y H3, también se observó que las boquillas H1, H2 y H3 tenían impregnada ceniza en todos los faldones, que al combinarse con el aceite aislante formaron una mezcla difícil de quitar, fue necesario que personal responsable del departamento eléctrico ordenara su limpieza con agua desmineralizada a presión y remover la suciedad existente y poder realizar las mediciones para emitir su diagnóstico. Los métodos de prueba se realizaron con base a lo indicado en la Norma ANSI/IEEE Std. 62 y realizando el diagnóstico de los resultados de acuerdo con lo indicado en la Norma ANSI/IEEE C57.125 evaluando sus resultados, para emitir su diagnóstico de las mediciones y sus condiciones para su regreso a operación. Las condiciones del núcleo magnético se evaluaron con los resultados de las pérdidas que se obtienen en la prueba de corriente de excitación dos fases altas y similares y la fase central con un valor del 40% o 50% aproximadamente menor que los resultados obtenidos en las fases extremas.

INTRODUCCIÓN

Se verificaron los valores de prueba realizados en la puesta en servicio para compararlos con los resultados con las mediciones realizadas después de la salida de servicio al operar la protección G64 consecuencias del disparo al operar la protección G64.

Verificar que el equipo bajo prueba tenga en todas las pruebas de diagnóstico aplicables dentro de los rangos de aceptación de las normativas aplicables.

CAPÍTULO I

OBJETIVO.

Realizar mediciones de pruebas de diagnóstico a transformador marca Ferranti Packard serie para su puesta en servicio

Tabla 1. Datos de placa del transformador bajo análisis. Para pruebas de diagnóstico.

Marca	Capacidad MVA	Configuración	Fases	Año de fabricación	Serie	Tanque tipo	
Ferranti Packard	135/375/420	Y – D	3	2005	TP- 610	sellado conservador	
Peso total	400/20 kV	Fábrica	Cond. prueba	H.R %	Tipo	Enfriamiento	
380,387 kg	400/√3/20	México	soleado	32	Núcleo	aceite	
Clase	Peso total	Tipo	Z% 135 MVA	Z% 375 MVA		127,541	lts
ONAN/OFAF	380,387	Núcleo	3.892 %	10.832 %	Baja tensión	Neutro	
NBAI	Devanados	1495	Boquillas	1550 kV	150 kV	200 kV	
Observaciones: 1. Pruebas de puesta en servicio 2. Fecha de prueba.							

Bajo las normas ANSI/IEEE STD. 62.1995 y Norma ANSI/IEEE C57.125

1.1 Teoría y proceso de pruebas.

A continuación, se mencionan las diferentes pruebas que se realizaron al transformador sumergido en aceite, que se nombran en la norma ANSI/IEEE Std. 62, tanto de corriente alterna como de corriente directa y que en el capítulo 4, se describen en forma más detallada con sus respectivos valores de prueba, conclusiones y recomendaciones en forma individual

Se señalan las mediciones que se realizaron al transformador y, además, se acompañan de las mediciones del Barrido de Respuesta a la Frecuencia, bajo la Guía IEEE Std. C57.149TM 2012. IEEE guía para la aplicación e interpretación del análisis del barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite y, además, se aplican por igual a los transformadores tipo seco, siendo estas, las 12 pruebas que son aplicables.

1.2 Pruebas con corriente alterna.

- Prueba de factor de potencia y capacitancia a los aislamientos de alta y baja tensión.
- Prueba de factor de potencia y capacitancia a los aislamientos principal C1 y al aislamiento del tap C2 de las boquillas tipo condensador.
- Prueba de collar caliente a boquillas.
- Pruebas de factor de potencia al aceite aislante.
- Prueba de rigidez o ruptura dieléctricas al aceite aislante.
- Prueba de corriente de excitación en los devanados.
- Prueba de relación de transformación en devanados.
- Prueba de reactancia de dispersión en devanados.
- IEEE Std.57.149TM 2012. Guía para la aplicación e interpretación del análisis del barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite.

En el momento de realizar las mediciones, con el factor de potencia y capacitancia en los aislamientos de alta y baja tensión; los valores de factor de potencia y capacitancia dieron satisfactorios. Para confirmar los resultados y verificar los valores de las mediciones se realizó un cálculo leve con la constante del equipo (265) según indicaciones del fabricante por la corriente en mA. (observar el cuerpo de reporte). Los resultandos son positivos y casi el mismo valor de prueba. Ver anexo 4 y diagrama de conexiones.

1.3 Pruebas con corriente directa.

- Prueba de resistencia de aislamiento a devanados de alta y baja tensión.
- Prueba de tensión de recuperación en los aislamientos de los devanados.
- Prueba de resistencia óhmica en devanados.

Las pruebas de corriente directa indicadas deben de realizarse después de llevar a cabo las pruebas de corriente alterna, ya que, de realizarse antes, pueden causar un magnetismo residual en el núcleo, lo cual causa problemas al medir la corriente de excitación.

1.4 Proceso de pruebas.

1. Se midió el factor de potencia y capacitancia a los aislamientos de los devanados con la finalidad de conocer el contenido de humedad. Observar anexo 5.
2. Se midió el factor de potencia y capacitancia en aislamiento principal C1 y C2 de boquillas con la finalidad de conocer el contenido de humedad. Observar anexo 6.
3. En la prueba de collar caliente a boquillas de baja tensión faltó limpieza en porcelana, pero los valores son satisfactorios no hubo grúa ni escalera para realizar medición de boquillas de alta tensión. Observar anexo 6.
4. En la prueba de factor de potencia realizada al aceite aislante se obtuvo un valor de 0.003 y el corregido a 20°C de 0,02 %. Ver anexo 7 e imagen de conexiones.
5. En la prueba de rigidez dieléctrica con electrodos planos los valores son satisfactorios, los cinco valores obtenidos dieron casi un valor de 50 kV cada uno: la desviación estándar es de 0.003, el valor máximo es de 0.1. Ver anexo 8.
6. La prueba de corriente de excitación se realizó en las 5 derivaciones y se obtuvieron valores satisfactorios, así como dos medidas altas y similares en las fases extremas y la fase central menor valor por el efecto de la reluctancia magnética. Ver anexo 11.
7. La prueba de relación de transformación se llevó a cabo en las 5 posiciones del cambiador de derivaciones con la finalidad de verificar que no haya problemas de ajuste. Los valores medidos en cada derivación son satisfactorios. Ver anexo 12.
8. En la prueba de reactancia de dispersión, se llevó a cabo dos mediciones con el método de prueba del equivalente trifásico, una en tap 1 midiendo todo el devanado de alta tensión y la otra en el tap de operación 3. Ambas mediciones se obtuvieron en forma satisfactoria. Ver anexo 13.
9. En la prueba de resistencia de aislamiento, el índice de polarización es justo en el aislamiento de alta tensión es menor a 2.0, en el devanado de baja tensión es mayor a 2. Ver anexo 10.
10. En la prueba de voltaje de recuperación con el equipo RVM, se confirmó que el bajo valor de índice de polarización en el aislamiento de alta tensión es debido a la existencia de humedad. Gráfica 7.

Las pruebas de voltaje inducido y prueba de voltaje aplicado no se realizaron en campo debido a que no existen las condiciones apropiadas (65% al 70% de humedad relativa). Pero rara vez, cumpliendo con las instalaciones solicitadas para determinar la confiabilidad del servicio del transformador de potencia considerando su tensión dieléctrica y para detectar la existencia de Descargas Parciales (DP). Esta puede ser desarrollada en transformadores que han sido reparados o modificados. Ver tabla 1.

Tabla 1. Características de diagnóstico recomendadas.

PROCEDIMIENTO	TRANSFORMADORES NUEVOS	TRANSFORMADORES EN SERVICIO
Factor de potencia	< 0,5%	2.0 %
❖ Total de gases disueltos	< 0,5%	< 0,8%
Contenido de humedad	< 10 ppm	< 15 ppm
Relación de transformación	Dentro del ± 0,5%	Dentro del ± 0,5%

ANSI/IEEE. Std. 62. Si las unidades están equipadas con sello de nitrógeno, el total de gases disueltos no excederá el 1.0%.

Interpretación Tabla 1. Son las condiciones que deben cumplir los transformadores nuevos y en servicio

1.5 Detección de descargas parciales (DP).

Las DP (referidas como efecto corona) en un sistema aislante ocurren cuando una ruptura local del aislamiento medio causa una redistribución de carga dentro del sistema. La ruptura es localizada y no puentean la distancia entre los electrodos que colocan el campo eléctrico.

Generalmente, los eventos de DP de interés ocurren dentro del aislamiento en el sitio de un hueco exterior del material tales como agua, o en una localización donde el daño ha ocurrido por mal uso. Este tipo de descarga puede causar una mayor degradación del aislamiento en su vecindad y termina con una falla del equipo.

Las DP generan pulsos de corriente de baja amplitud que son de corta duración. Dos diferentes técnicas son comúnmente usadas para detectar y medir estas señales. La técnica usada fue la acústica, que consiste en medir con un medidor de ruido. Los niveles son medidos en microvolts y son referidos a señales de RIV. El otro método consiste en mediciones con un detector de DP. Estas señales son medidas en picocoulombs.

Las señales de RIV y DP pueden ser a través de muy pequeñas (baja amplitud), pulsos de alta frecuencia superpuestos en el alto voltaje. Sucesivamente las pruebas requieren precauciones convenientes para asegurar que estas pequeñas señales puedan ser detectadas. Todos los objetos conductores que puedan estar en el lado de alto voltaje serán sólidamente aterrizados y cualquier objeto que tenga forma de pico o esquina (ejemplo radiadores, tornillos, etc.) serán sellados con material conductivo que tenga una geometría lisa. Las conexiones que llevan corriente serán limpiadas y aseguradas.

1.5.1 Descargas parciales (DP).

Como en el caso de las mediciones para el RIV, las señales de DP serán medidas para obtener desde la capacitancia del tap de la boquilla. Un arreglo típico del circuito es mostrado en la figura 9. Las mediciones de impedancia Z_m son usualmente complejas y sirve para filtrar las frecuencias externas de la prueba desde las señales a ser medidas por el detector de DP. La sensibilidad del sistema depende sobre la capacitancia del capacitor acoplado, la capacitancia del objeto de prueba y, la capacitancia

del circuito de prueba. Esto requiere la calibración del sistema para cada prueba y asegurar los resultados de prueba. Por esta razón, el detector comercial de DP es proporcionado con un generador de pulsos para desarrollar la calibración. Un medio común de calibración es inyectando una cantidad conocida de carga entre la terminal de alto voltaje y el detector de ajuste de sensibilidad para proporcionar la lectura apropiada. En la práctica, esto se realiza con pulsos de voltaje acoplados al bus de alto voltaje vía un pequeño capacitor (100 pF).

Si una calibración a bajo voltaje del capacitor es usada, el circuito será calibrado antes de ser energizado y el capacitor a bajo voltaje será removido durante la prueba. El manual de operación del detector de DP usado será consultado para detallar los procedimientos de calibración.

La fuente de alto voltaje es normalmente regresada a cero a bajo voltaje y regresarla al voltaje de prueba lentamente. El detector de DP será monitoreado en el momento de incrementar el voltaje y las lecturas obtenidas serán registradas. Un ruido sobre el detector de DP despliega un bajo voltaje indicando interferencia, otra radio o un acoplamiento dentro del circuito desde la fuente externa. Si esta interferencia no puede ser eliminada, los límites de sensibilidad de los equipos los resultados de prueba son significativos. En la práctica, un operador con experiencia puede identificar e ignorar algunos ruidos si los originados por la fuente son conocidos.

Típicamente, las señales de DP no podrán estar presentes a bajos voltajes, pero aparecerán repentinamente a un voltaje conocido como el voltaje de incepción de DP. Así el voltaje es elevado más allá de la incepción del voltaje, muchos pulsos aparecerán y pueden variar en amplitud. Cuando el voltaje es disminuido, un efecto de histéresis puede ser notado cuando los pulsos de DP no se extinguen hasta que el voltaje se reduce significativamente. El voltaje en que las DP desaparecen es conocido como voltaje de extinción.

La interpretación de los resultados de DP requiere alguna experiencia con pruebas de DP en general y con el tipo de dispositivo que se está usando en particular. Algunos tipos de señales de DP pueden ser identificadas fácilmente y esto es de gran ayuda en localizar los problemas incipientes detectadas por el equipo de prueba. Específicamente, las señales de DP que están en fase con el voltaje aplicado son probablemente causadas por un defecto en las conexiones de corriente del circuito. Este problema será corregido antes de iniciar las mediciones. Un despliegue asimétrico sobre el detector del tubo de rayos catódico de DP normalmente indica una fuente de corona descargándose por el aire. Esto es causado por un punto afilado sobre el bus principal o la red de tierra. Esta Fuente puede normalmente ser identificada por una inspección visual en el área o con ayuda de un equipo de ultrasonido.

1.5.2 Técnicas Acústicas.

La detección de DP por el método acústico es usada para pruebas a transformadores por muchos años. Este método ofrece buena sensibilidad en algunos tipos de fuentes de DP y permite en sitio localizar el lugar de las DP. La técnica acústica tiene la ventaja que estas pueden ser usadas sobre energizar el equipo y este método no es susceptible por interferencia de fuentes externas cuando se aplica apropiadamente. Sin embargo, la sensibilidad de las descargas originales profundas dentro de la estructura del aislamiento es baja, por ejemplo, en la sección interna del devanado del transformador.

Las señales acústicas son usualmente medidas usando un transductor (sensores) que está acoplado a las paredes del tanque del transformador. Una atención especial será proporcionada al método de acoplamiento usado ya que la reflexión en la interfase entre el cercado y el transductor puede sustancialmente reducir la señal transmitida.

El equipo de prueba requerido para la detección acústica de DP consiste en una fuente de alto voltaje (si el objeto de prueba no está energizado), un transductor ultrasónico, un amplificador y un dispositivo de despliegue que constituye el detector. Contiene, detectores acústicos portátiles están disponibles para aplicaciones de pruebas de campo. Muchas mediciones especializadas pueden requerir diseños de equipos especiales con el método del transductor acoplado al objeto bajo prueba. Normalmente, para propósitos generales amplificadores y/o osciloscopios pueden ser utilizados para estas aplicaciones. Transductores ultrasónicos piezoeléctricos (que posee la propiedad de una fuerza electromotriz cuando se le somete a la acción de una fuerza mecánica; que produce una fuerza mecánica cuando se le aplica una tensión eléctrica) con una respuesta en el rango de 20 a 200 kHz son usualmente usados como encontrados en el dispositivo.

Los procedimientos usados e interpretación de resultados varían ampliamente dependiendo del aparato bajo prueba y el del programa de prueba. Un programa de prueba rápida puede requerir solamente la observación de la presencia o ausencia de señales acústicas en una pieza particular del aparato usando un simple contenido del transductor/detector acústico. Por otro lado, la localización de posibles problemas mayores puede requerirse un equipo mayor y, justificando, un programa de prueba extensivo que es cuidadosamente diseñado basado a través de un comprensivo comportamiento de ondas acústicas en líquidos, gases y sólidos de varios compuestos.

1.6 Boquillas.

Las boquillas varían ampliamente en construcción y son componentes esenciales de un transformador. Son relativamente inexpresivas comparadas con el costo de un transformador. Sin embargo, su falla puede resultar en una total destrucción del transformador. Las boquillas por lo tanto deben ser checadas regularmente y su evidencia de deterioración será encontrada, éstas serán reparadas o reemplazadas dependiendo del tipo de grado de deterioración. Aunque existen diferentes tipos de construcción, muchas de las pruebas de diagnóstico son comunes y se describen adelante.

1.6.1 Inspección visual.

Alguna inspección visual puede ser desarrollada mientras el transformador está energizado. El uso de binoculares puede revelar tales defectos de tracking o roturas de porcelana, juntas rotas y nivel de aceite. Si se puede, anotar la temperatura ambiente y si es posible, la corriente de carga en el momento de la inspección visual. Una inspección visual detallada puede realizarse cuando el transformador está fuera de servicio. En adición a lo anterior, la inspección puede revelar fisuras, deterioración de juntas de cemento y contaminación de la superficie. Si la porcelana está rota, deben de tomarse en consideración para la toma de decisiones.
Una porcelana sin mirilla de cristal no constituye cualquier peligro inmediato, ya que el grado eléctrico de la porcelana no es poroso y no migrará humedad. Cuando se observa algún problema más severo en la boquilla se recomienda realizar una inspección más severa. Cuando aparecen grietas en el cuerpo de la boquilla y van en aumento y pueden causar falla. En muchos casos, las boquillas son reemplazadas cuando no se tiene una efectiva reparación en campo.

1.6.2 Nivel de aceite.

El nivel de aceite no se puede mirar por la mirilla de cristal ya que, con el paso del tiempo la mirilla se deteriora, esto se puede indicar en algunos casos con la prueba de collar caliente haciendo un cuadro comparativo de la capacitancia medida en la puesta en servicio y la medida en los procesos de prueba de los mantenimientos o, lo mismo se puede hacer con el factor de potencia y logrando así evitar un evento de falla.

Un chequeo se realizará para verificar el nivel de aceite en la mirilla de cristal. Considerar la temperatura ambiente para mejor valoración del nivel de aceite. Un error muy común es no agregar aceite para reposición del nivel normal. El nivel normal es usualmente hecho para temperatura ambiente de 20 °C. agregando aceite a bajas temperaturas resulta en inapropiadas condiciones. Ver tabla 2.

Tabla 2. Volumen mínimo de líquido para cada prueba.

PRUEBA	NORMA APLICABLE	CANTIDAD DE ACEITE
Acidez	ASTM D 974-92	20
Color (campo)	ASTM D 1524-84	10
Rigidez Dieléctrica	ASTM D 877-87	75
Rigidez Dieléctrica	ASTM D 1816-84a	500[a]
Gases Disueltos	ASTM D 3612-93	50[a]
Tensión Interfacial	ASTM D 971-91	20
Tensión Interfacial	ASTM D 2285-85	15
Cantidad de Partículas	N/A	100
Factor de Potencia	ASTM D 924-92	250
Bifenilos Policlorados (askareles)	ASTM D 4059-91	10
Contenido de Lodos	ASTM D 1698-84	50
Contenido de agua	ASTM D 1533-88	50
Inspección visual	Igual que el color anterior	
Gravedad especifica	ASTM D 1298-85	125[a]
Color (Laboratorio)	ASTM D 1500-91	125
Total		1400

Cantidad de aceite requerida para cada prueba del análisis físico químico. Norma ANSI/IEEE STD.62.1995

Interpretación Tabla 2. Las cantidades listadas en la tabla generalmente han sido encontradas por la necesidad de los procedimientos. Ya que algunos fabricantes de equipos tienen mayor contenido, las pruebas de laboratorio serán consultadas posteriormente con la muestra para confirmar el volumen adecuado.

Capacitancia y el factor de disipación (o tangente Delta) se utiliza para medir los aislamientos de las barras del estator y rotor de los generadores eléctricos de dos polos o los hidro generadores. Por lo que no se puede utilizar en transformadores y boquillas.

La capacitancia y el factor de potencia C1 y C2 de los aislamientos de boquillas tipo condensador se indican en los anexos, el análisis de los resultados y también los diagramas de conexiones de cada una de las pruebas. Ver anexos 5,6 y 7. Las secciones de la capacitancia en cortocircuito se pueden detectar mediante un aumento en la capacitancia. La presencia de humedad u otros contaminantes generalmente se puede detectar por un aumento en el factor de potencia.

Las secciones de condensador en cortocircuito se pueden detectar mediante un aumento en la capacitancia. La presencia de humedad u otros contaminantes generalmente se puede detectar mediante un aumento en el factor de potencia. Correcciones por temperatura serán realizadas durante las mediciones. Cuando se realizan pruebas en la capacitancia C2, se debe tener cuidado en no exceder el voltaje de prueba del tap. (probar a 500 volts).

Se observó que la prueba de collar caliente es un procedimiento útil en particular que puede ser usado para valorar las condiciones específicas de pequeñas secciones del aislamiento de la boquilla entre el área superior de la porcelana y el conductor central. Se realiza energizando uno o más electrodos temporales (collar, usualmente de neopreno (semiconductor) colocado en la parte externa de la porcelana con el conductor central aterrizado. Este tipo de pruebas puede ser usado para localizar fisuras en la porcelana, degradación del aislamiento interno de la sección superior de la boquilla, bajo

compound o nivel de líquido y huecos en el compound. Correcciones del factor de potencia serán realizados en el C2.

Los límites del factor de potencia para el aislamiento principal C1 es de ≤ 0.5%. Los límites del factor de potencia para el aislamiento C2 es de 1%. Los valores de capacitancia para los aislamientos principal C1 y tap de prueba C2 no deben exceder del ± 10%. Valores mayores a los indicados debe de programarse una inspección visual y un proceso de pruebas después de realizar limpieza.

1.7 Descargas parciales (DP).

La actividad prolongada de DP en el aislamiento interno de una boquilla reducirá gradualmente su rigidez dieléctrica y, finalmente, provocará fallas. La presencia de corona se detecta mediante DP o RIV, mediciones que, necesariamente, se realizan a alto voltaje, generalmente voltaje de línea a tierra o superior (por ejemplo, 130 a 150%). Ver tabla 3, 4 y 5.

Estas mediciones se pueden realizar durante una prueba de voltaje inducido en el transformador, sin embargo, si se detecta DP durante esta prueba, no se puede determinar si se origina en estas mediciones se pueden realizar durante una prueba de voltaje inducido en el transformador. Sin embargo, si la DP es detectado durante esta prueba, no se puede determinar si se origina en la boquilla o en el interior del transformador. Por esta razón, si se requieren mediciones de DP o RIV, es preferible quitar la boquilla del transformador y pruébelo solo. Esta prueba se realiza con la boquilla en un tanque especial utilizando una fuente de prueba.

Tabla 3. Interpretación norma ASTM D 877 (electrodos planos).

Tensión de ruptura dieléctrica mínima (KV)	Clase del equipo en (KV)
23	≤ 69
26	> 69 - 288
26	≥ 345

Se observa los valores mínimos y máximos por la Norma ASTM D 877.

Tabla 4. Interpretación de la norma D-1816 (electrodos semiesféricos).

Tensión de ruptura dieléctrica mínima (kV)	Clase del equipo en (kV)
26	≤ 69
26	> 69 - 288
26	≥ 345

Se observa los valores mínimos y máximos por la Norma D-1816.

Tabla 5. Los niveles de factor de potencia.

Tipo de aceite	Clase de voltaje	Factor de potencia a 25 °C	Factor de potencia a 100 °C
Aceite nuevo recibido		0.05	0.30
Aceite en equipo nuevo	< 69	0.15	1.50
	69 - 230	0.10	1.0
Aceite nuevo después del llenado y antes de energizar		0.10	
Aceite en servicio Grupo I	< 69	0.5	
	69 - 230	0.5	
	≥ 345	0.5	
Aceite en servicio Grupo II	< 69	0.5	
	69 - 230	0.5	
	≥ 345	0.3	
Aceite en servicio Grupo III	<< 69	1.0	
	69 - 230	0.7	
	≥ 345	0.3	

Pruebas de laboratorio a 25 °C y 100 °C. Norma ANSI/IEEE STD.62.1995

1.8 Equipo de prueba.

El equipo de prueba requerido para la prueba de DP sobre la boquilla consiste en una fuente de alto voltaje, un detector de DP o un medidor de radio influencia (ruido), un capacitor acoplado al instrumento de medición de alto voltaje y su sistema de calibración.

La fuente de alto voltaje puede ser un transformador o un resonador de prueba en serie para medir. DP. El propósito del capacitor acoplado es para separar los pulsos de niveles bajos del alto voltaje en el bus y acoplado este pulso al detector. El capacitor será calibrado al voltaje de prueba y será descargado al terminar la misma. Valores de 1000 pF han sido encontrados a ser satisfactorios.

La actividad de las descargas parciales pueden ser medidas por medio de un detector de DP o un medidor de ruido o interferencia. Ambos tipos de instrumento son comercialmente disponibles. Sin embargo, los detectores de DP son usualmente aplicados con un osciloscopio en el cual la actividad de los pulsos puede ser observados. Este tipo de despliegue también da una información relativa de fase, que puede ser útil en la interpretación de los resultados. El medidor de radio-interferencia es un instrumento de banda estrecha que mide la amplitud de los picos aparentes de la señal de descarga.

El detector normalmente usado es un microvoltmétro sintonizador de radio frecuencia. La frecuencia es banda media del detector es normalmente aproximada a 1 MHz pero otras frecuencias pueden ser seleccionadas para eliminar la fuente local de interferencia (ejemplo estación de radiodifusión AM). El ancho de banda normalmente usado es 9 KHz.

Tabla 6. Guía para la interpretación de % de saturación de agua en el aceite.

% saturación de agua en el aceite	Condición
0 – 5	Aislamiento seco
6 – 20	Humedad moderada. Números menores indican niveles de agua en el aislamiento seco moderado, mientras valores hacia el límite superior indican aislamiento moderadamente húmedo.
21 – 30	Húmedo
> 30	Extremadamente húmedo

Señalado en Norma ANSI/IEEE STD. 62.1995

Los valores de factor de potencia en una muestra serán determinados usando procedimientos de prueba y corregidos a 20 °C para pruebas de campo. En laboratorio las pruebas son desarrolladas a 25 °C y100 °C.

Tabla 7. Guía para interpretación de % de humedad por peso de papel seco.

% de humedad por peso de papel seco	Condición
0 – 2	Papel seco
2 – 4	Papel húmedo
> 4.5	Papel excesivamente húmedo

Señalado en Norma ANSI/IEEE STD. 62.1995

1.9 Cambiador de derivaciones bajo carga (LTC) y cambiador de derivaciones sin carga (DETC).

Los dos tipos de cambiadores de derivaciones (Taps) en transformadores de potencia y distribución para operar sin carga (DETC) y, los cambiadores bajo carga (LTC). La construcción de los cambiadores de derivaciones para operar sin carga, son tales que éstos solo serán operados con el transformador fuera de servicio. Operarlos con carga resulta en daño severo del equipo, peligro para el personal y, posible pérdida de la vida. Estos están normalmente localizados en el devanado de alta tensión de un transformador de potencia. Los LTC's están diseñados para ser operados con carga y en forma automática. Los LTC´s pueden estar localizados en los devanados de alta o baja tensión, dependiendo de los requerimientos del usuario,

1.10 Temperatura infrarroja.

Las siguientes elevaciones de temperatura arriba de la ambiental han sido encontradas en la práctica durante inspección infrarroja.

Tabla 8. Variación de la temperatura arriba de la temperatura de 20°C en el medio ambiente

Elevación de Temperatura arriba del ambiente (°C)	Recomendaciones
0 – 10	Escala de reparación en mantenimiento regular; pequeña probabilidad de daño físico.
11 – 39	Reparación en futuro cercano. Inspección por daño físico.
40 – 75	Reparar en futuro inmediato. Desensamblar y checar por probable daño.
> 76	Problema crítico; reparar inmediatamente.

Señalado en Norma ANSI/IEEE STD. 62.1995.

CAPÍTULO II

2.1 Marco metodológico.

En el proceso de desarrollo de las mediciones con los equipos de vanguardia, actualmente utilizados a nivel internacional, siguiendo y respetando los límites máximos y mínimos permitidos en cada una de las mediciones, tanto en los parámetros eléctricos como en sus aislamientos.

En los aislamientos se debe tener cuidado en respetar las condiciones máximas de humedad existente en el medio ambiente con la finalidad de cumplir sus indicaciones y obtener así mediciones confiables, evitando con ello repetirlas nuevamente. La humedad máxima de aceptación indicada en las normas es de 65% al 70%.

Respecto a los parámetros eléctricos, es una ventaja en la cual se pueden realizar las mediciones a cualquier temperatura y humedad existente en el momento de realizarlas. Se recomienda no probar con la existencia de lluvia, para evitar daño del equipo y existir peligro al personal responsable de las mediciones.

El personal que realice las mediciones, de preferencia ingeniero, debe contar con los conocimientos del principio de funcionamiento de los transformadores y tener certificación para el desarrollo de las mediciones. El equipo utilizado en las pruebas debe contar con vigencia de calibración por algún laboratorio reconocido por CFE, en caso de no ser así las mediciones no son creíbles.

Aplicar en forma correcta las normas ANSI/IEEE Std. 62.1995 y el análisis de las mediciones ANSI/IEEE C57.125-1995. (ya corregido). Observar anexo 7, límites máximos y mínimos de aceptación de acuerdo con los valores medidos.

Estas mediciones, se consideran importantes debido a que se conocerán que los resultados obtenidos en cada una de ellas cumplen con las condiciones para su puesta en servicio de acuerdo con las normas nacionales e internacionales o algún error de fabricación que se pueda detectar con las pruebas realizadas para la puesta en servicio.

2.1.2 Se usaron los equipos M4000 (M4K) para conocer los valores y condiciones de factor de potencia y capacitancia en los aislamientos de los devanados, conocer las condiciones de factor de potencia y capacitancia de las boquillas de alta y baja tensión, cuando tienen tap capacitivo o tap de potencial, estas por lo regular las traen las boquillas con tensiones de 400 y 230 kV y, también la prueba de collar caliente que se aplica con un collar de neopreno (semiconductor) y emitir sus condiciones después de obtener los resultados.

2.1.3 Se realizó prueba de factor de potencia a una muestra de aceite en la celda de prueba.

2.1.4 Se midieron las pérdidas del núcleo y se observaron sus condiciones, mediante una prueba con circuito abierto en baja tensión y energizando fase por fase H1-H0, H2-H0 y H3-H0, para emitir sus condiciones después de obtener los resultados.

2.1.5 Se conocieron las condiciones de contacto (5), mediante las mediciones de relación de transformación a una tensión de prueba de 10 kV en las terminales de alta tensión.

2.1.6 Se realizó la prueba de factor de potencia al aceite aislante y rigidez dieléctrica, observando el resultado.

2.1.7 Se realizó la prueba con corto circuito para conocer las pérdidas en el cobre y verificarla con las pérdidas de excitación obtenidas con la prueba con circuito abierto en baja tensión y energizando por alta tensión, la prueba es monofásica, es decir, se aplican tres pruebas como se indican en los valores de prueba y sus conexiones.

2.1.8 Se aplicó la prueba del Barrido de Respuesta a la Frecuencia en los equipos de transformación, con un rango de frecuencia de ser posible de 5 Hz a 10 MH.

2.1.9 Midiendo tensión con circuito abierto en baja tensión, midiendo baja tensión con circuito abierto en alta tensión y la prueba de cortocircuito en baja tensión.

2.1.10 IEEE Std. C57.149^{TM} 2012. IEEE guía para la aplicación e interpretación del análisis del barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite.

2.1.11 Las pruebas de corriente directa se aplicaron a los aislamientos de los devanados del transformador, debe de realizarse de ser posible, a 5 o 10 kV. De un minuto a 10 minutos para evaluar el índice de polarización y emitir su diagnóstico. El índice de polarización se calcula dividiendo la lectura a 10 minutos entre la lectura a 1 minuto.

2.1.12 Un equipo de medición RVM, de corriente directa para medir la humedad existente en los devanados_del_transformador alta y baja tensión. Este equipo trabaja en forma automática programando el tiempo de medición. Es un complemento muy importante como a soporte a las mediciones de resistencia de aislamiento realizadas con otro equipo, un megómetro.

2.1.13 Un medidor de rigidez dieléctrica para una medición precisa y rápida. Los electrodos semiesféricos tienen la virtud encontrar con mayor precisión la humedad debido a su diseño que los electrodos planos.

3. Barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite.

Con estos equipos y los resultados de prueba emitidos es un hecho que realizaremos un reporte de las condiciones reales del equipo bajo prueba y definir, si se energiza o se realiza una inspección interna para valorar las condiciones existentes.

ANSI/IEEE C57.125 1995. Guía IEEE para Investigación de fallas, documentación y análisis para transformadores y autotransformadores de potencia y reactores en derivación.

Guía IEEE Std. C57.149TM 2012. IEEE para la aplicación e interpretación del análisis del barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite.

Conociendo las normas ANSI/IEEE. C57.125.1995 como las normas ANSI/IEEE.Std. 62.1991 o las más actualizadas para pruebas de campo y la ANSI/IEEE C57.125 para emitir reporte de las condiciones de los equipos bajo prueba, ANSI/IEEE C57.12.00 para los niveles del NBAI o BIL (ver anexo 3). Los equipos deben tener una vigencia de calibración y el responsable de las pruebas debe contar con una certificación, sin estas dos condiciones, los resultados se rechazan o no se les permite probar.

Conexión Delta – Estrella (Δ-Y). Las conexiones y los diagramas vectoriales para el arreglo Δ-Y alimentando una carga equilibrada de factor de potencia unitario. Los diagramas vectoriales pueden deducirse del diagrama. Se observa que las tensiones y corrientes de línea primarias y secundarias están desfasadas entre si 30°. La relación de las tensiones de línea del primario al secundario es 1 / √3 veces la relación de transformación para un transformador del banco. Ninguna dificultad aparece observando las corrientes de tercera armónica, ya que la existencia de una conexión en Δ permite una trayectoria para estas corrientes. El desequilibrio en las cargas causa muy pequeño desequilibrio de la tensión, ya que el primario del transformador está conectado en delta.

Debido al desplazamiento de 30° entre las tensiones primarias y secundarias, no es posible poner en paralelo un banco semejante con un banco de transformadores Δ-Δ o bien Y-Y

Los diagramas vectoriales del secundario aparecerán coherentes al menos que se hagan girar 180°, causando de este modo que V_{ba} esté desfasada (180° + 30°) con respecto V_{AB}. Debido a las direcciones arbitrarias asumidas como positivas en la dirección de las corrientes en la estrella.

CAPÍTULO III

3.1 Interpretación de resultados y corrección de problemas.

En las pruebas realizadas al sistema aislante y parámetros eléctricos dieron valores dentro de la normativa ANSI/IEEE Std. 62.1991, en donde se tuvieron problemas fue en la prueba de resistencia de aislamiento, en donde se obtuvo un índice de polarización justo de 1.5, menor a 2 en aislamiento de alta tensión.

En la prueba de tensión de recuperación (RVM), se observaron siete picos que nos indican cada uno la existencia de moléculas de agua esparcidas en el aislamiento. Ver anexo 15.

En el Barrido de Respuesta a la frecuencia, se observó pérdida de geometría interna encontradas desde los 10 Hz hasta los 10 MHz. El transformador operará en el tap 3. Ver anexo 12.

En cada una de las gráficas se indicaron las conclusiones y las acciones a seguir para su corrección. En un transformador con condiciones normales de operación, se debe de programar un mantenimiento para inspección interna a los cuatro años de servicio.

Este mismo equipo se utiliza para pruebas de cables de potencia, de 23 kV o cualquier nivel de tensión, que no tenga una distancia superior a 100 metros y terminales de conexión, transformadores de instrumento, aislador soporte en buses de fase aislada, transformadores de distribución, interruptores, apartarrayos.

Conociendo la problemática encontrada en los gráficos de respuesta a la frecuencia, debe ser la base para tomar las acciones correctivas en las partes afectadas por el disparo, especialmente corregir el movimiento de los devanados de baja tensión, boquillas de alta y baja tensión y, en caso de requerirse encontrar en el mercado.

Lo más rápido es encontrar unas boquillas similares en otras centrales generadoras y, nuevas de ser posible o bien almacenadas.

CAPÍTULO IV

4.1 Ejemplos de prueba de diagnóstico.

PRUEBAS DE DIAGNOSTICO A TRANSFORMADOR PRINCIPAL 4MST01 MARCA FERRANTI PACKARD SERIE TP-610 UNIDAD 4 PRUEBAS PARA PUESTA EN SERVICIO

.

Tabla 3.1. Datos de placa transformador bajo análisis

Marca	Capacidad MVA	Configuración	Fases	Año de fabricación	Serie	Tanque tipo	
Ferranti Packard	135/375/420	Y – D	3	2005	TP- 610	sellado conservador	
Peso total	400/20 kV	Fábrica	Cond. prueba	H.R %	Tipo	Enfriamiento	
380,387 kg	400/√3/20	México	soleado	32	Núcleo	aceite	
Clase	Peso total	Tipo	Z% 135 MVA	Z% 375 MVA		127,541	lts
ONAN/OFAF	380,387	Núcleo	3.892 %	10.832 %	Baja tensión	Neutro	
NBAI	Devanados	1495	Boquillas	1550 kV	150 kV	200 kV	
Observaciones: 1. Pruebas de puesta en servicio 2. Fecha de prueba.							

Datos obligatorios para aplicación de las pruebas a transformadores. Norma ANSI/IEEE STD.62. 1995

Tabla 3.2. Prueba de factor de potencia y capacitancia en aislamientos de alta y baja tensión.

Prueba	Aislam de Alta y tensión	kV	mA	Watts	% Pwr Medid	Factor Corre	Fact correc	Capacitanc pF	
1	CH + CHL	10	41.53	0.985			0.96	11017	
2	CH	10	17.630	0.444	0.25	0.24	0.96	4678	G
3	CHL (UST)	10	23.820	0.584	0.25	0.24	0.96	6320	G
4	CHL	10	23.900	0.541	0.23	0.23	0.96	6339	
5	CL + CHL	10	123.80	5.037			0.96	32841	
6	CL	10	99.98	4.435	0.44	0.42	0.96	26520	G
7	CHL (UST)	10	23.820	0.589	0.25	0.24	0.96	6320	G
8	CHL	10	23.820	0.602	0.25	0.24	0.96	6321	

Valores obtenidos en la prueba de factor de potencia y capacitancia.

Interpretación de los resultados.

1. Los valores de factor de potencia y capacitancia obtenidos en cada una de las mediciones son satisfactorios.
2. En la capacitancia los valores son similares a los de fábrica y el factor de potencia son menores del ≤ 0.5% señalado en las normas ANSI/IEEE Std. 62 y C57.125.

Nota: por ser un equipo de medición hasta 10 KV, este equipo de medición M4000 (M4k) tiene una constante del valor de 265 para verificar los valores de prueba emitidos en la capacitancia.

- Aislamiento principal C_1.

Tabla 3.3. Pruebas a los aislamientos principal C_1 y del tap de prueba C_2 de boquillas.

Boquil	Datos de placa			Resultados de prueba F. Med								
	Fab	Tipo	Serie	PicoF	FP%	KV	mA	watts	Medid	Cor	C(pF)	RTG
H1	P&V	PNO	69123	468	0.40	10	1.73	0.070	0.40	0.40	458.9	G
H2	P&V	PNO	69124	471	0.41	10	1.74	0.062	0.36	0.36	461.5	G
H3	P&V	PNO	69125	464	0.40	10	1.705	0.065	0.38	0.38	452.3	G
H0	A-BB	O+C	4C06890501	337	0.24	10	1.260	0.029	0.23	0.24	334.3	G
X1	A-BB	T	4C06890404	1758	0.32	10	6.637	0.210	0.32	0.31	1760	G
X2	A-BB	T	4C06890405	1779	0.32	10	6.724	0.213	0.32	0.31	1783	G
X3	A-BB	T	4C06890407	1736	0.33	10	6.550	0.207	0.32	0.31	1737	G

Datos obligatorios para aplicación de las pruebas a transformadores. Norma ANSI/IEEE STD.62. 1995

- ✓ Los valores medidos de factor de potencia y capacitancia en los aislamientos de las boquillas están dentro de los valores de normativa.

Tabla 3.4. Pruebas a los aislamientos del tap de prueba 2Aislamiento del tap de prueba C_2.

Boq	Fabric.	Tipo	Serie	C (pF)	FP%	kV	mA	W	Resul.F.P.%y C(pF)			RTG
H1	P&V	PNO	69123	18728	0.40	0.5	70.44	2.908	0.41	0.41	18685	G
H2	P&V	PNO	69124	17142	0.41	0.5	64.48	3.373	0.52	0.52	17105	G
H3	P&V	PNO	69125	16093	0.40	0.5	60.46	2.545	0.42	0.42	16039	G
H0	A-BB	O+C	4C06890 501	504	0.14	0.5	1.934	0.048	0.25	0.25	512.9	G
X1	A-BB	T	4C06890 501	363	0.51	0.5	1.441	0.081	0.56	0.56	382.1	G
X2	A-BB	T	4C06890 404	362	0.45	0.5	1.411	1.077	0.55	0.55	374.3	G
X3	A-BB	T	4C06890 405	363	0.42	0.5	1.427	0.072	0.50	0.50	378.6	G

Datos obligatorios para aplicación de las pruebas a transformadores. Norma ANSI/IEEE STD.62. 1995

Tabla 3.5. Prueba de collar caliente a boquillas.

Boquilla	Serie	Modo de prueba	Faldón Num.	KV	mA	Watts	RTG	
H0	4C06890501	Tierra	1	10	0.094	0.011	G	
X1	4C06890404	Tierra	1	10	0.304	0.153	I	
X2	4C06890405	Tierra	1	10	0.296	0.112	I	
X3	4C06890407	Tierra	1	10	0.277	0.090	G	

Datos obligatorios para aplicación de las pruebas a transformadores. Norma ANSI/IEEE STD.62. 1995.

Resultados observados:

- ✓ Los resultados obtenidos son satisfactorios, se requiere limpieza con solvente dieléctrico a porcelana antes de entrada en servicio para eliminar contaminación. las pérdidas en watts obtenidas no exceden de 0.3.
- ✓ No se tuvo escalera o grúa que impide mediciones en boquillas de alta y baja tensión.

Tabla 3.6. Prueba de factor de potencia al aceite aislante.

Localización de la muestra			Temp.	kV	mA	Watts	Factor de potencia %		
Valv. Muestreo inferior			30	10	0.883	0.003	0.02	0.64	G

Datos obligatorios para aplicación de las pruebas a transformadores. Norma ANSI/IEEE STD.62. 1995

- ✓ EL valor de prueba obtenido es satisfactorio.

$$\bar{X} = \frac{1}{5} X i \quad y \quad s = \sqrt{1/4 \left(\sum_{i=1}^{5} X_i^2 - 5 \bar{X}^2 \right)}$$

Para realizar y analizar la medición con electrodos semiesféricos utilizar la fórmula anterior:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} X i \quad y \quad s = \sqrt{1/2 \left(\sum_{i=1}^{5} X_i^2 - 5 \bar{X}^2 \right)}$$

$\bar{X}i$ = *media de los cinco valores individuales,*

Xi = *los voltajes de ruptura en kV, y*

s = *desviación estandar*

$\frac{s}{\bar{X}}$ = *índice de evaluación mediciones rigidez dieléctrica aceite*

donde

$$\bar{X} = 48.0 + 47.0 + 46.0 + 48.0 + 49.0 = 47.6 \ kV$$

$$s = \sqrt{1/2\,(11334 - 11328.8)} = 1.613$$

- ✓ La prueba de rigidez dieléctrica realizada al aceite aislante es un promedio de cinco mediciones de una muestra. El tiempo entre prueba y prueba fue de 3 minuto, obteniendo un valor de 47.6 kV. Equipo de prueba marca Hipotronics modelo CC60A # 1725-26 tipo CS14. Equipo calibrado por CEMYCO S.A. C.V con fecha 30 julio 2005. calibración con vigencia.
- ✓ Los valores de factor de potencia y rigidez dieléctrica son satisfactorios. La relación de la desviación estándar entre el promedio de las cinco mediciones no excede del 0,1 señalado en las normas ASTM-D-877.

Prueba de corriente de excitación.

Cambiador de taps sin carga.

Mfr: Type :
Steps: 5 Boost:+ 2% Buck:- 2%
PSN-Found: 3 PSN-Left: 3

Tabla 3.7. Prueba con circuito abierto para medir la corriente de excitación.

pba	Posición DETC	KV	H1 – H0		H2 – H0		H3 – H0		RTG
			mA	watts	mA	Watts	mA	watts	
1	1	10	33.360	244.60	25.490	193.60	33.450	244	G
2	2	10	35.120	255.60	26.920	202.60	35.270	255.30	G
3	3	10	37.140	268.10	28.540	212.60	37.300	267.80	G
4	4	10	39.290	281.80	30.270	223.30	39.460	281.40	G
5	5	10	41.520	296.20	32.020	41.720	41.720	295.90	G
6	3	10	37.090	268.20	28.420	37.250	37.250	268.00	G

Datos obligatorios para aplicación de las pruebas a transformadores. Norma ANSI/IEEE STD.62. 1995.

- ✓ Los valores son satisfactorios, están dentro de la diferencia del ± 10% en el tap nominal; en la próxima salida, realizar un ajuste al mecanismo para observar la resistencia de contacto.
- ✓ Cumple con lo estipulado en la prueba con circuito abierto: 2 mediciones extremas altas y similares y una fase baja, fase central por el efecto de la reluctancia.

Doble Ratio (H-L) Tests

True Capacitance: 10290

HV Winding: L-N LV Winding: L-L

Tabla 3.8. Prueba de relación de transformación en devanados

Pos. Tap	KV A.T.	KV B.T.	Relac. Teóric	H1-H0 X1-X2	H2-H0 X2-X3	H3-H0 X3-X1	Límite inferior	Limite superior	RTG
1	242.48	20	12.124	12.134	12.129	12.134	12.063	12.185	G
2	236.71	20	11.836	11.836	11.843	11.834	11.843	11.895	G
3	230.94	20	11.547	11.546	11.545	11.549	11.489	11.605	G
4	225.16	20	11.258	11.251	11.251	11.251	11.202	11.314	G
5	219.39	20	10.970	10.957	10.957	10.957	10.915	11.024	G
3	230.94	20	11.547	11.548	11.548	11.548	11.489	11.605	G

Prueba indicada en Norma ANSI/IEEE STD.1991y /ANSI/IEEEC-57.125.1995

- ✓ El valor de relación de transformación está dentro del ± 0.5% marcado en la normativa. Indican mediciones en cada una de las derivaciones del cambiador de derivaciones. Normas ANSI/IEEE/C57.125.95 y ANSI/IEEE ANSI/IEEE.Std 62.1991
- ✓ En algunas mediciones los valores se encuentran en el límite mínimo de aceptación.

Tabla 3.9. Información para prueba de reactancia e impedancia de dispersión. Tap 1.

Fecha	Localización	Fabricante	Serie número	Configuración prueba	Tipo devanado	Frecuencia
04/05/06	----	Ferranti Packard	TP – 610	EQUIV. 3F	Estrella – Delta	60 Hz
MVA BASE	135.000 MVA	Frecuencia 60 Hz	Base kV 420	% impedancia de placa 3.88%	Punto de Referencia Impedancia 3.88%	Punto de referencia reactancia 3.88%
Tap 1						
Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos
Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos	Describa los resultados vistos

Datos indicados por Norma ANSI/IEEE STD.62-1991 y confirmados por Norma ANSI/IEEE C-57-125 1995

Tabla 3.10. Resultados de prueba Tap 1.

	A: H1-H2 X123	B: H2H3 X123	C:H3H1 X123
Voltaje de prueba	82:72	85.07	82.74
Corriente	0.8133 A	0.8339 A	0.8150 A
Pérdidas en watts	1.4390 W	1.9930 W	1.9590 W
Factor de potencia	2.14 %	2.81 %	2.91 %
Inductancia	269.40 mH	270.20 mH	268.90 mH
Resistencia	2.175 ohms	2.866 ohms	2.950 ohms
Impedancia	101.60 ohms	101.90 ohms	101.40 ohms
Impedancia % prom.	3.89 %		
Reactancia	101.60 ohms	101.90 ohms	101.40 ohms
Prom % reactancia	3.89 %		
Prom % Delta X %	0.21 %		
Prom % Delta Z %	0.25 %		

valores emitidos por método del equivalente. Trifásico de Norma ANSI/IEEE Std. 62-1991

- ✓ La diferencia encontrada entre el valor indicado en la placa de datos y el medido está dentro del ±3.0% según lo indicado en normas ANSI/IEEE STD 62.1991. ANSI/IEEE C.57. 125. 1995 Las cuales señalan un ± del 3.0%

Tabla 3.11. Prueba de reactancia e impedancia de dispersión a devanados. Método por el equivalente trifásico. Tap 3.

Fecha	Localizac.	Fabricante	Serie número	Configuración prueba	Tipo devanado	Frecuencia
04/05/06	----	Ferranti Packard	TP – 610	EQUIV. 3F	Estrella – Delta	60 Hz
MVA BASE	135.000 MVA	Frecuencia 60 Hz	Base kV 400	% impedancia de placa 3.88%	Punto de Referencia Impedancia 3.88%	Punto de referencia reactancia 3.88%
Tap 3						

Referencia. Norma ANSI/IEEE STD 62.1991

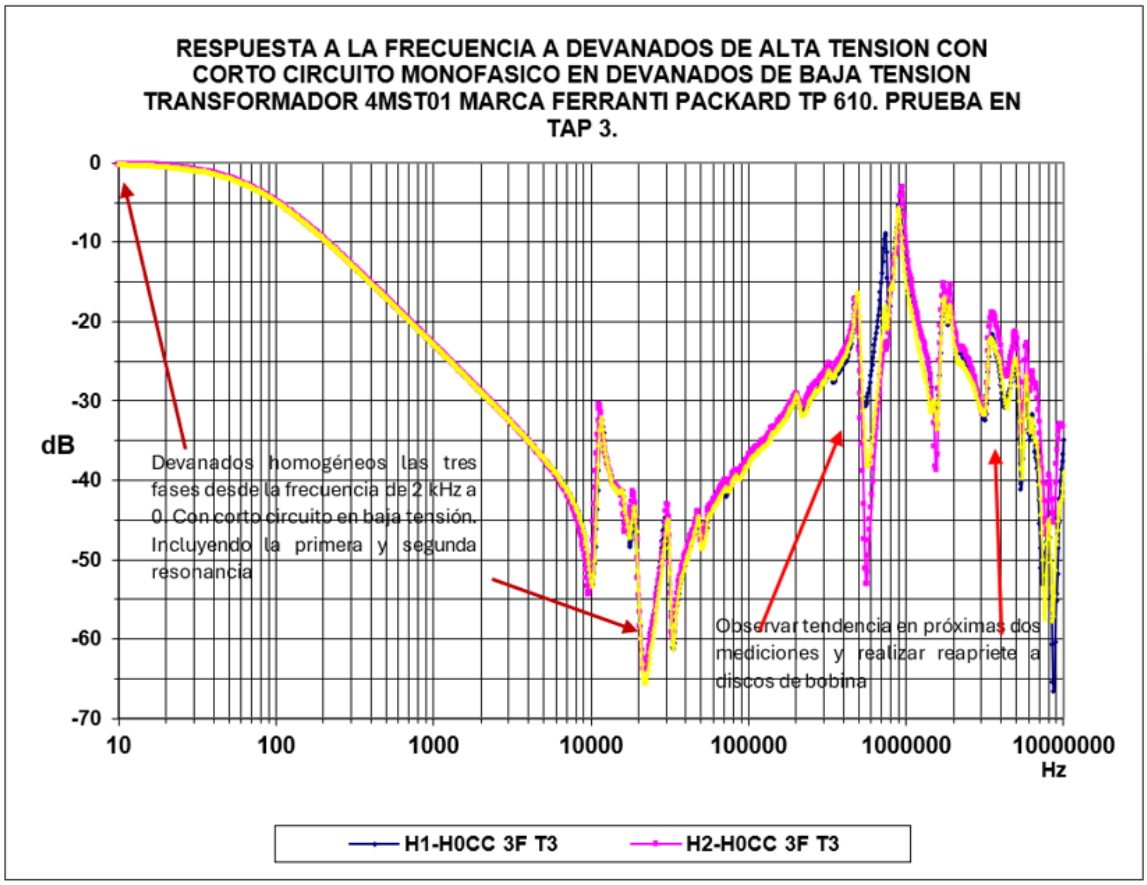
Tabla 3.12. Resultados de prueba.

	A: H1-H2 X123	B: H2H3 X123	C:H3H1 X123
Voltaje de prueba	189:30	186.90	187.50
Corriente	2.045 A	2.011 A	2.028 A
Pérdidas en watts	8.919 W	11.440 W	12.680 W
Factor de potencia	2.30 %	3.04 %	3.33 %
Inductancia	245.40 mH	246.50 mH	245.20 mH
Resistencia	2.133 ohms	2.829 ohms	3.082 ohms
Impedancia	92.56 ohms	92.99 ohms	92.47 ohms
Impedancia % prom.	3.91 %		
Reactancia	92.53 ohms	92.94 ohms	92.47 ohms
Prom % reactancia	3.91 %		
Prom % Delta X %	0.41 %		
Prom % Delta Z %	0.45 %		

Resultados emitidos por el método equivalente trifásico Norma ANSI7IEEE Std. 62. 1991.

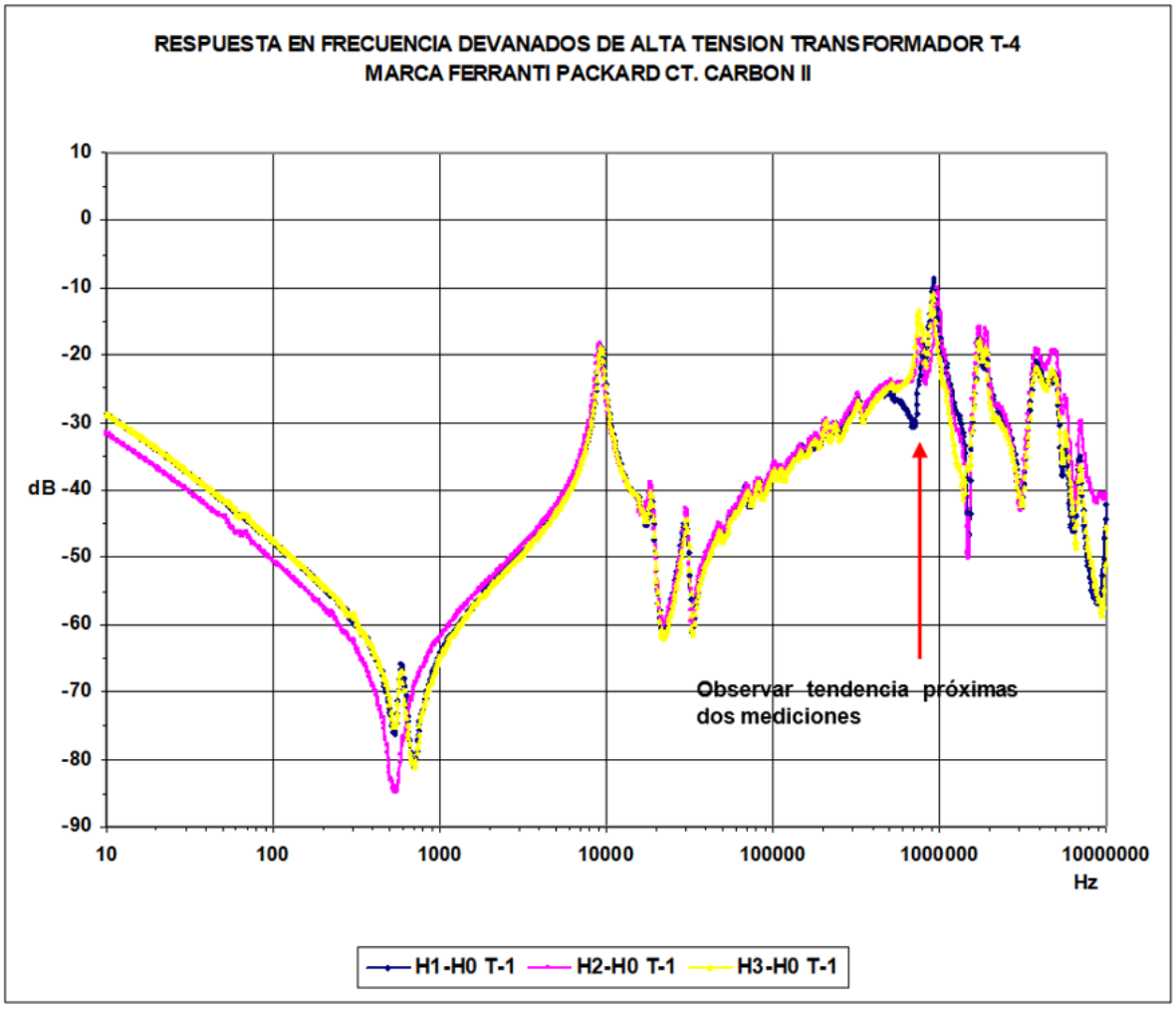
- ✓ La diferencia medida de impedancia, con respecto al valor señalado en placa de datos del transformador está dentro del ± 3.0%.

Gráfica 1. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.



Software de gráfico incluido dentro del equipo de medición marca Doble Engineering y módulo M4110 para aplicar los rangos de corriente solicitada por software inyectada por un variac.

Gráfica 2. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.

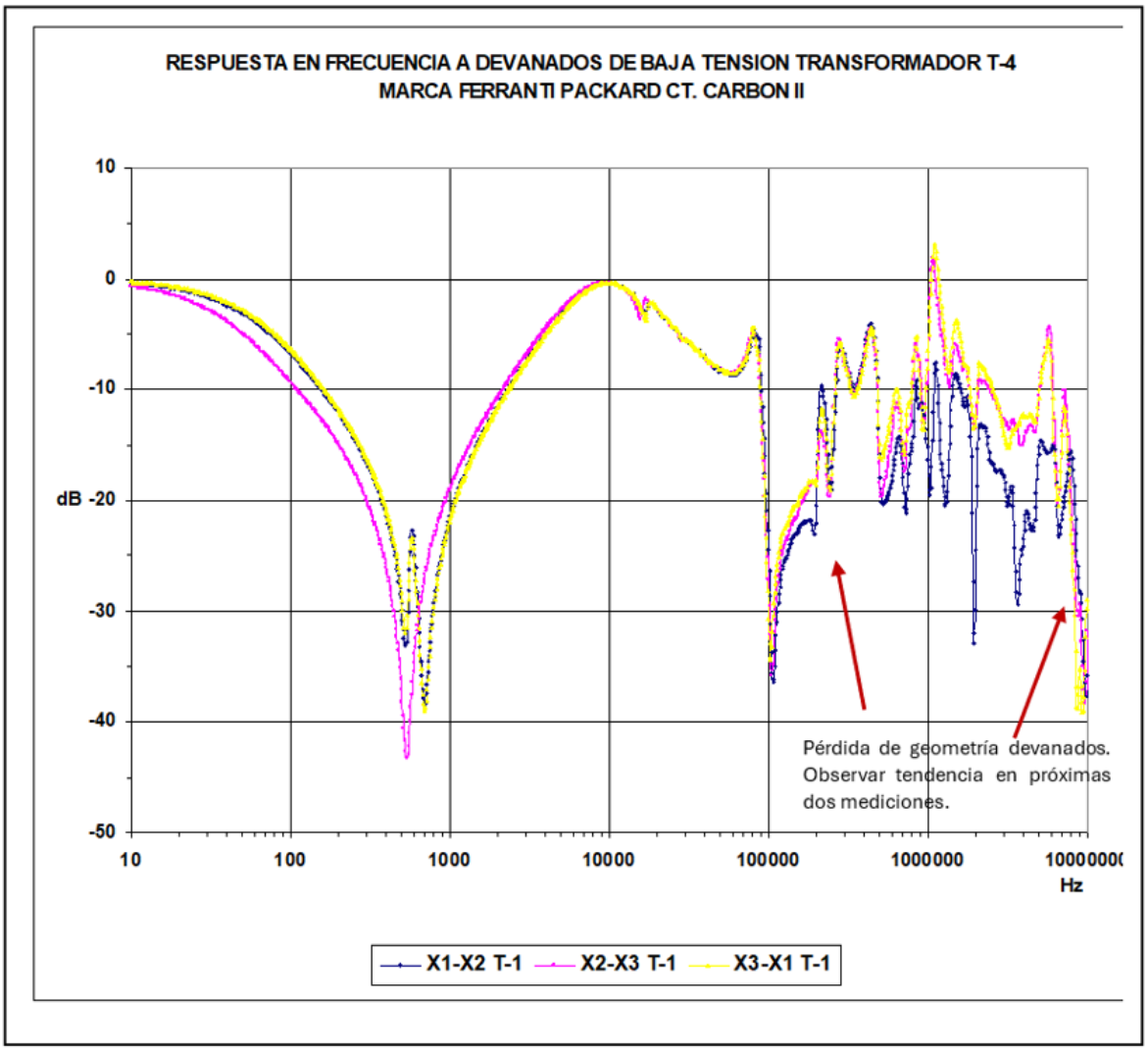


Software de gráfico incluido dentro del equipo de medición marca Doble Engineering y módulo M4110 para aplicar los rangos de corriente solicitada por software inyectada por un variac.

- ✓ De la frecuencia de 10 Hz, desde los -30 dB a la frecuencia de 10,000 Hz, se observan las tres fases del transformador perfectamente bien definidas, la fase central en paralelo con las fases extremas altas H1-H0 y H3-H0 con una resonancia en los 600 Hz para la fase central H2 y 800 Hz para las fases extremas H1-H0 y H3 – H0.
- ✓ De las medias frecuencias entre las frecuencias 12 kHz a 850 kHz aproximadamente, en la fase central H2-H0 se observa un inicio de pérdida de geometría interna de H2-H0 a 2 MHz, es necesario programar una inspección interna para el próximo mantenimiento.
- ✓ Falta realizar pruebas en fábrica antes de la salida de los equipos al sitio de instalación al sitio de instalación.

PRUEBAS DE RESPUESTA LA FRECUENCIA A DEVANADOS DE BAJA TENSION TRANSFORMADOR PRINCIPAL 4MST01 SERIE TP-610. PRUEBA CON CIRCUITO ABIERTO EN DEVANADOS DE ALTA TENSION.

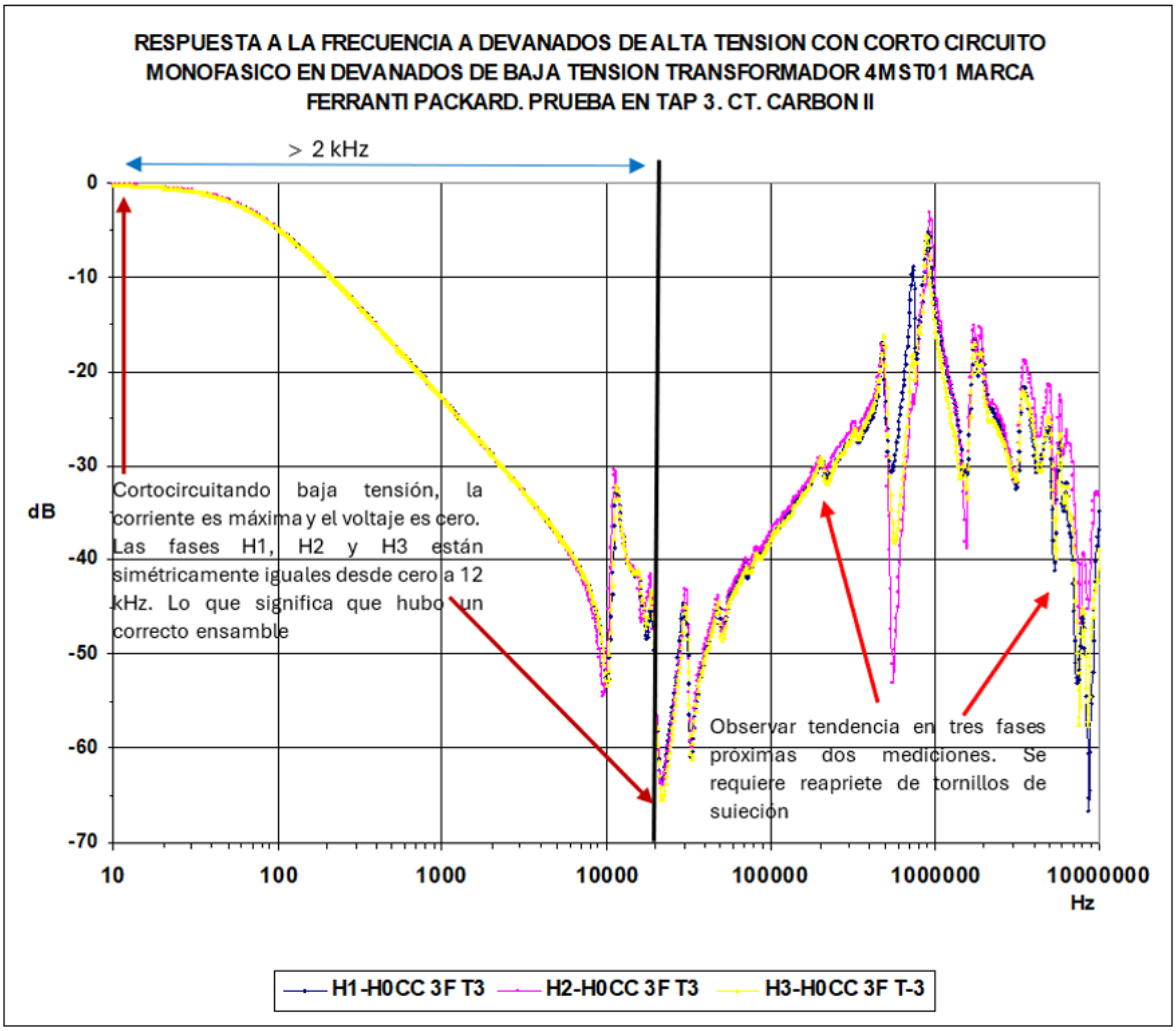
Gráfica 3. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.



Referencia: Software de gráfico incluido dentro del equipo de medición marca Doble Engineering y módulo M4110 para aplicar los rangos de corriente solicitada por software inyectada

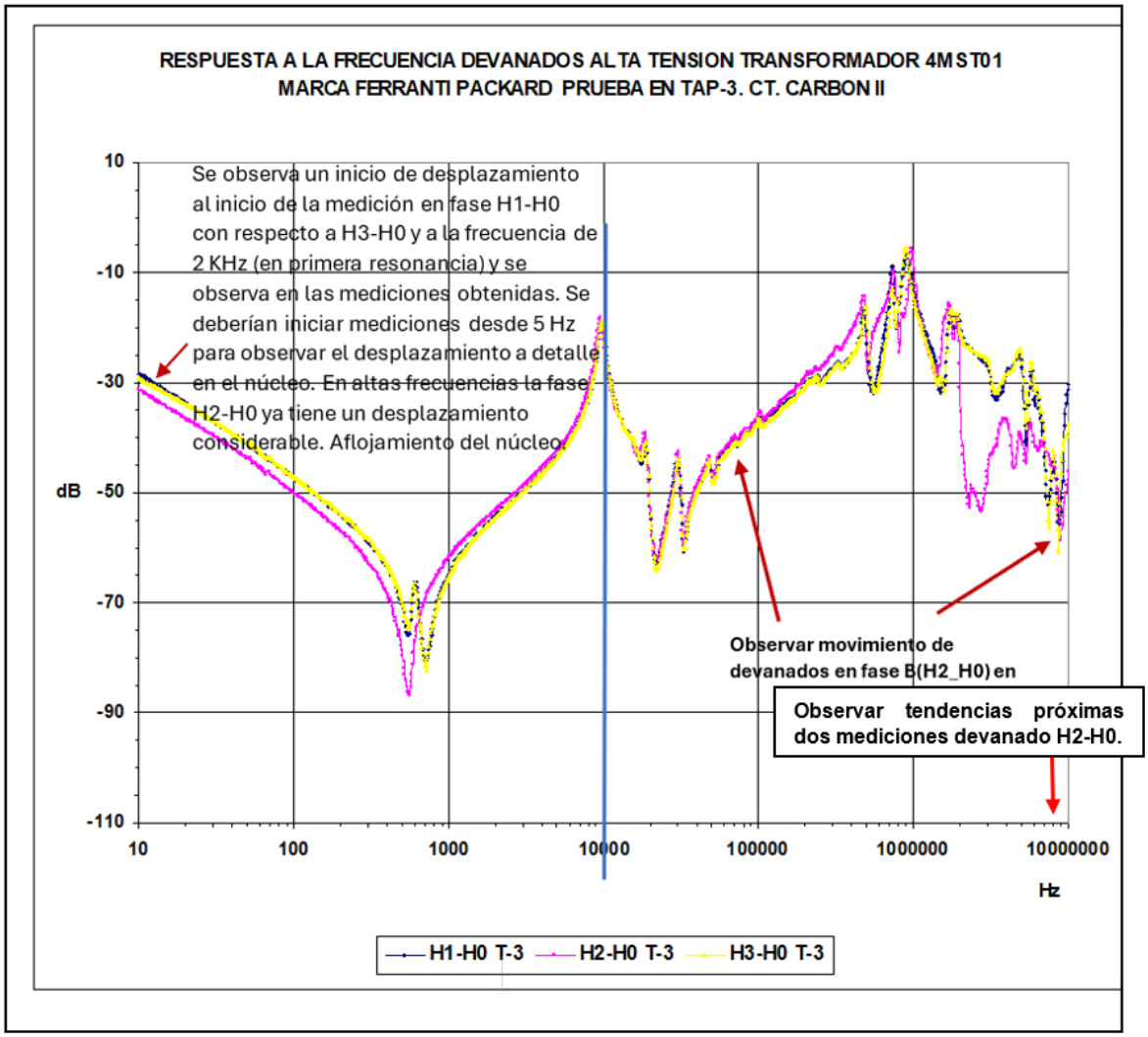
- Se observan distorsiones de fase X1-X2 fuertes entre las frecuencias altas 100000 kHz hasta 8 MHz aproximadamente en la misma fase. Un motivo más para programar la inspección en el tap 1.
- Después de la frecuencia de 100 kHz se tiene una pérdida de geometría en las tres fases
- Revisar tornillos de sujeción de los discos de los devanados

Gráfica 4. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.



- ✓ De la frecuencia 10 Hz a 20 kHz, el conductor de las tres fases con la prueba de cortocircuito en baja tensión, están homogéneos.
- ✓ De la frecuencia de 20 kHz, hasta 10 MHz se tiene pérdida de geometría en las tres fases. Hay que revisar los tornillos de sujeción de los devanados.
- ✓ Las mediciones son analizadas en el tap 3.

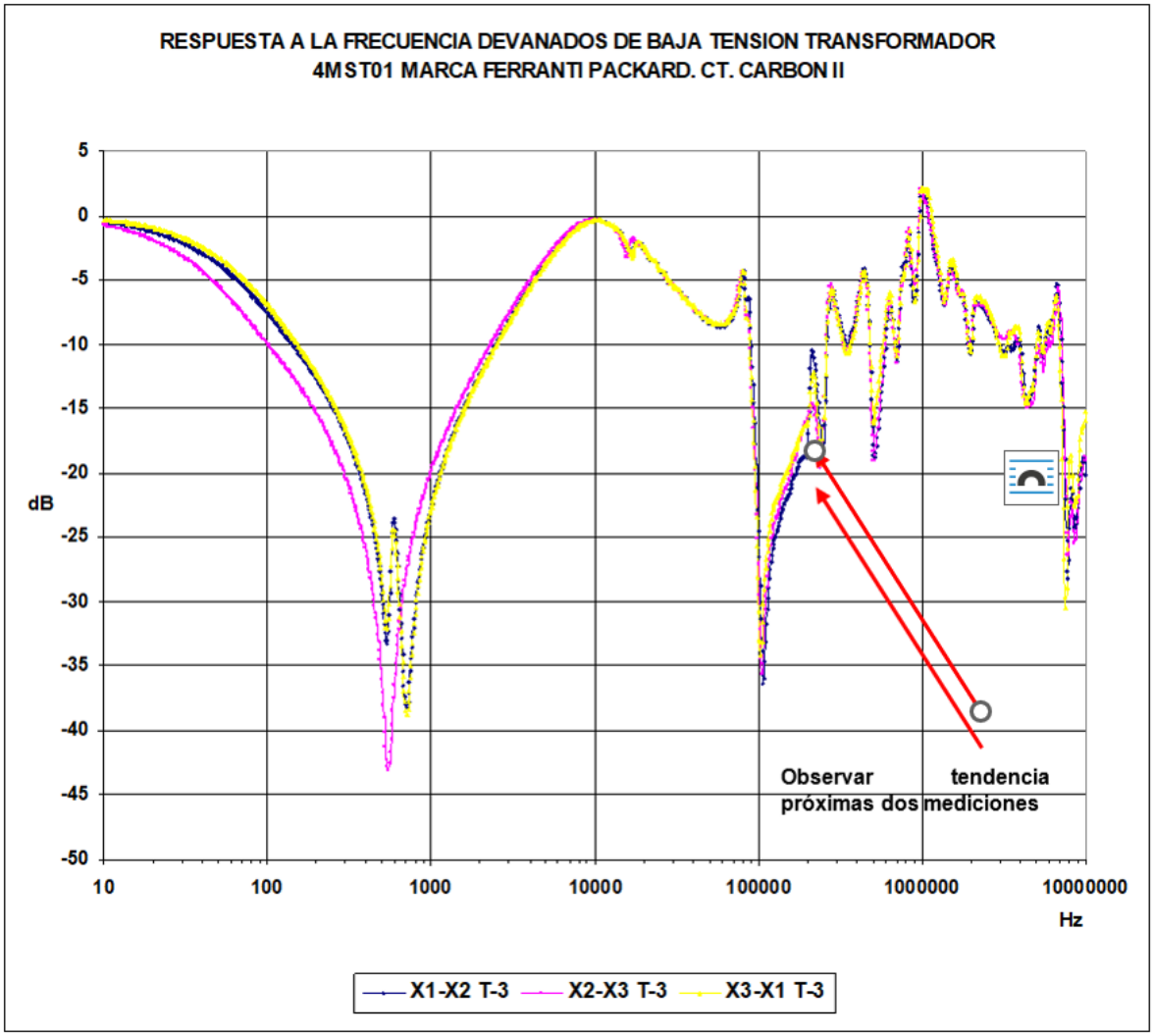
Gráfica 5. Rango de frecuencia de 10 Hz a 10 MHz.



1. En las próximas mediciones, repetir pruebas de SFRA en tap 1 y 3 para verificar estas mediciones que son la huella del transformador.
2. Realizar una revisión de los yugos del núcleo para evitar más desplazamiento de la fase H1-H0.
3. En las próximas mediciones debe de realizarse una calibración de los cables de prueba del equipo.
4. Preparar cables AWG calibre 1/0 forrado y con zapata de ojillo para atornillar a presión en zapata de boquillas de baja tensión.
5. Comparar resultados con estas mediciones que son la huella y valores iniciales.

PRUEBAS DE RESPUESTA LA FRECUENCIA A DEVANADOS DE BAJA TENSION TRANSFORMADOR PRINCIPAL 4MST01 SERIE TP-610. PRUEBA CON CIRCUITO ABIERTO EN DEVANADOS DE ALTA TENSION. TAP 3.

Gráfica 6. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.



RESISTENCIA DE AISLAMIENTO TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS

DATOS EQUIPO

REGION:
CENTRAL: UNIDAD: 4
EQUIPO: TRANSFORMADOR PRINCIPAL 4MST01
MARCA FERRANTI PACKARD TIPO: NUCLEO
SERIE: TP-610 IMPEDANCIA Z= 10.832 % TAP -3
CAPACIDAD: 135/375 MVA
TENSION : 400 KV TENSION X: 20 kV
AÑO DE FABRICACION: 2005 HRS. DE OPERACIÓN:
TIPO DE ENFRIAMIENTO: ONAN/OFA VOLUMEN DE ACEITE: 115,350 LTS

FECHA DE: PRUEBA: 05-05-2006
FECHA ULTIMA PBA: PRIMERA MEDICION
TEMP. DEV: 34 °C TEMP.ACEIT 33 °C
TEMP. 33 °C HUM. REL: 34 %

DIAGRAMA VECTORIAL

ALTA TENSION BAJA TENSION TENSION
ESTRELLA DELTA

PRUEBA No.	1			2			3 (2005)			4 (2005)		
TENSIÓN PBA	5000 VCD			5000 VCD			5000 VCD					
A LÍNEA	H			X			Y			X		
A GUARDA												
A TIERRA	X + Y + TANQUE			H + Y + TANQUE			X + H + TANQUE			H		
TIEMPO (MINUTOS)	LECT	K	GΩ	LECT	K	GΩ	LECT	K	GΩ	LECT	K	GΩ
¼	6.33		GΩ	1.66		GΩ			GΩ			GΩ
½	6.68		GΩ	1.88		GΩ			GΩ			GΩ
¾	7.28		GΩ	2.11		GΩ			GΩ			GΩ
1	7.65		GΩ	2.32		GΩ			GΩ			GΩ
2	8.11		GΩ	3.03		GΩ			GΩ			GΩ
3	9.65		GΩ	3.30		GΩ			GΩ			GΩ
4	10.9		GΩ	3.75		GΩ			GΩ			GΩ
5	11.1		GΩ	4.16		GΩ			GΩ			GΩ
6	11.9		GΩ	4.56		GΩ			GΩ			GΩ
7	12.4		GΩ	4.86		GΩ			GΩ			GΩ
8	12.9		GΩ	5.01		GΩ			GΩ			GΩ
9	13.6		GΩ	5.21		GΩ			GΩ			GΩ
10	14.2		GΩ	5.49		GΩ			GΩ			GΩ
RELACIÓN 3/1												
RELACIÓN 10/1	1.85			2.37								

EQUIPO DE PRUEBA	OBSERVACIONES
· MEDIDOR DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO . MCA: MEGGER	· Se tiene índice de polarización justo en aislamiento de alta
MODELO: BM25 SERIE: 050805/2046	. Tensión.
TENSION DEL EQUIPO: 500-5000 VCD RANGO: 0 – 5T Ω	·
· CRONOMETRO: SONY	
· TERMOHIGROMETRO MCA: RADIO SHACK SERIE: S/N	·

PERSONAL DE PRUEBA	GONZALO REGALADO SALAZAR	FORMATO K3332-311-05	FECHA: 2006 05 05 AÑO MES DÍA

RESISTENCIA OHMICA TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS

DATOS EQUIPO

REGIO
CENTR **UNIDAD:**
SERVIC 112
MARC FERRANTI PACKARD **TIPO NUCLEO**
SERIE: TP – 610 **Impedancia Z: 10.872 %**
CAPACID 135/375 MVA
TENSION 400 / √3 **TENSION X: 20 KV**
AÑO DE FABRICACION: **HRS. DE OPERACIÓN:**
TIPO DE SELLADO-CONSERVADOR
TIPO DE ENFRIAMIENTO: **VOLUMEN DE ACEITE:115,350**

FECHA DE: PRUEBA: 2006-05-05
FECHA ULTIMA PBA: PRIMERA
TEMP. 27 ° **TEMP.AC 27 °C**
TEMP. 27 °C **HUM. 62 %**

DIAGRAMA VECTORIAL

ALTA TENSION	BAJA TENSION
ESTRELLA	DELTA

PRUEBA TAP		I PRUEBA (mA)	I PRUEBA %	Rt (Ω)	Tt (°C)	K	Ts (°C)	Rs (Ω)	RESISTENCIA DE	DIFERENCIA
1	H1-H0	5	100.2	0.323	27	1.18	75	0.381		
1	H2-H0	5	100.2	0.314	27	1.18	75	0.371		
1	H3-H0	5	100.2	0.323	27	1.18	75	0.381		
3	H1-H0	5	100.2	0.312	27	1.18	75	0.368		
3	H2-H0	5	100.2	0.301	27	1.18	75	0.355		
3	H3-H0	5	100.2	0.311	27	1.18	75	0.367		
5	H1-H0	5	100.2	0.301	27	1.18	75	0.355		
5	H2-H0	5	100.2	0.290	27	1.18	75	0.342		
5	H3-H0	5	100.2	0.299	27	1.18	75	0.353		
	X1-X2	5	100.61	0.00123	27	1.18	75	0.00145		
	X2-X3	5	100.61	0.00130	27	1.18	75	0.00153		
	X3-X1	5	100.61	0.00128	27	1.18	75	0.00151		

OBSERVACIONES:
1. El valor promedio de las mediciones es válido para la resistencia medida.
2. La resistencia que difiera por más de ± 10% del valor promedio debe ser rechazado.

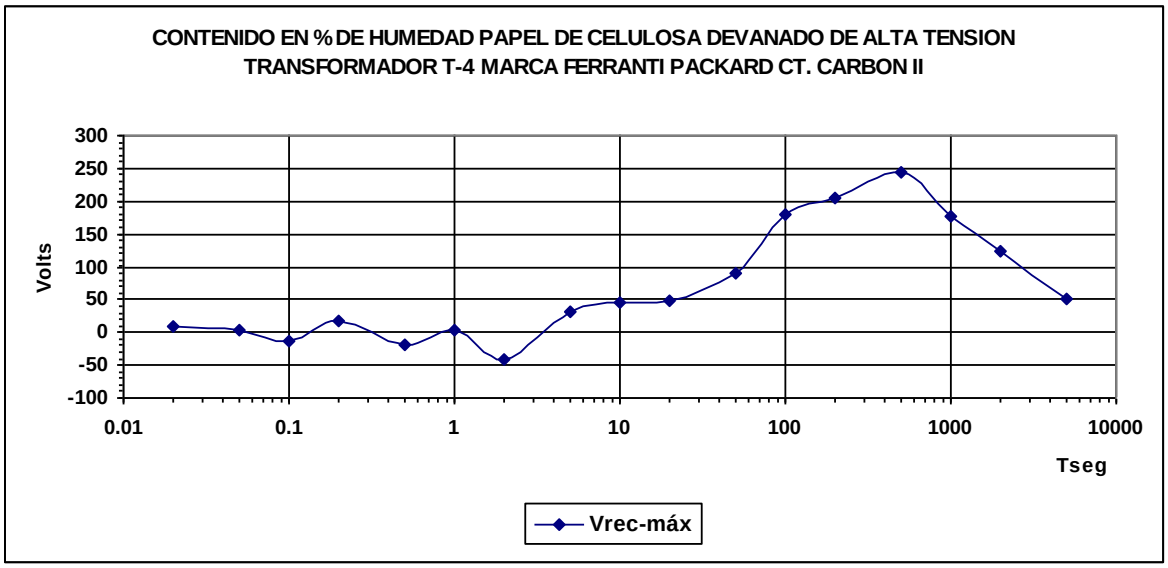
PREPARATIVOS:
1. Las terminales deben estar desconectadas del bus de alimentación.
2. Descargar cualquier carga estática por un período de 20 minutos antes y después de las mediciones.
3. La resistencia debe medirse por cada devanado separadamente.

EQUIPO DE PRUEBA	OBSERVACIONES
- MEDIDOR DE RESISTENCIA DE OHMICA. MCA: MULTI-AMP	- Verificar estas mediciones en próxima salida a mantenimiento.
MODELO: SERIE: 49767	-
TENSION DE PRUEBA: 30 VCD RANGO DE CORRIENTE: 5ª	-
- TERMOHIGROMETRO DIGITAL MCA: Radio Shack SERIE: SIN	-
-	

PERSONAL DE PRUEBA	GONZALO REGALADO SALAZAR		FECHA: 2006 05 05 AÑO MES DIA

FORMATO K3332-311-06

PRUEBA DE TENSION DE RECUPERACION EN DEVANADOS DE ALTA TENSION
TRANSFORMADOR PRINCIPAL 4MST01 SERIE TP-610 MARCA FERRANTI PACKARD.



Gráfica 7. Medición de tensión de recuperación.

Tabla 1. Valores de Tensión de Recuperación.

Tseg	Vmáx-rec (V)	H_2O %	Tcrit (°C)
0.03	10.6	6.0	43
0.20	17.6	5.1	48
0.92	5.5	4.4	54
8.15	44.8	3.3	65
427.8	246.4	1.4	102

Tabla 2. Valores límite para condiciones confiables de transformadores.

Procedimiento	Transformadores nuevos	Transformadores en servicio/viejos
Factor de potencia	< 0.5%	< 2.0%
Gas total disuelto	< 0.5%	< 0.8%
Contenido de humedad	< 10 ppm	< 15 ppm
Relación de vueltas	Dentro de 0.5% placa	Dentro de 0.5% placa

*Si las unidades son equipos sellados con nitrógeno, el gas total disuelto no excederá de 1.0%

Tabla 3. Principios para interpretación del % de humedad por peso de papel seco.

% de humedad por peso del papel seco	Condición
0-2	Papel seco
2-4	Papel húmedo
> 4.5	Papel excesivamente húmedo

Tabla 4. Principios para interpretación del % de saturación de agua en el aceite.

% de saturación de agua en el aceite	Condición
0-5	Aislamiento seco
6-20	Húmedo moderado.
21-30	Húmedo
> 30	Extremadamente húmedo

Tabla 5. Valores normalizados de índices de polarización.

Para prueba de resistencia de aislamiento.

Índices polarización	Aislamiento
> 2.0	Bueno
1.5 – 2.0	Justo
1.1 – 1.25	Cuestionable
1.0 1.1	Pobre
< 1.0	Peligroso

- Sistema aislante.

1. Todos los valores obtenidos en cada una de las pruebas aplicadas al sistema aislante del transformador dieron resultados satisfactorios.
2. En el cuerpo del reporte se anexan los datos obtenidos en cada una de las pruebas.

- Parámetros eléctricos.

1. En las mediciones realizadas a los parámetros eléctricos, no se observan diferencias significativas en cada una de ellas.
2. Se anexan valores de prueba de reactancia e impedancia de dispersión y del barrido de respuesta a la frecuencia en los taps 1 y 3. Esto es con la finalidad de tener la huella de todo el devanado y en el tap de operación respectivamente. Se debe observar su tendencia en toda su vida operativa.
3. En la prueba de respuesta a la frecuencia se observan movimiento en el barrido en el tap 1 y en el tap 3. Este movimiento probablemente se deba a un mal alineamiento de bobinas en las fases y/o mal apriete de los discos de los devanados. Se observará comportamiento de esta medición juntamente con personal de la Central para observar su tendencia y de ser posible, solicitar al proveedor su solución respectiva en caso de mayor pérdida de geometría. Observar gráficos de respuesta a la frecuencia en donde se indican las observaciones.

Recomendaciones.

1. Se recomienda observar la segunda medición en la primera salida a mantenimiento para verificar resultados en cada una de las mediciones.
2. Llevar a cabo análisis de furanos al aceite aislante y grado de polimerización al papel aislante. Con la finalidad de contar con el complemento de estas mediciones.
3. La siguiente tabla es una guía para interpretar los gráficos de ARF en cada una de sus frecuencias.

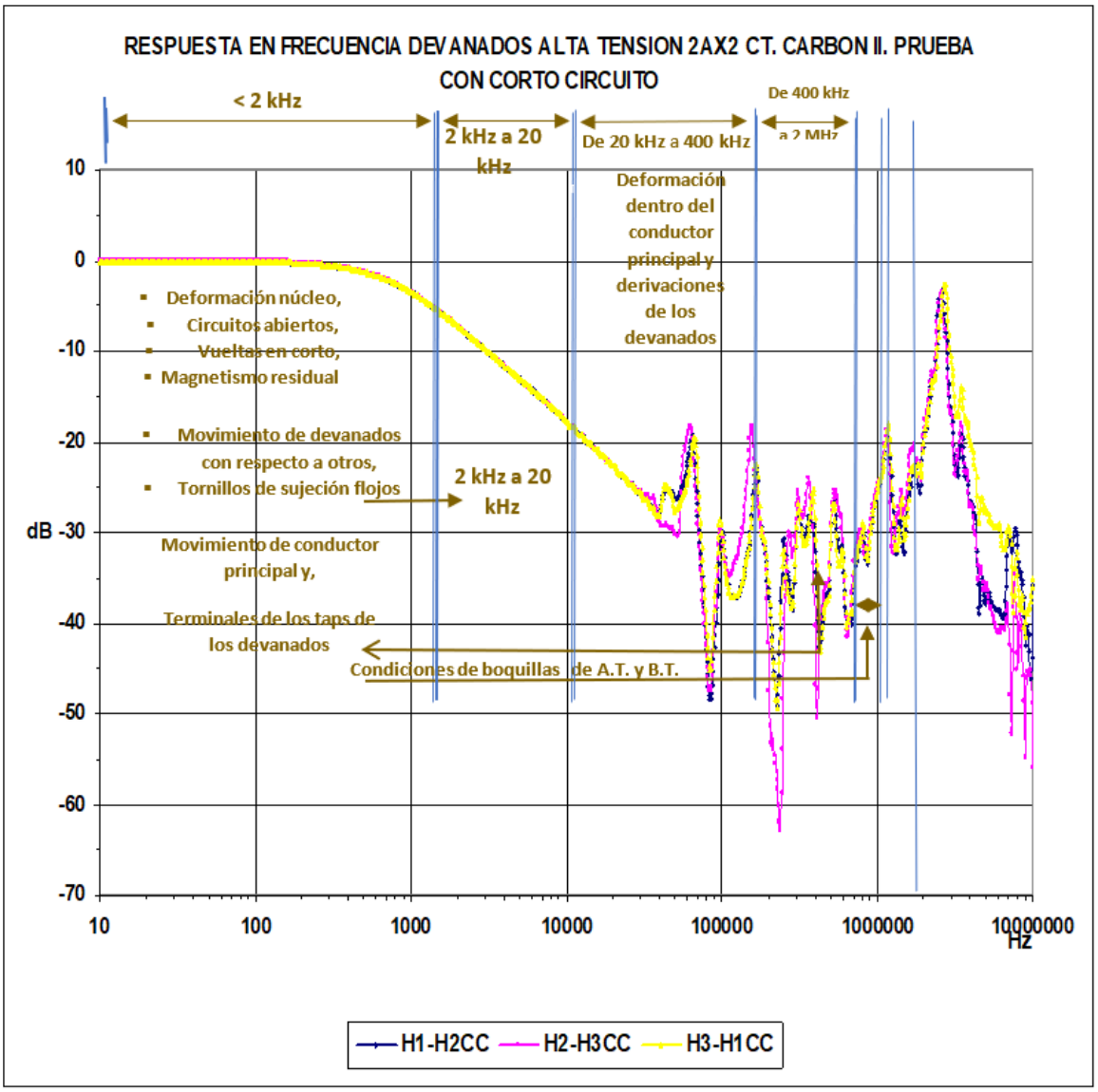
Tabla Guía. Para interpretar los gráficos del SFRA (Análisis del Barrido de Respuesta a la Frecuencia).

FRECUENCIA	CONDICIONES
< 2 kHz	- Deformación del núcleo - Circuitos abiertos - Vueltas en corto - Magnetismo residual
De 2 kHz a 20 kHz	- Movimiento de devanados con respecto a otros - Tornillos de sujeción flojos
De 20 kHz a 400 kHz	- Deformación dentro del conductor principal y derivaciones de los devanados
De 400 kHz a 2 MHz	- Movimiento de conductor principal y, - Terminales de los taps de los devanados
De 2MHz a 3MHz	- Condiciones de boquillas de alta y baja tensión
Observaciones: 1. Esto es una base para el análisis, se debe de contar con la experiencia en las mediciones para definir en forma correcta las condiciones del transformador juntamente con las pruebas de diagnóstico aplicables, así se puede determinar las condiciones de servicio del equipo. 2. Debe llevarse a cabo un análisis comparativo con equipos similares, fabricante, tensión, capacidad, corriente, etc.	

El método elegido para llevar a cabo las mediciones, son los indicados en la normativa internacional ANSI/IEEE Std. 62.95 que menciona el desarrollo y aplicación de las pruebas de campo.

1. Normas ANSI/IEEE C57-12-90-1999. [1] Niveles básicos de aislamiento al impulso.
2. Norma ANSI/IEEE Std.62.-1995. Norma para pruebas de campo.
3. Norma ANSI/IEEE C57-125-1991. Norma para evaluación y diagnóstico de resultados.
4. Norma ASTM-1816-2000. Prueba de rigidez dieléctrica con electrodos semiesféricos.
5. Norma ASTM- 877- 2000. Prueba de rigidez dieléctrica con electrodos planos.
6. ASTM D3487-2000-análisis fisicoquímico.
7. Norma NMX-J-284-ANCE- 1999. Análisis de resultados del Valor de impedancia. ±7.5%.
8. Norma NMX-J-169-ANCE- 1999. Pruebas de campo de la impedancia.

Gráfico representativo de un transformador auxiliar, rango de frecuencias.



Cálculo de impedancia en % nueva base al cambiar la posición del tap.

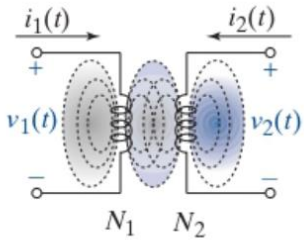
$$Z\,(nueva\ base)\ \ \% = \left[\frac{KV\,(\,base\ \ dada)}{KV\,(base\ nueva)}\right]^2 x\ Z\%\,(Placa)$$

Referencia: Roland E. Thomas, Albert J. Rosa, Gregory J. Toussanint. El análisis y Diseño de Circuitos Lineales. Editorial Jhon Wiley & Sons, Inc Séptima edición.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1$$

El parámetro k varía de cero a 1. Si M es 0, entonces k = 0 y su acoplamiento entre los conductores es cero. La condición k = 1 requiere un acoplamiento perfecto en el que todo el flujo producido por un inductor une al otro. El acoplamiento perfecto es físicamente imposible, aunque un diseño cuidadoso puede producir coeficientes de acoplamiento de 0.99 y superiores.

Referencia: Roland E. Thomas, Albert J. Rosa, Gregory J. Toussanint. El análisis y Diseño de Circuitos Lineales. Editorial Jhon Wiley & Sons, Inc Séptima edición



(b)

Referencia: Inductores acoplados, tanto propios como de inductancia mutua presentes. Roland E. Thomas, Albert J. Rosa, Gregory J. Toussanint. El análisis y Diseño de Circuitos Lineales. Editorial Jhon Wiley & Sons, Inc Séptima edición

La relación de transformación o relación de vueltas es $\bar{n}$. Cuando n > 1, la tensión de baja tensión es mayor que la tensión de alta tensión y el transformador es elevador. En caso contrario, cuando n < 1, el voltaje de alta tensión es mayor que el voltaje de baja tensión y el transformador es reductor.

$$n = \frac{V_1}{V_2}$$

En el caso de un devanado Y-Δ (Estrella Delta), el valor del voltaje en la Estrella se divide entre √3, para realizar una correcta conversión en la relación de transformación,

Por ejemplo: en un transformador principal Estrella – Delta de 400 kV en el lado de alta tensión conectado en estrella y baja tensión en delta con 20 KV, la relación de transformación es:

Cálculo de la relación de transformación para un transformador principal de 400 kV a 20 kV conectado en Δ/Y:

$$n = \frac{400/\sqrt{3}}{20} = \frac{230.94}{20} = 11.547$$

Relación de transformación Transformador-teórica para un transformador auxiliar de 20 kV a 6.9 kV:

$$n = \frac{20}{6.9/\sqrt{3}} = \frac{20}{3.984} = 5.020$$

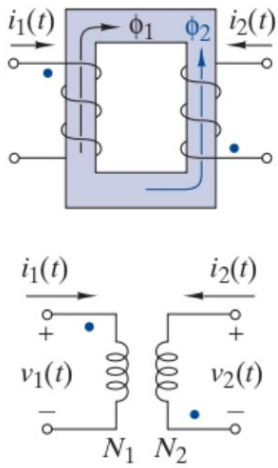


Figura 1. a) eslabonamiento de flujo casi perfecto, b) polaridad substractiva.

Referencia: Inductores acoplados, tanto propios como de inductancia mutua presentes. Roland E. Thomas, Albert J. Rosa, Gregory J. Toussanint. El análisis y Diseño de Circuitos Lineales. Editorial Jhon Wiley & Sons, Inc Séptima edición

CAPÍTULO V

Conclusiones.

1. Terminado el proceso de pruebas realizadas al transformador marca Ferranti Packard serie número de serie 610 se procede a definir sus condiciones actuales para la toma de decisiones de que si entra o no en servicio.
2. Las mediciones de los parámetros eléctricos están dentro de los criterios máximos y mínimos indicados en la Norma ANSI/IEEE Std. 62 los resultados serán analizados bajo los criterios de la Norma ANSI/IEEE C.57.125
3. Las mediciones de factor de potencia y capacitancia resultaron satisfactorias, están dentro de los criterios indicados.
4. Los valores obtenidos en la prueba de factor de potencia y capacitancia en los aislamientos principal C1 y C2 del tap de prueba en boquillas de alta y baja tensión está dentro de los valores señalados en la norma ANSI/IEEE C57.125.
5. Al medir las boquillas con el equipo de respuesta a la frecuencia los valores salieron distorsionados, en el devanado de baja tensión observar gráfica 3.1 Anexa. Detectando distorsiones diferentes y, con fuga de aceite. Un impedimento más para no entrar en servicio.
6. En el gráfico 3.1 se observan gran distorsión en las fases, esto puedes ser un movimiento severo y aflojamiento de tornillería de sujeción, quizá algunas partes del núcleo haga contacto con el tanque, otro problema más para impedir su regreso a operación.

Recomendaciones.

1. Se recomienda realizar las pruebas de diagnóstico de resistencia óhmica, rigidez dieléctrica con electrodos semiesféricos y probar nuevamente el proceso de pruebas de diagnóstico.
2. Solicitar a LAPEM los análisis fisicoquímicos, cromatografía de gases y el análisis de furanos con la finalidad de tener un estudio completo del transformador y de las condiciones del papel aislante.
3. Ajustar el mecanismo del cambiador de derivaciones para tener un contacto al 100 para impedir el inicio de arqueos.
4. Realizar un estudio e inspección a conciencia en cada una de las partes internas incluyendo boquillas.

Tabla 1. Valores de resistencia óhmica en devanados de alta tensión.

Año 2006				Año 2019			
Tap	H1 −H0	H2 −H0	H3 −H0	Tap	H1 −H0	H2 −H0	H3 −HO
1	0.381	0.371	0.381	1			
2	0.368	0.355	0.367	2			
3	0.355	0.342	0.353	3			
	X1 −X2	X2 −X3	X3 −X1				
	0.00145	0.00153	0.00151				
Tap 3 a 135 MVA Z% = 3.892 y para 375 MVA Z% = 10.832							

Referencia: Norma ANSI/IEE STD. 62-1991 y ANSI/IEE C.57.125-1995.

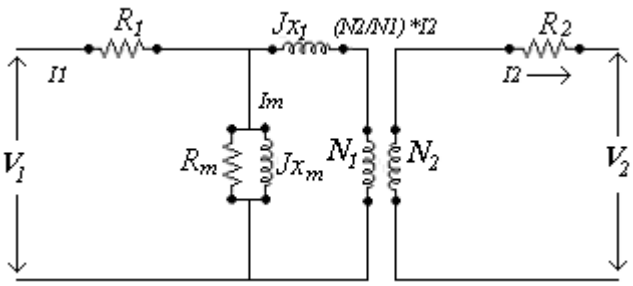
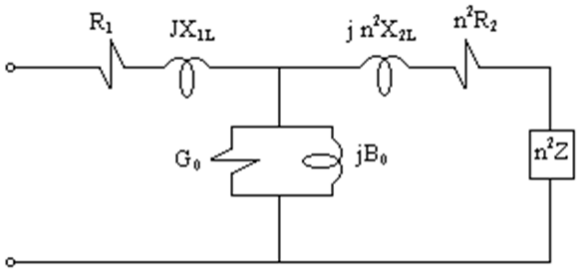


Figura 5.1 Circuito eléctrico para medir en circuito abierto las pérdidas en el núcleo. (medir la (corriente de excitación).



Circuito eléctrico con corto circuito en baja tensión para prueba con equivalente trifásico.

Tabla 2. Valores de corriente de excitación en puesta en servicio y después de la falla.

Año 2006 (Puesta en servicio)							Año 2019 (mantenimiento 13 años después)						
Tap	H1 –H0		H2 –H0		H3 –H0		Tap	H1 –H0		H2 –H0		H3 –H0	
3							3						
	mA	Watts	mA	Watts	mA	Watts		mA	W	mA	W	mA	W
	37.14	268.1	28.54	212.6	37.3	267.8		37.10	317.92	26.58	235.4	37.74	320.23

Valores obtenidos con el equipo software del M4k probados a 10 kV, con vigencia de calibración.

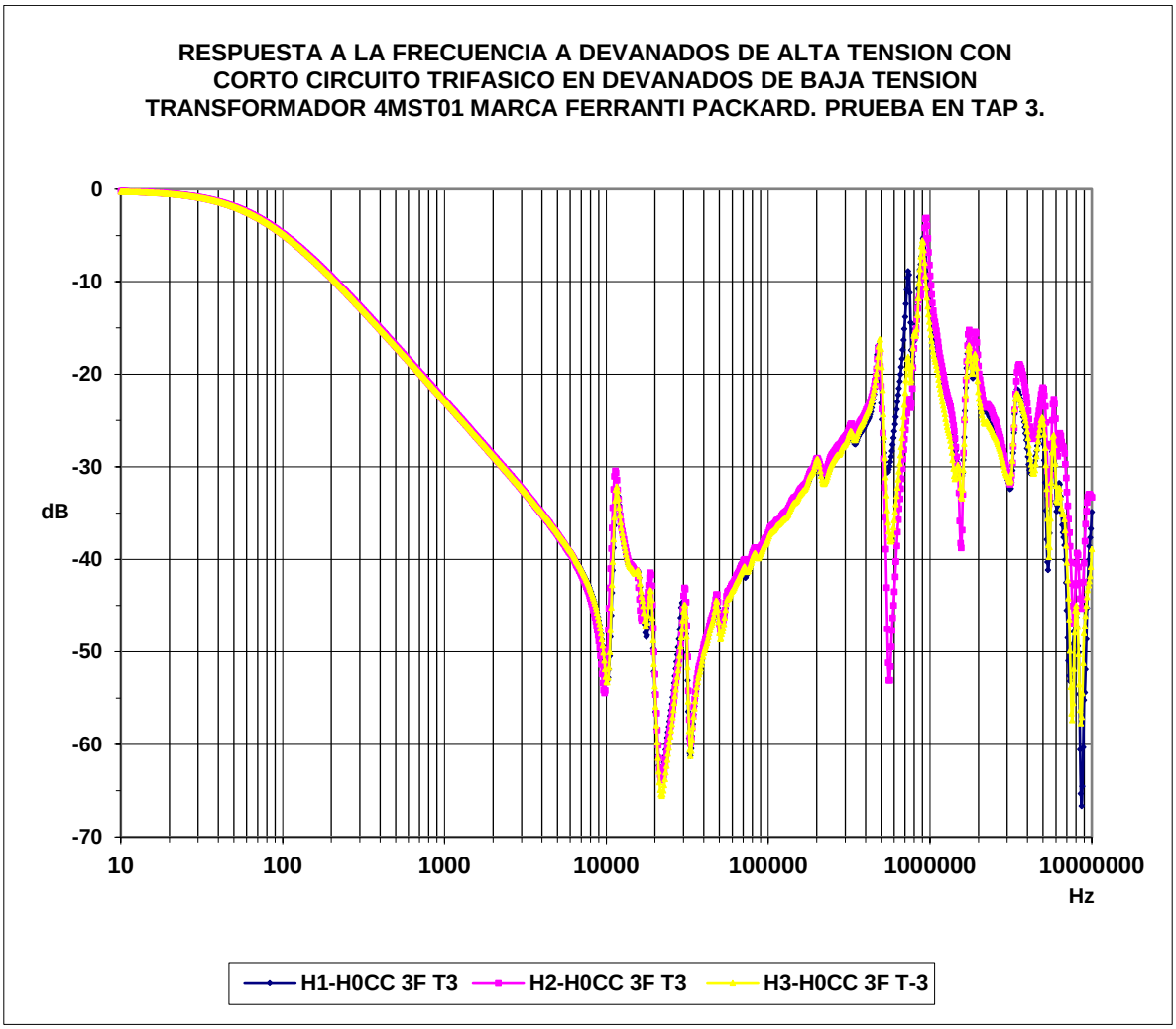
Tabla 3. Valores de prueba con equivalente trifásico Tap 1.

Resultados de prueba	FASE A– H1–H0 X-1,2,3,	FASE B H2–H0-X-1,2,3	FASE C H3–H0-X1,2,3,
Voltaje de prueba CC	82.72 Volts	85.07 Volts	82.74 Volts
Corriente CC	0.8133 A	0.8339 A	0.8150 A
Factor de potencia CC	2.14 %	2.81 %	2.91 %
ΔX	0.41 %		
ΔZ	0.25 %		
X – Ohms	101.60 Ohms	101.90 Ohms	101.40 Ohms
Z – Ohms	101.60 Ohms	101.90 Ohms	101.40 Homs
Comentario: todos los valores son positivos, en los parámetros eléctricos el transformador puede ser energizado; pero debe de realizarse antes una inspección interna en el devanado secundario y observar la sujeción de las bobinas.			

Tabla 3. Valores de prueba con equivalente trifásico. Tap 3.

Resultados de prueba	FASE A– H1–H0 X-1,2,3,	FASE B H2–H0-X-1,2,3	FASE C H3–H0-X1,2,3,
Voltaje de prueba C.C	189.30 Vplts	186.90 Volts	187.50 Volts
Corriente C.C	2.045 A	2.011 A	2.028 A
Factor de potencia C.C	2.30	3.04 A	3.33 A
ΔX	0.41 %		
ΔZ	0.45 %		
X – Ohms	92.63 Ohms	92.94 Ohms	92.42 Ohms
Z – Ohms	92.56 Ohms	92.99 Ohms	92-47 Ohms
Comentario: los valores obtenidos en los parámetros eléctricos, el transformador puede ser energizado bajo previa inspección interna en devanado de baja tensión.			

Gráfico 1. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.

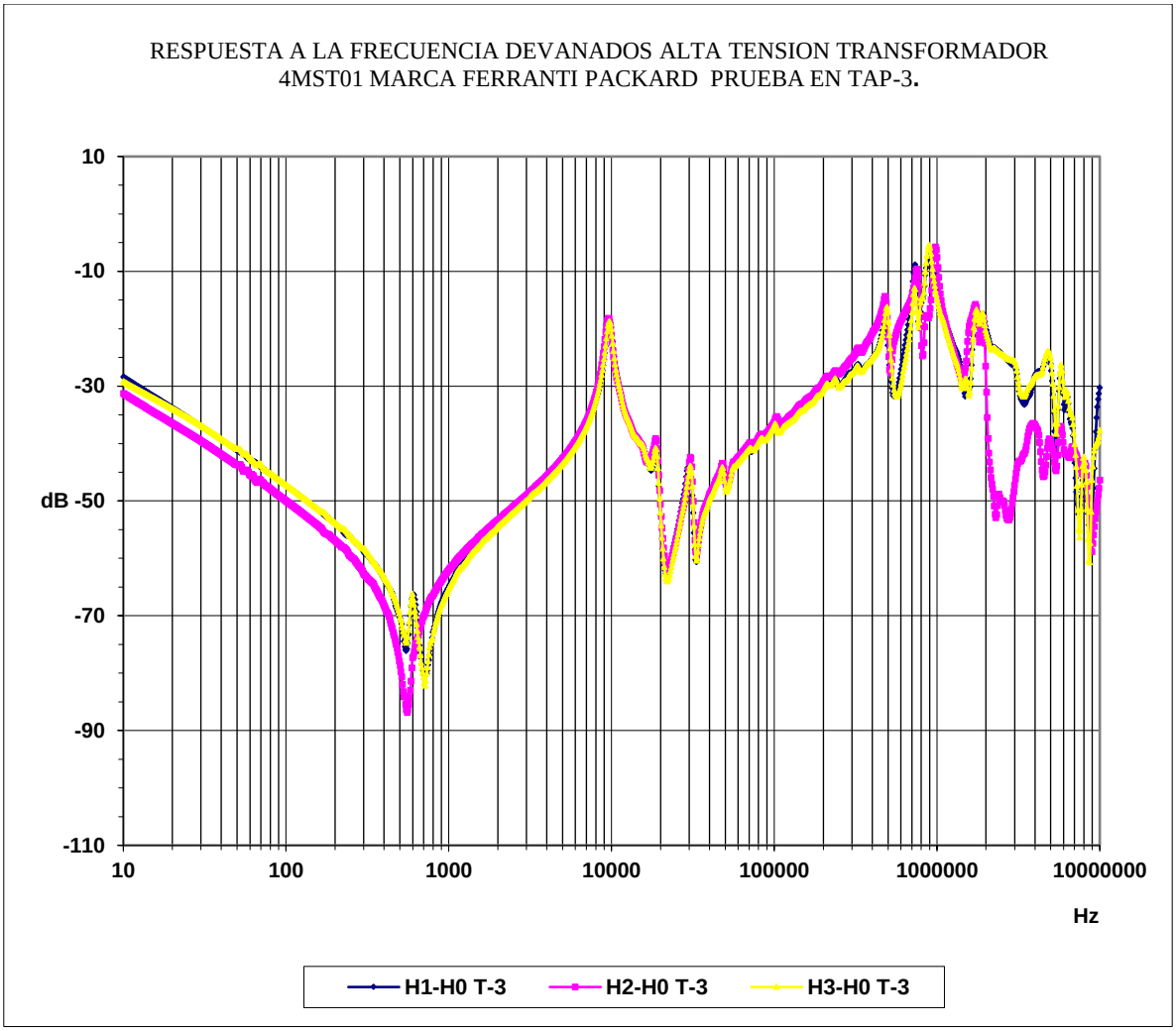


Referencia: Gráfico 1. Elaborado con Excel con los valores del software del equipo de análisis de respuesta a la frecuencia.

Análisis de las mediciones.

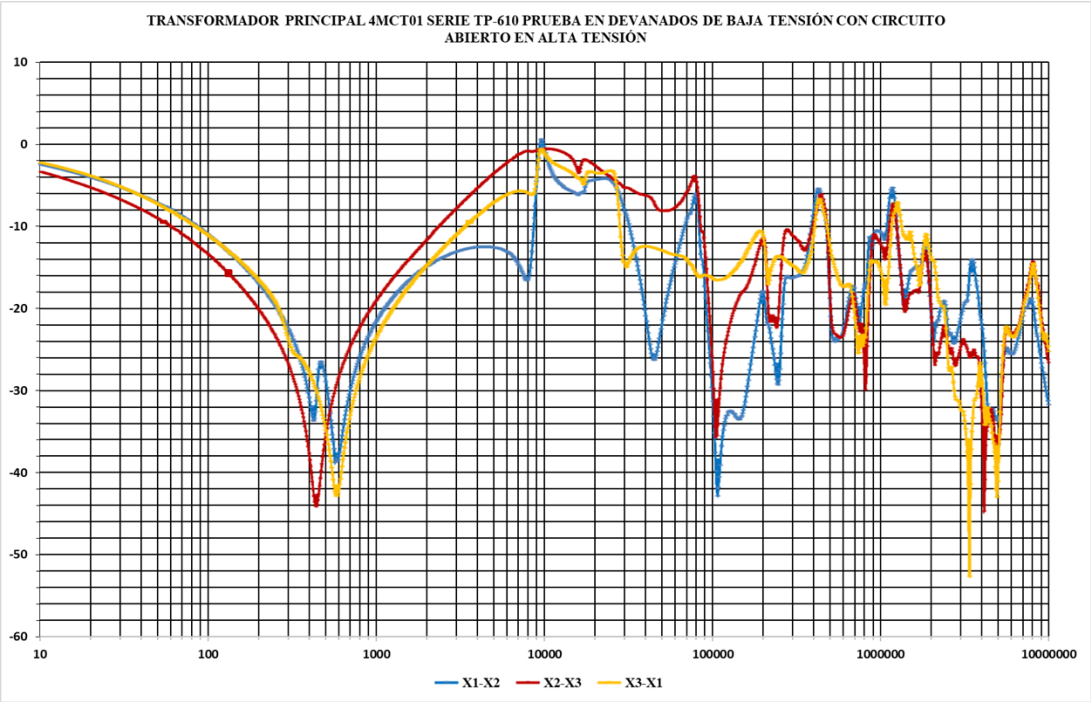
1. Transformador principal, serie TP-610, marca Ferranti Packard, MVA 135,375, kV 400/20. Prueba de corto circuito monofásico en devanados de baja tensión.
2. A bajas frecuencias, (de 10 Hz a 2 kHz), no se observan movimientos o pérdida de geometría significativas. Esto nos indica que el núcleo magnético no presenta problemas internos, la corriente de excitación medida es satisfactoria y cumple con lo indicado en las normas ANSI/IEEE Std. 62 y ANSI/IEEE C.57.125 para una configuración Y-D.
3. A medias y altas frecuencias de (3kHz a 10 MHz) se observa pérdida de geometría interna en los devanados, principalmente en las fases H1-H0 y H3-H0; por dos razones obvias, ceniza impregnada en faldones de porcelana y la fuga de aceite en ellas. En la fase H2-H0, no se observan problemas relevantes.
4. En la boquilla H2, se observa un barrido normal y diferente a las boquillas H3 y H1, que confirman los problemas mencionados anteriormente. (observar gráfico 2 siguiente).

Gráfico 2. Gráfico 5. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.



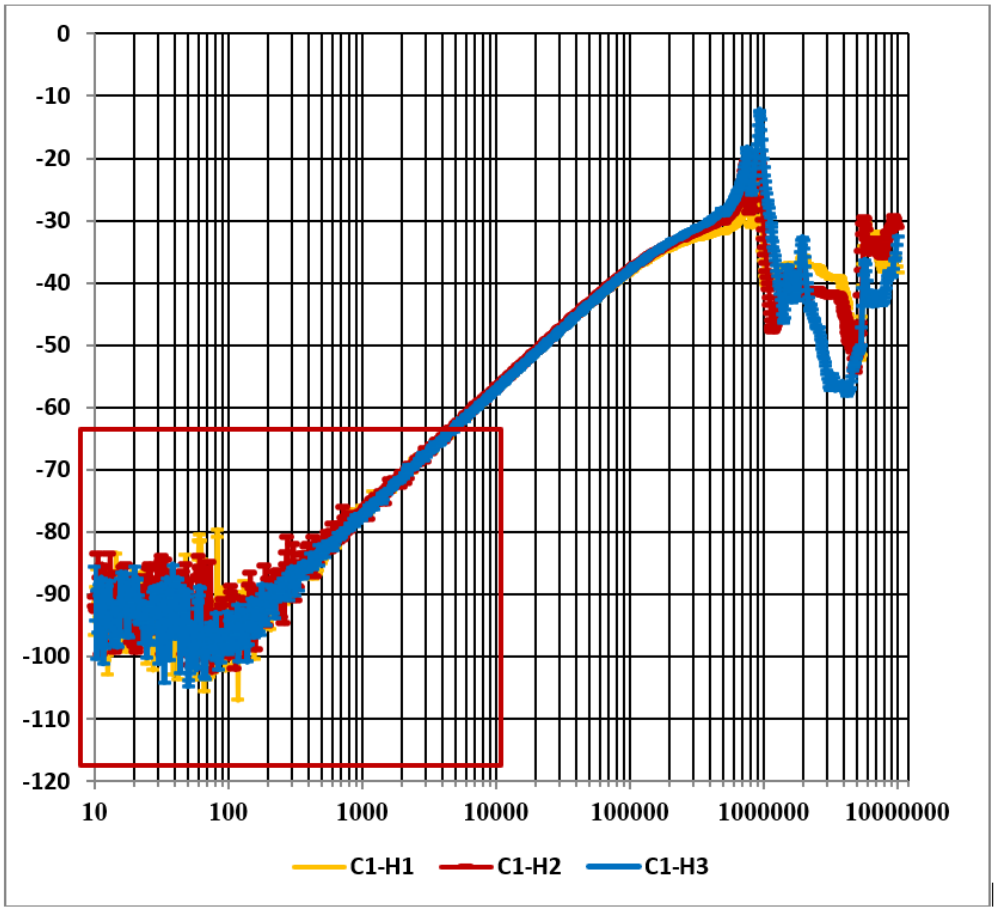
Referencia: Elaborado con Excel con los valores del software del equipo de análisis de respuesta a la frecuencia (fecha de prueba) después de la falla y realizar limpieza.

Gráfico 3. rango de frecuencia de 10 Hz a 10 MHz.



Referencia: Gráfico 3. Elaborado con Excel con los valores del software del equipo de análisis de respuesta a la frecuencia. (fecha de prueba) después de la falla y realizar limpieza.

Gráfico 4. Prueba de respuesta a la frecuencia en los aislamientos principales C1 de boquillas.

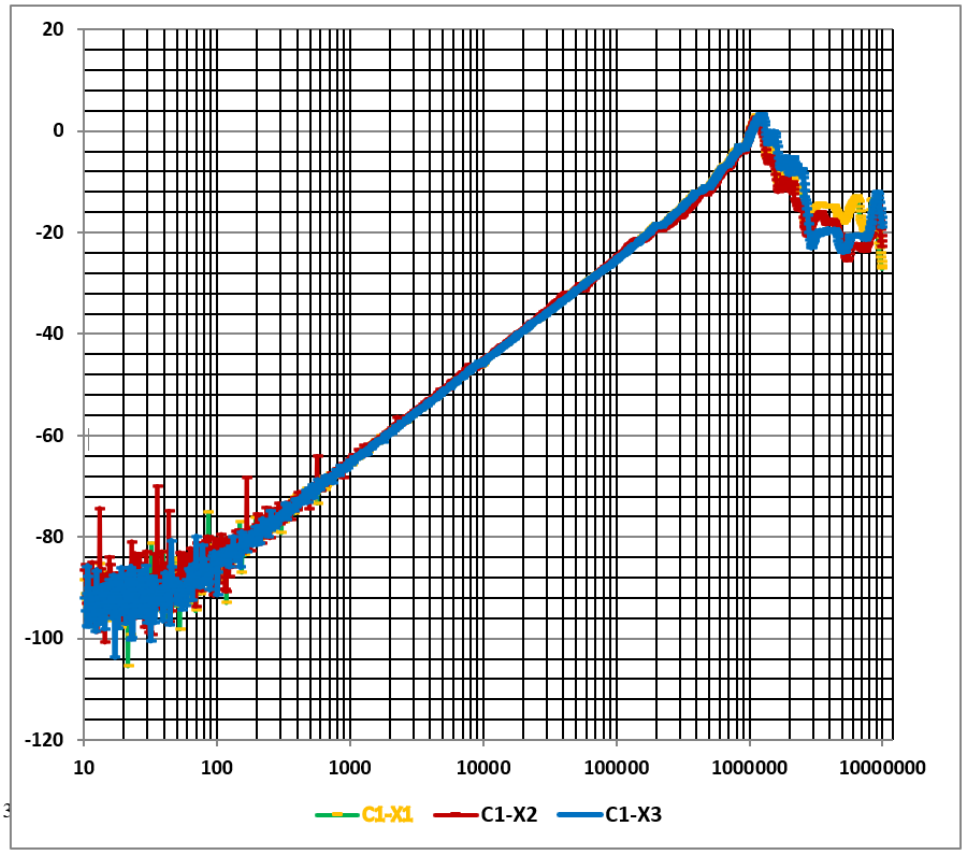


Referencia. Gráfico 4. Gráfico de pruebas del aislamiento del principal C1 de boquillas.

Observaciones:

1. Debido a la fuga de aceite que se tiene en las boquillas H1 y H3 y, además, de la ceniza impregnada en los faldones de las boquillas, se observa distorsión de estas boquillas con respecto a la boquilla H2. Este problema se observa en la frecuencia de 1 MHz a 10 MHz. De 2 mHz a 10 kHz la medición no se considera en el análisis debido a que es ruido.
2. Las condiciones de las tres boquillas de alta tensión se desconocen los resultados de prueba posterior al evento del disparo de unidad.
3. Al medir las tres boquillas de alta y baja tensión se observan diferentes barridos de frecuencia desde la frecuencia de 800 KHz a los 10 MHz
4. Se analiza de la frecuencia de 2 MHz a 10 MHZ, la fuga de aceite fue severa como lo muestran las grandes distorsiones en las 3 boquillas.
5. Existe la probabilidad de que se encuentren secos los capacitores superiores, con la prueba con collar caliente si se detectó el nivel.
6. Realizar prueba de collar caliente iniciando desde el faldón inferior y tomar nota de los valores de prueba de factor de potencia y pérdidas.
7. Antes de retirar el aceite de las boquillas, tomará una muestra y probar el factor de potencia y capacitancia y una muestra para medir su rigidez dieléctrica
8. Antes de retirar el aceite de las boquillas de alta tensión realizar prueba de factor de potencia y rigidez dieléctrica con electrodos semiesféricos

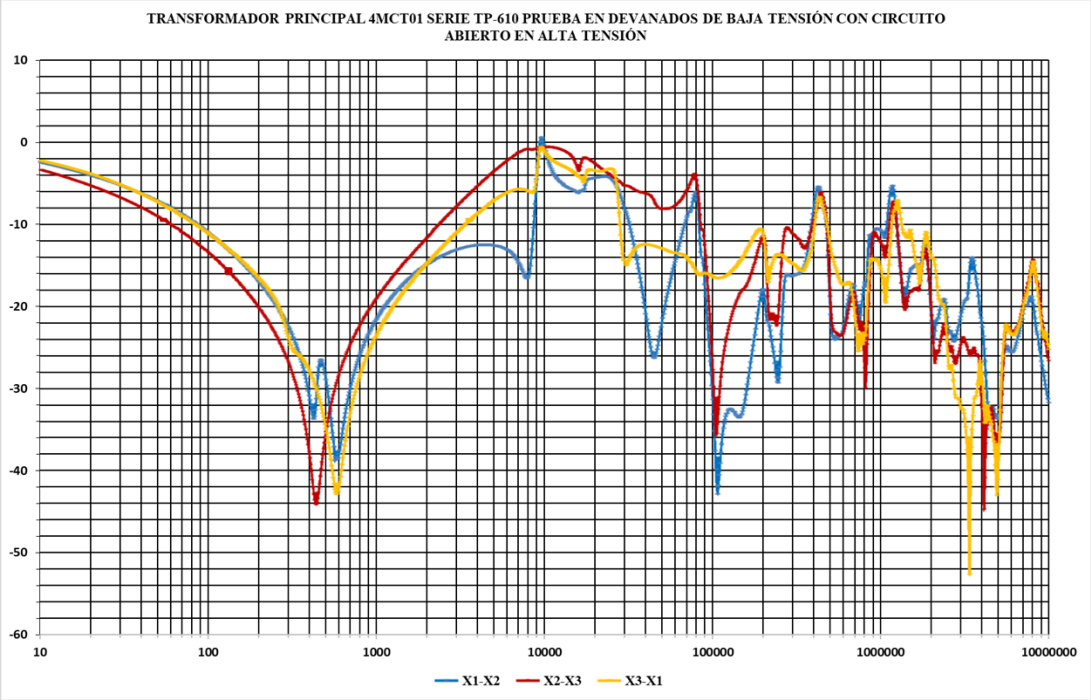
Gráfico 5. Rango de frecuencias de 10 Hz a 10 MHz.



Referencia: Gráfico 5. Gráfico de pruebas del aislamiento del principal C1 de boquillas.

1. De la frecuencia de 10 Hz los gráficos inician bien, las mediciones extremas de H1 y H3 van en paralelo con la fase H1 con menor corriente de excitación a causa de la reluctancia.
2. Al llegar a la frecuencia de 480 Hz la fase H1 presenta mayor caída en la resonancia magnética que las fases H2 y H3, las cuales son diferentes,
3. De la frecuencia de 1 kHz, las tres fases pierden por completo la geometría interna. Es muy peligroso energizar en estas condiciones el transformador.
4. La causa principal de esta distorsión es muy difícil de diagnosticar al desconocer las condiciones internas de los devanados de las tres fases.
5. Las boquillas de baja tensión no se tiene referencia de haber realizado pruebas en los aislamientos C1 y C2 de cada una de ellas.
6. Analizar en conjunto con el fabricante para inspeccionar el devanado de baja, se requiere desarmar por completo el transformador.

Gráfico 6. Rango de frecuencia 10 Hz a 10 MHz. Boquillas de baja tensión.



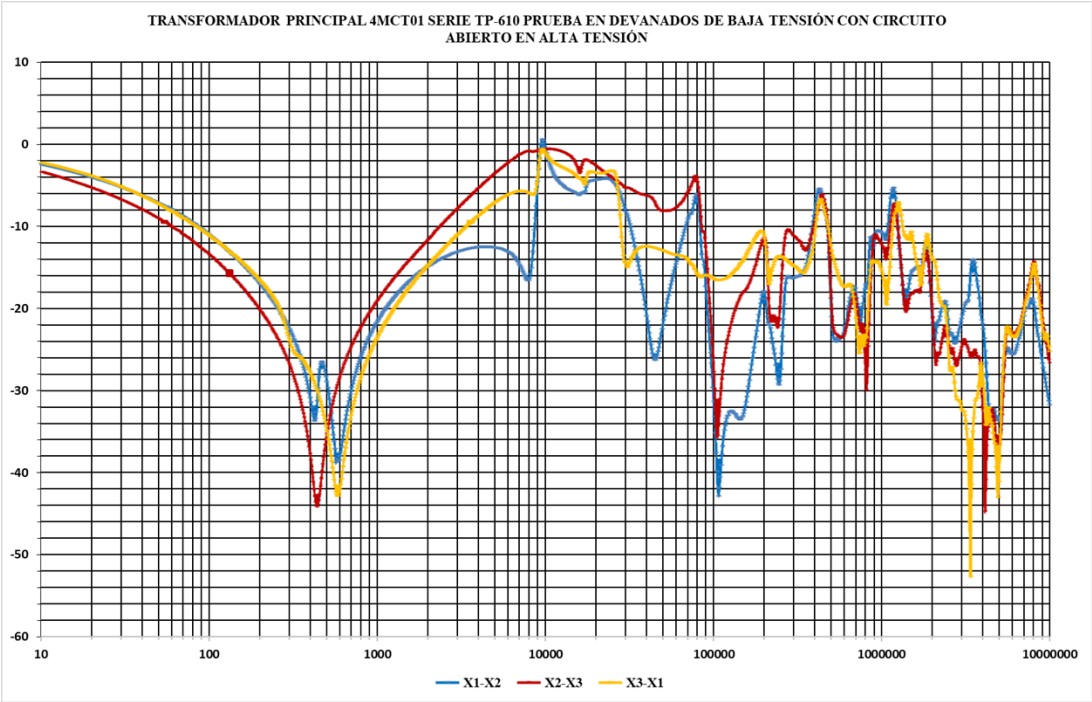
Referencia. Prueba de respuesta a la frecuencia a los aislamientos principales de boquillas de baja tensión.

1. Las boquillas X1, X2, y X3 a 1.1 MHz, aproximadamente, presentan similitud, a la frecuencia de 2.0 MHz aproximadamente, empiezan a tener distorsión sin que ninguna de las tres sea uniforme. Se debe de revisar historial de pruebas para observar su comportamiento desde su puesta en servicio. De la frecuencia de 10 Hz a 10 kHz la medición no se considera en el análisis debido a que es ruido.

Análisis de resultados.

1. De la frecuencia de 10 Hz a 20 kHz, se observa los correctos valores obtenidos en la corriente de excitación para configuración Estrella-delta. Observando el barrido de la fase H2-H0, y conforme y respaldo de los cálculos matemáticos de sus pérdidas, se toma como referencia para el análisis de las otras dos fases.
2. Las fases H1-H0 y H3-H0, presentan pérdida de geometría inicial sin considerarlo
3. crítico por el momento desde la frecuencia de 20 kHz a 10 MHz.
4. Prueba en devanados de baja tensión con circuito abierto en alta tensión.

Gráfico 7. Rango de frecuencia de 10 Hz a 10 MHz.



Referencia: Gráfico realizado con valores del software del analizador de respuesta a la frecuencia y realizado en Excel.

- Boquillas de baja tensión de las tres fases. Se analiza de la frecuencia de 2 MHz a 10 MHz.
- Probabilidad de falta de aceite en los primeros faldones.
- Podrían tener fuga de aceite o resina epóxica.
- Se requiere limpieza de porcelana, limpieza de tap capacitivo en boquillas limpiar y secar tap y volver a probar.

Conclusiones.

1. No se puede diagnosticar un gráfico con un barrido inconsistente considerado difícil de analizar, así como peligroso energizar el transformador si no se tienen los conocimientos internos del equipo.
2. Las boquillas de alta y baja tensión deben inspeccionarse a conciencia, no es seguro su permanencia en operación en caso de que lo hagan.
3. En la corriente de excitación, un pequeño aumento de las pérdidas de excitación en las tres fases.
4. En relación de transformación, factor de potencia en devanados y aceite aislante, no se encontraron problemas significativos.
5. Probar nuevamente cuando se realice la limpieza de las boquillas.
6. Las boquillas X1 y X2, deben de inspeccionarse con el mantenimiento para verificar sus condiciones internas o checar su aislamiento (resina epóxica o aceite).
7. Las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre son normales tienen un leve aumento en las mediciones realizadas posteriormente.
8. Se observa pérdida de geometría en los devanados de baja tensión, esta pérdida de geometría es crítica por lo que se considera una inspección interna de inmediato.
9. Se hizo la sugerencia al personal técnico responsable de la operación de los equipos de volver a realizar estas mediciones después del mantenimiento y verificar sus condiciones operativas y la calidad de los trabajos realizados por el contratista, no hubo respuesta. Se desconoce la situación real.
10. Analizando los valores de prueba obtenidos antes de su puesta en servicio y 13 años después debido a la operación de la protección del generador, se determina que se requiere más información antes de energizar.

Recomendaciones.

1. Se recomienda llevar a cabo una inspección interna a conciencia para verificar las condiciones existentes y la confiabilidad del transformador principal.
2. Es recomendable realizar las pruebas complementarias a las realizadas con el equipo M4K; como resistencia óhmica de devanados, rigidez dieléctrica, resistencia de aislamiento, análisis fisicoquímicos, cromatografía de gases, análisis de furanos.
3. No energizar el transformador.
4. Todas las observaciones y recomendaciones son realizadas conforme a lo indicado por las normas ANSI/IEEE Std. 62. Y ANSI/IEEE C57.125.
5. Se tiene además un procedimiento o guía de pruebas para las mediciones del Barrido de Respuesta a la Frecuencia (SFRA).
6. IEEE Std. C57.149TM 2012. IEEE guía para la aplicación e interpretación del análisis del barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite.

REFERENCIAS

1. El método elegido para llevar a cabo las mediciones, son los indicados en la normativa internacional ANSI/IEEE Std.62.1991 que menciona el desarrollo y aplicación de las pruebas de campo.
2. Normas ANSI/IEEE C57-12-90-1999. [1] Niveles básicos de aislamiento al impulso.
3. Norma ANSI/IEEE Std.62.-19915. Norma para pruebas de campo.
4. Norma ANSI/IEEE C57-125-1991. Norma para evaluación y diagnóstico de resultados.
5. Norma ASTM-1816-2000. Prueba de rigidez dieléctrica con electrodos semiesféricos.
6. Norma ASTM- 877- 2000. Prueba de rigidez dieléctrica con electrodos planos.
7. ASTM D3487-2000-Análisis fisicoquímico
8. Norma NMX-J-284-ANCE- 1999. Análisis de resultados del Valor de impedancia. ±7.5%
9. Norma NMX-J-169-ANCE- 1999. Pruebas de campo de la impedancia.
10. Electric Circuits. Richard C. Dorf; James A. Svoboda.
11. Linear Circuits. Roland. E. Thomas. Albert J. Rosa. Gregory J. Toussaint.
12. Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna. Langsdorf.
13. Circuitos en Ingeniería Eléctrica. Hugh Hildren Skilling.
14. Engineering dielectrics Volumen III. Líquidos aislantes eléctricos. R Bartnikas.
15. Engineering dielectrics volume IIB. Propiedades eléctricas de los aislamientos sólidos. R. Barnikas.
16. IEEE Std. C57.149^{TM} 2012. IEEE guía para la aplicación e interpretación del análisis del barrido de respuesta a la frecuencia para transformadores sumergidos en aceite y tipo seco.
17. IEEE C57.19.00-1991 (Revisión y redesignación de Norma ANSI/IEEE 21-1976). Requisitos generales del estándar IEEE y Procedimiento de prueba para aparatos eléctricos al aire libre de boquillas.
18. Estándar IEEE C57.19.01-2000. (Revisión de la Estándar IEEE C57.19.01-1991). Rendimiento estándar IEEE. Características y dimensiones de BOQUILLAS para aparatos al aire libre.
19. Estándar IEEE C57.19.03-1996. Requisitos del estándar IEEE, terminología y código de prueba para Boquillas para aplicaciones de CC.
20. IEEE Std C57.19.100-1995. Guía IEEE para la aplicación de energía en boquillas de aparatos eléctricos al aire libre.

ANEXOS

ANEXO 1.

Tabla 1.1. Símbolos eléctricos y magnéticos y abreviaturas.

Propiedades	Símbolo	Unidad	Abreviatura
Velocidad angular	ω	Radianes por segundo	s^{-1}
Capacitancia	C	Farad	F
Reactancia capacitiva	X_C	Ohms	Ω
Densidad de corriente	J	Amperes por unidad de área	
Corriente	I	Amper	A
Coercitividad	H_C	Oersted	O_e
Eficiencia	η	---	
Voltaje de fem	E, V	Volts	V
Flujo	Φ	Maxwell o línea	
Densidad de flujo	B	Gaus. Líneas de Maxwell por unidad de área	
Frecuencia	f	Hertz	Hz
Impedancia	Z	Ohms	Ω
Inductancia	L	Henrios	H
Reactancia inductiva	X_L	Ohms	Ω
Fuerza magnetizante	H	Oersteds	O_e
Fuerza magnetomotríz	Fmm	Amper-vueltas	
Permeabilidad	μ	---	
Potencia real	P	Watts	W
Potencia aparente	VA	Voltamperes	VA
Relación	r, n		
Resistencia	R	Ohms	Ω
Reluctancia	$\Re$		
Remanencia	B_r	Gauss	
Resistencia específica	ρ	Ohms/unidad de longitud	

ANEXO 2.

Tabla 1.2. Prefijos.

Prefijo	Símbolo	Valor	Número
Pico	p	Una billonésima parte	1×10^{-12}
Nano	n	Mil millonésima parte	1×10^{-9}
Micro	µ	Una millonésima parte	1×10^{-6}
Mili	m	Una milésima	1×10^{-3}
Centi	c	Cien	1×10^{-2}
Deci	d	Una décima parte	1×10^{-1}
Deca	da	Diez	1×10^{1}
Hecto	h	Cien	1×10^{2}
Kilo	k	Mil	1×10^{3}
Mega	M	Un millón	1×10^{6}
Giga	G	Mil millones	1×10^{9}
Tera	T	Un trillón	1×10^{12}

ANEXO 3.

Tabla 1.3. Relación de los voltajes nominales del Sistema o voltajes máximos del sistema niveles básicos de aislamiento al impulso por rayo (BIL) o (NBAI) para sistemas de 765 kV o menores.

Aplicación	Voltajes nominales del sistema (kV rms)	Voltajes máximos del sistema (de ANSI C84-1-1995) (kV rms)	Niveles básicos de aislamiento al impulso por rayo (BIL) en uso común (kV cresta)			
Distribución	1.2	----	30	----	----	----
	2.5	----	45	----	----	----
	5.0	-----	60	----	----	----
	8.7	----	75	----	----	----
	15.0	----	95	----	----	----
	25.0	----	150	125	----	----
	34.5	----	200	150	125	----
	46.0	48.3	250	200	----	----
	69.0	72.5	350	250	----	----
Potencia	1.2	----	45	30	----	----
	2.5	----	60	45	----	----
	5.0	----	75	60	----	----
	8.7	----	95	75	----	----
	15.0	----	110	95	----	----
	25.0	----	150	----	----	----
	34.5	----	200	----	----	----
	46.0	48.3	250	200	----	----
	69.0	72.5	350	250	----	----
	115.0	121.0	550	450	350	----
	138.0	145.0	650	550	450	----
	161.0	169.0	750	650	550	----
	230.0	242.0	900	825	750	650
	345.0	363.0	1175	1050	900	----
	500.0	550.0	1675	1550	1425	1300
	765.0	800.0	2050	1925	1800	----

ANEXO 4.

Tabla 1.4. Símbolos eléctricos y magnéticos y abreviaturas.

Propiedades	Símbolo	Unidad	Abreviatura
Velocidad angular	ω	Radianes por segundo	s^{-1}
Capacitancia	C	Farad	F
Reactancia capacitiva	X_C	Ohms	Ω
Densidad de corriente	J	Amperes por unidad de área	
Corriente	I	Amper	A
Coercitividad	H_C	Oersted	O_e
Eficiencia	η	---	
Voltaje de fem	E, V	Volts	V
Flujo	Φ	Maxwell o línea	
Densidad de flujo	B	Gaus. Líneas de Maxwell por unidad de área	
Frecuencia	f	Hertz	Hz
Impedancia	Z	Ohms	Ω
Inductancia	L	Henrios	H
Reactancia inductiva	X_L	Ohms	Ω
Fuerza magnetizante	H	Oersteds	O_e
Fuerza magnetomotríz	Fmm	Amper-vueltas	
Permeabilidad	μ	---	
Potencia real	P	Watts	W
Potencia aparente	VA	Voltamperes	VA
Relación	r, n		
Resistencia	R	Ohms	Ω
Reluctancia	$\Re$		
Remanencia	B_r	Gauss	
Resistencia específica	ρ	Ohms/unidad de longitud	

Tabla 1.5. Símbolos mecánicos y abreviaturas.

Propiedades	Símbolo	Unidad	Abreviatura
General			
Diámetro	D	Centímetro, pulgada	cm, in
Radio	r	Centímetro, pulgada	cm. In
Núcleo			
Altura de la ventana	F	Centímetro, pulgada	cm, in
Longitud de la ventana	G	Centímetro, pulgada	cm, in
Profundidad del núcleo, extremidad central	D	Centímetro, pulgada	cm, in
Ancho del núcleo, extremidad central	E	Centímetro, pulgada	cm, in
Área de ventana	W	Centímetro cuadrada, pulgada cuadrada	cm^2,in^2
Área central	a	Centímetro cuadrada, pulgada cuadrada	cm^2,in^2
Longitud del camino magnético	l_M	Centímetro, pulgada	cm, in
Brecha central	g	Centímetro, pulgada	cm, in
Factor de apilamiento	s	– – - - - - - - - - -	- - - -
Volumen	v o ν	Centímetro cúbico, pulgada cúbica	cm^3, in^3
Peso	W_t	Gramo, libra	Gm, lb
Devanados			
Longitud de bobinado	l_W	Centímetro, pulgada	cm, in
Longitud media vuelta	l_T	Centímetro, pulgada	cm, in
Área de superficie de enfriamiento	C_S	Centímetro cuadrado, pulgada cuadrada	cm^2,in^2
Margen	M	Centímetro, pulgada	cm, in
Espesor de la canilla	b	Centímetro, pulgada	cm, in
Área de cable (hebra simple)	A	Centímetro cuadrado, pulgada cuadrada	cm2,in2
Área de cable (hebra simple)	A	Milésimas circulares	CM
Zona sinuosa	w	Pulgada cuadrada, milésimas circulares	in^2
Factor de espacio de bobinado (w/W)	K	----------	----------
Relación de vueltas	r	----------	----------
Longitud de cable	l	Pulgada,	in
Temperatura	T,t	Grados Celsius	°C
Devanado	N	Número de vueltas	----------

Tabla 1.6. Prefijos.

Prefijo	Símbolo	Valor	Número
Pico	p	Una billonésima parte	1×10^{-12}
Nano	n	Mil millonésima parte	1×10^{-9}
Micro	μ	Una millonésima parte	1×10^{-6}
Mili	m	Una milésima	1×10^{-3}
Centi	c	Cien	1×10^{-2}
Deci	d	Una décima parte	1×10^{-1}
Deca	da	Diez	1×10^{1}
Hecto	h	Cien	1×10^{2}
Kilo	k	Mil	1×10^{3}
Mega	M	Un millón	1×10^{6}
Giga	G	Mil millones	1×10^{9}
Tera	T	Un trillón	1×10^{12}

ANEXO 5.

Pruebas de factor de potencia y capacitancia a devanados (sistema aislante).

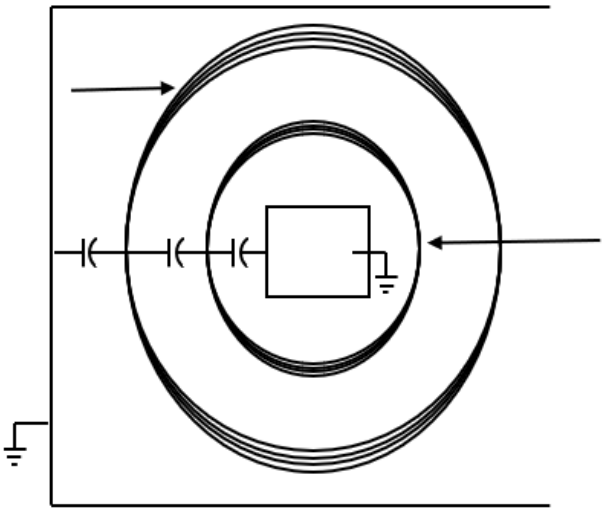


Figura 5. Diagrama físico de un transformador de dos devanados.

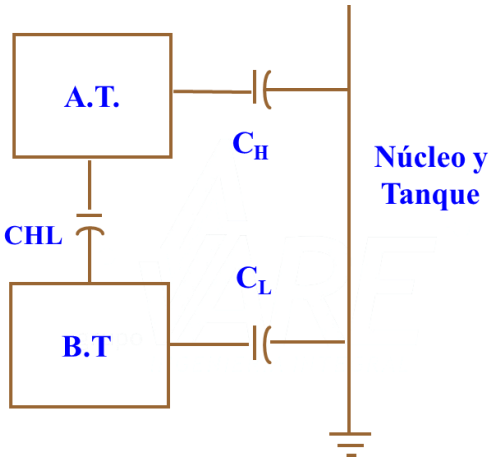


Figura 6. Diagrama eléctrico de un transformador de dos devanados.

- ✓ **CH -** todo el aislamiento entre los conductores de alto voltaje y las partes aterrizadas (cubierta del tanque y el núcleo magnético), incluyendo boquillas, aislamiento de los devanados, miembros aislantes estructurales y aceite.
- ✓ **CL-** se refiere a las mismas partes y materiales entre los conductores de bajo voltaje y las partes aterrizadas.
- ✓ **CHL** - se refiere a todos los aislamientos de los devanados, barreras y aceite entre los devanados de alto y bajo voltaje.

¿Qué es el GST- GROUND?

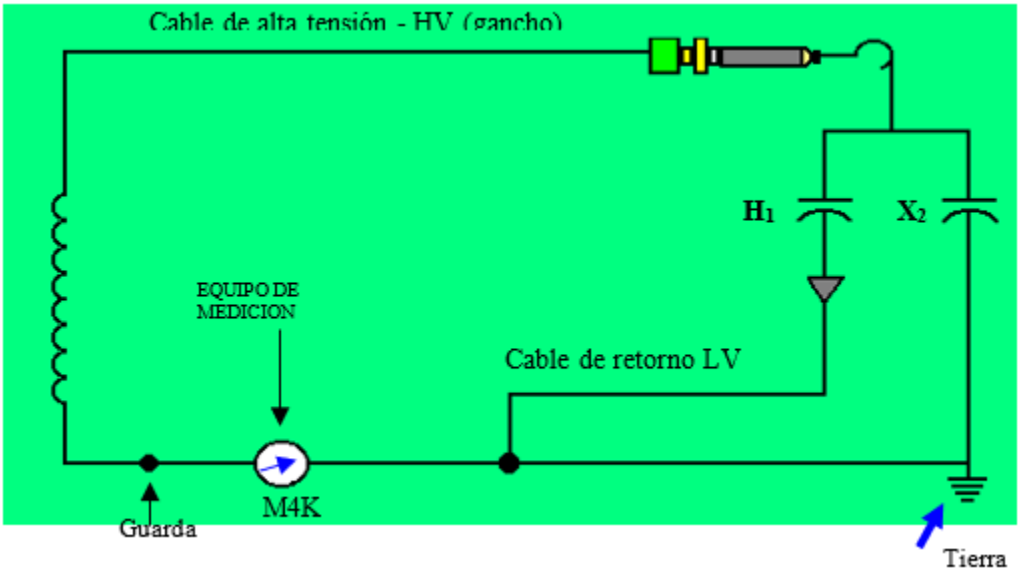


Figura 7. Diagrama para prueba de aislamiento en devanados en modo tierra.

¿Qué es el GST - GUARD?

- ✓ El cable de bajo voltaje está conectado al circuito de guarda. Si observamos la figura 1 y 2, ambos son modos de prueba con equipo aterrizado (GST), ambos circuitos miden la corriente y perdidas del aislamiento entre el cable de alto voltaje y tierra.

- ✓ La diferencia entre la figura 1 y 2 es la posición del cable LV con respecto al circuito de medición.

Equipo bajo prueba (GST – GUARDA)

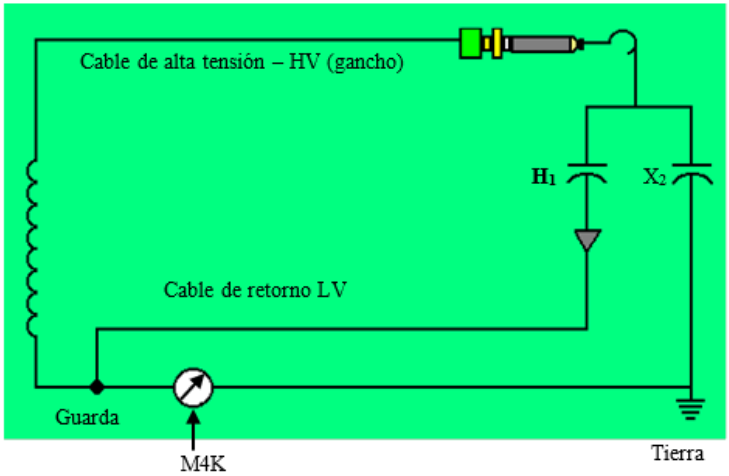


Figura 8. Diagrama para prueba de aislamiento en devanados en modo guarda.

EQUIPO BAJO PRUEBA NO ATERRIZADO UST.

¿Qué es el MODO UST?

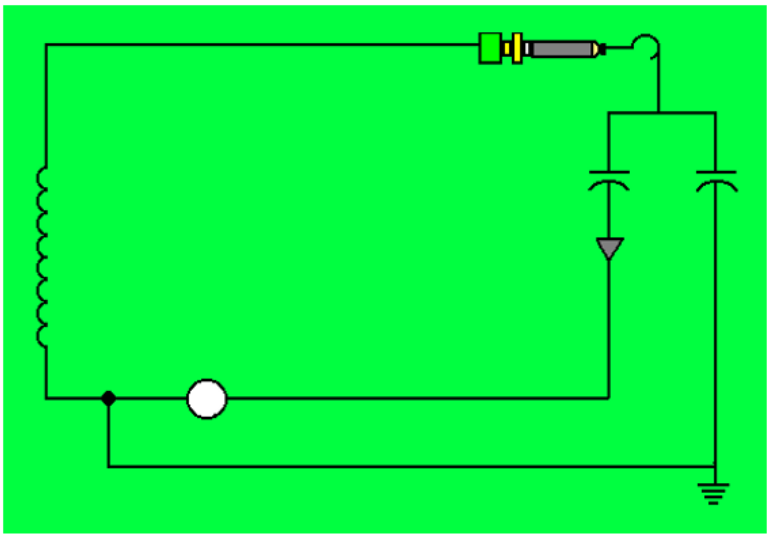


Figura 9.8. Diagrama para Prueba de aislamiento en devanados en modo UST.

- ✓ En la figura anterior, la única entrada al circuito de medición es a través del cable de bajo voltaje. Observe que la guarda y tierra del equipo de prueba son comunes en el modo UST; tal que la corriente y las pérdidas a tierra no son medidas.

  - **Transformadores nuevos: ≤ 0.5%**

Transformadores de potencia y distribución con tanque conservador

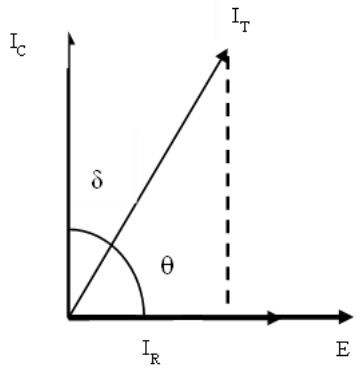
  - **Transformadores en servicio:** < **2.0%**

  Deben investigarse

  - **Valores de factor de potencia negativos:** son una indicación de tracking o carbonización del aislamiento sólido.

  - **Si no se tienen valores en el factor de potencia:** existe la probabilidad de altas descargas parciales.

- Deben compararse los valores con unidades similares o con su historial de pruebas.



FACTOR DE POTENCIA = Cos $\theta = I_R / I_T$

FACTOR DE DISIPACION = Tan $\delta = I_R / I_C$

Factor de potencia:

Los resultados deben ser menores o igual a ≤ 0.5% corregidos a 20° C

- Capacitancia:

Incremento en capacitancia: capas en cortocircuito.
Disminución en capacitancia: circuitos abiertos.

- Pérdidas:

Incremento: Contaminación del aislamiento.
Disminución: Vías resistivas a tierra (efecto negativo), carbonización.

19. Pruebas de factor de potencia a boquillas

Las boquillas se clasifican en dos tipos:

1. Tipo condensador

   - Boquillas con papel aislante impregnado de aceite
   - Papel aislante impregnado con resina

2. Tipo no condensador

   a) núcleo sólido o capas alternadas de aislamiento líquido y sólido
   b) masa sólida o material aislante homogéneo (porcelana sólida)
   c) Rellenas de gas

ANEXO 6.

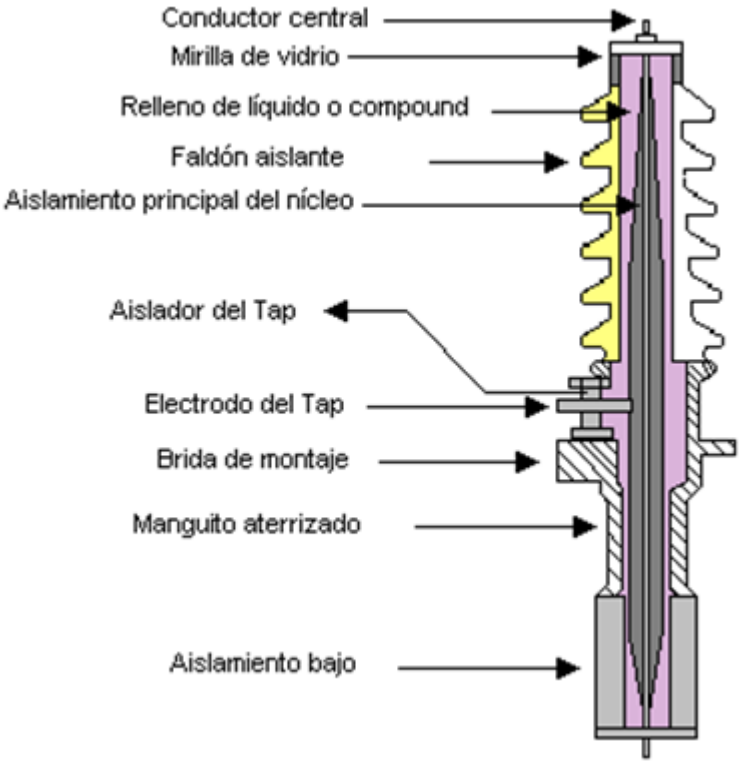


Figura 9.10. Componentes de una boquilla con papel aislante impregnada de aceite

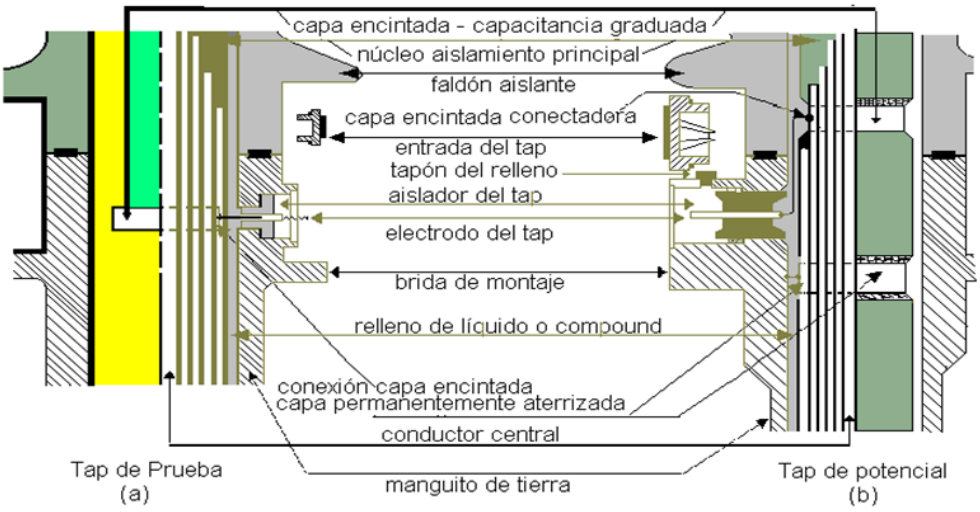


Figura 9.11. Diferencias de tap de prueba y tap de potencial de boquillas.

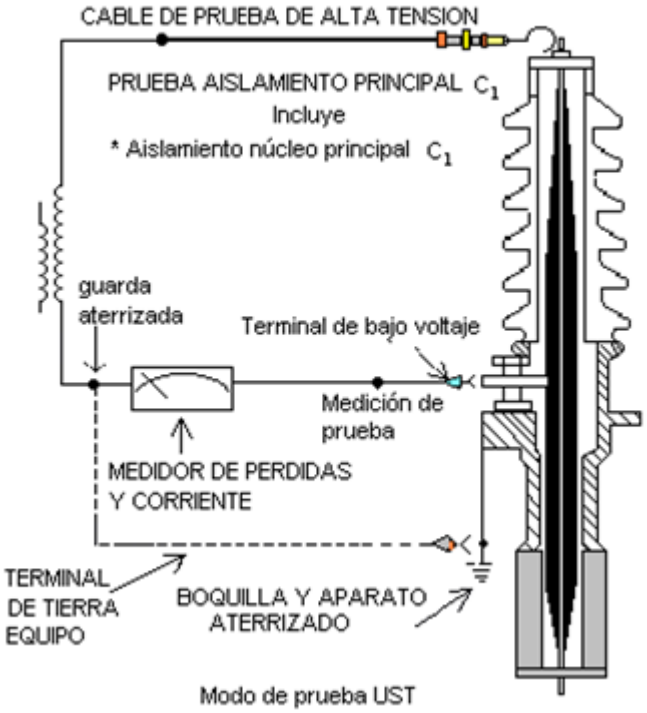


Figura 9.12. Prueba del aislamiento principal de boquillas C1 a 10 kV.

- ✓ $\leq$ 0.5% en cualquier tipo de boquilla impregnada de aceite bajo criterios de CFE para normalizar valores de prueba a nivel nacional.

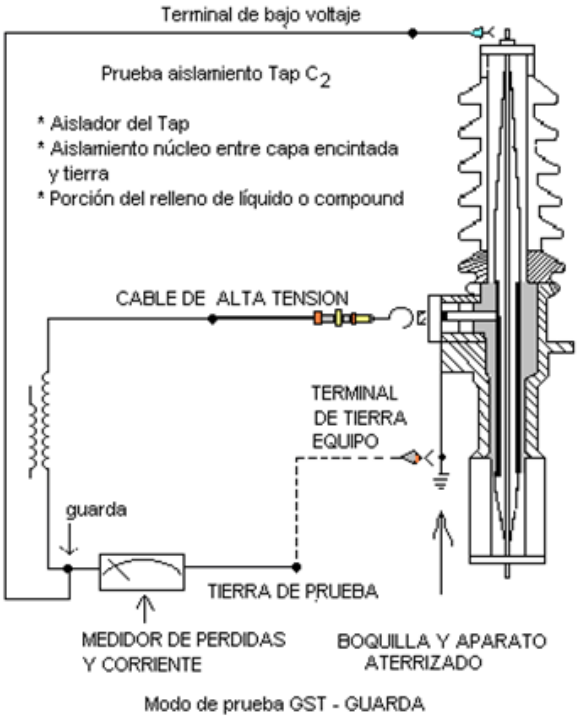


Figura 9.13 Conexiones de prueba GST– Guarda en el tap de prueba C2 a 500 volts en boquillas tipo condensador.

- ✓ Los valores de aceptación en los aislamientos del tap de prueba C_2
- 1.0% según indicaciones de CFE uniformizando los valores de prueba a nivel nacional

.

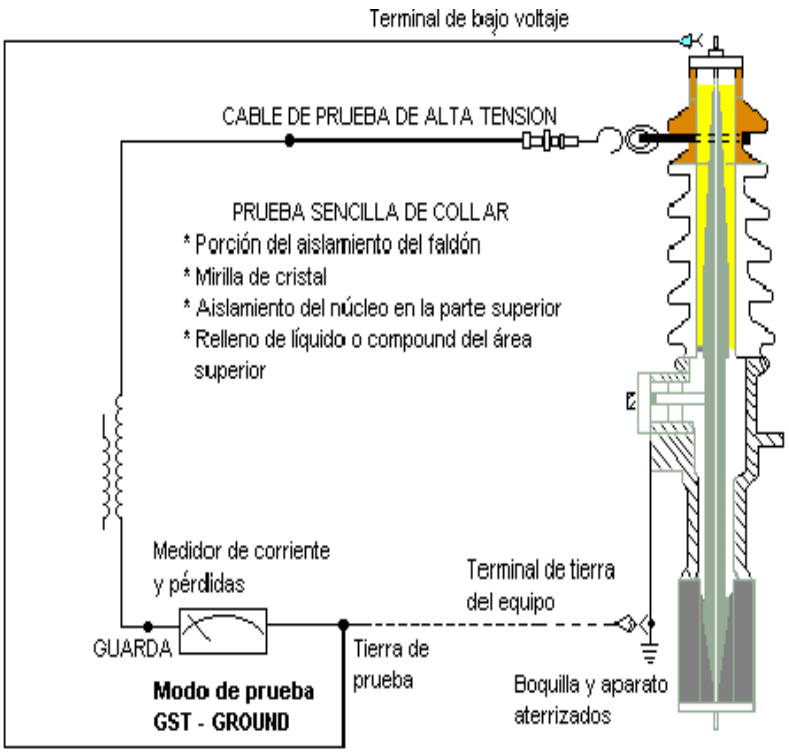


Figura 9.14 Conexiones de prueba GST– Tierra para prueba de collar caliente en boquillas tipo condensador.

Los voltajes de prueba se realizan de acuerdo con la tensión de operación de la boquilla.

Las mediciones se realizan iniciando por la parte superior de la boquilla tipo condensador hacia abajo.

Se recomienda observar el valor de capacitancia y compararla con la obtenida en la medición de resistencia de aislamiento a 10 kV.

ANEXO 7.

Celda de prueba y conexiones para realizar la prueba de factor de potencia.

Referencia: Señalado en Norma ANSIIEEE STD.621991.prueba a 10 kV

Criterios de evaluación de las pruebas:

Valores de aceptación.

Aceites nuevos: menor o igual (≤) al 0.05% a 20°C.

Aceites usados: menor o igual al (≤) 0.3% a 20°C; mayor al 0.3% regenerar o retirar de servicio.

Precauciones:

- La celda de prueba debe limpiarse con aceite del mismo transformador y/o solvente para pruebas de diferentes líquidos.
- Drenar aproximadamente un litro de aceite para extraer suciedad depositada en base inferior del tanque.
- Dejar en reposo el aceite antes de probar para expulsar burbujas y aire. al menos 10 minutos.
- La prueba se realiza siempre a 10 kV.

Criterios:

- Aceite usado < 0.3% a 20 °C se considera satisfactorio para continuar en servicio. respaldar mediciones con análisis fisicoquímicos.
- Aceite usado con factor de potencia > 0.5% a 20 °C se considera dudoso debe analizarse con pruebas de rigidez dieléctrica, ppm de agua, tensión interfacial, acidez, RVM.
- Aceite con factor de potencia > 1.0% a 20 °C investigarse, regenerar o reemplazar.

ANEXO 8.

Norma ASTM D-1816 con electrodos semiesféricos. Voltaje aplicado ½ (0.5) kV ± 20%. Ajuste de los electrodos de 2- mm o 0.080 pulgadas o para 1 – mm o 0.040 pulgadas

Criterios de consistencia estadística:

$$\bar{X} = 1/5 \sum_{i=1}^{5} X i \quad y \quad s = \sqrt{1/4 \left[\sum_{i=1}^{5} X i^2 - 5 \bar{X}^2 \right]}$$

$donde:$

$\bar{X} i = media\ de\ los\ cinco\ valores\ individuales$

$X i = ith\ voltaje\ de\ ruptura$

$s = desviación\ estandar$

Norma ASTM D-877, 3 kV/ s ± 20% el espacio de los electrodos será de 2.5 mm o 0.100 pulgadas con un rango de tolerancia de 2.5 mm ± 0.01 mm o 0.100 ± 0.0005 pulgadas.

Prueba de rigidez dieléctrica al aceite aislante

Electrodos planos: Criterios para la consistencia estadística

$$\bar{X} = \frac{1}{5} X i \quad y \quad s = \sqrt{1/2 \left(\sum_{i=1}^{5} X_i^2 - 5 \bar{X} \right)}$$

$\bar{X} = Media\ de\ los\ cinco\ valores\ individuales_i$

$X i = ith\ voltaje\ de\ rompimiento$

$s = desviación\ estandar$

Criterios de evaluación de la prueba de rigidez dieléctrica.

Aceites nuevos: ≥ 45 kV

Aceites usados: ≥ 45 kV
≤ 18 kV CRÍTICO

- Se llevan a cabo 5 mediciones de una muestra.

% de saturación de agua en el aceite	Condición
0-5	Aislamiento seco
6-20	Húmedo moderado.
21-30	Húmedo
> 30	Extremadamente húmedo

- Si el cociente del promedio s/X no excede de 0.1 las mediciones son satisfactorias.
- El valor mayor del valor menor no debe exceder de 10 kV.

- Análisis fisicoquímico al aceite aislante.

  Deben de realizarse análisis fisicoquímicos y cromatografía de gases, ya sea en servicio y en las salidas a mantenimiento.

- Pruebas fisicoquímicas al aceite aislante.

Tensión artificial.

La tensión interfacial de un aceite es la fuerza en din/cm requerido para romper la película existente en la interfase de agua y aceite. es una de las indicaciones de la degradación del aceite. Cuando ciertos contaminantes como ácidos, barnices, pinturas y productos de oxidación están presentes en el aceite. la película del aceite es rota requiriendo menor fuerza para su ruptura. un decremento en indica la acumulación de contaminantes, productos de oxidación o ambos.

Número de neutralización.

Es la prueba química más importante y conocida. Se le llama también índice de acidez, consiste en determinar la cantidad de material alcalino necesario para neutralizar los ácidos del aceite, la medida de la acidez nos indica el nivel de deterioro por oxidación de un aceite. Para un aceite nuevo se considera como un buen valor de 0.009 mgkoh/g aceite.

Tabla 6. Guía para la interpretación de % de saturación de agua en el aceite.

Tipo de aceite	Clase de voltaje	Factor de potencia a 25 °C	Factor de potencia a 100 °C
Aceite nuevo recibido		0.05	0.30
Aceite en equipo nuevo	< 69	0.15	1.50
	69 - 230	0.10	1.0
Aceite nuevo después del llenado y antes de energizar		0.10	
Aceite en servicio Grupo I	< 69	0.5	
	69 - 230	0.5	
	≥ 345	0.5	
Aceite en servicio Grupo II	< 69	0.5	
	69 - 230	0.5	
	≥ 345	0.3	
Aceite en servicio Grupo III	<< 69	1.0	
	69 - 230	0.7	
	≥ 345	0.3	

Métodos utilizados ASTM D-3613 Std. C57.103

Contenido de agua.

Debe tenerse un contenido bajo de humedad para mantener la tensión eléctrica aceptable y bajas pérdidas dieléctricas en el sistema aislante. la presencia de humedad excesiva acelera la corrosión de los metales y acorta la vida útil esperada del aislamiento de celulosa (papel).

Para equipos hasta 115 kv	15 ppm máximo
Para equipos hasta 230 kv	12 ppm máximo
Para equipos hasta 400 kv	10 ppm máximo

1. Análisis de cromatografía de gases al aceite aislante.

Hidrógeno	H_2
Oxigeno	O_2
Nitrógeno	N_2
Metano	CH_4
Monóxido de carbono	CO
Bióxido de carbono	CO_2
Etáno	C_2H_6
Etileno	C_2H_4
Propano/Propileno	C_3H_8/C_3H_6
Acetileno	C_2H_2

2. Alta cromatografía de líquidos (furanos).

ANEXO 9.

Furanos.

Degradación por oxidación. La celulosa es completamente susceptible a la oxidación. en este caso especialmente, el producto de las reacciones depende de la naturaleza de **ph** y los agentes oxidantes (ambos incrementan la proporción de alta acidez y alcalinidad), pero en general, los grupos de hidroxilos son oxidados por grupos de carbonilos (aldehídicos) y carboxilos (ácidos). Esto disminuye las cadenas de glicosídicos y pueden iniciar cortes por cadenas. la humedad es producida durante la oxidación.

Degradación térmica. La celulosa caliente, en ausencia de agentes oxidantes y humedad, a un máximo de 200°c, tiende a romper las cadenas de glicosídicos y abren los círculos de glucosa. el producto de esta reacción incluye moléculas de glucosa libres, humedad, óxidos de carbono y ácidos orgánicos.

Degradación hidrolítica. El agua y los ácidos parten las cadenas flojas de glicosídicos libres de glucosa. El peso del papel en equilibrio con la atmósfera normalmente contiene 7 a 8% de humedad. Un papel aislante es cuidadosamente secado antes de la puesta en servicio para detener este tipo de degradación. Si el papel sufre degradación térmica u oxidativa, en donde está produciendo humedad, la degradación hidrolítica es promovida. la humedad es el agente degradante más poderoso del papel.

Mientras más larga sea la cadena molecular de la celulosa se tiene mejor resistencia mecánica del papel aislante. Los criterios de evaluación aproximados por los investigadores Chendong son los siguientes:

GP> 800 el papel está en buenas condiciones.
GP< 800 > 400 el papel tiene media vida.
GP< 400 el papel aislante está en su último tercio de vida útil.

Otro criterio dado por el investigador Griffin P.J. considerando el 2-furfural es:

Aislamiento normal	< 100 μg/kg
Media vida	≥ 100 < 1000 μg/kg
Último tercio de vida	≥ 1000 μg/kg

Para un envejecimiento normal, el incremento en la concentración anual de 2-furfural.

Grado de polimerización (GP).

El grado de polimerización es un indicativo del número promedio de “eslabones” de D-glucopiranosa que contiene la cadena de celulosa. Presenta valores desde 800 a 1500 en papel kraft nuevo. Conforme el papel se envejece, las cadenas se rompen y el grado de polimerización decrece hasta valores de 200 para el papel degradado.

Principales causas de degradación:

1. Térmica: debido a temperaturas mayores de 200 °C.
2. Por hidrólisis: debido al contenido de humedad en el aceite.
3. Por oxidación: debido al contenido de oxígeno libre en el aceite.

ANEXO 10.

Prueba de resistencia de aislamiento a devanados.

Cuando se aplica un voltaje de corriente directa a un aislamiento, la tensión del campo eléctrico da una corriente de conducción elevada y una polarización eléctrica.

Cuando el interruptor se cierra, el aislamiento es energizado fluyendo una corriente alta en el instante del cierre. El valor de esta corriente cae inmediatamente decreciendo hasta tomar un valor constante.

La corriente que fluye por el aislamiento se analiza por los siguientes componentes:

1. Corriente de carga capacitiva.
2. Corriente de absorción dieléctrica.
3. Corriente de fuga superficial.
4. Corriente de descarga parcial (efecto corona).
5. Corriente de fuga volumétrica.

Donde:

C = Representa la corriente de carga.
R_A = Representa la corriente de absorción.
R_L = Representa la corriente de fuga volumétrica (pérdidas dieléctricas).

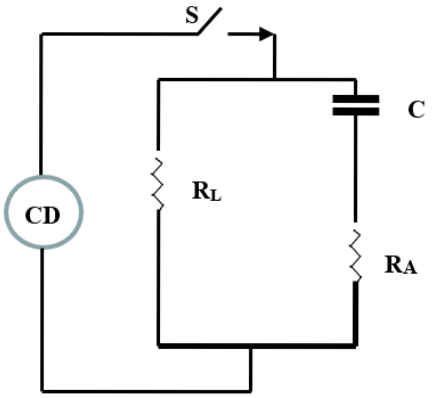


Figura 9.16. Circuito eléctrico para prueba de resistencia de aislamiento.

Índice de polarización: El propósito del índice de polarización es con la finalidad de conocer si las condiciones del aislamiento son satisfactorias para continuar en servicio.

Corriente de carga: se debe a la capacitancia del aislamiento medido. Va de un máximo a cero rápidamente.

Corriente de absorción: se debe al cambio de la carga molecular en el aislamiento. Esta corriente transitoria cae a cero muy lentamente.

Corriente de fuga: es la corriente de conducción real del aislamiento. La corriente de fuga varía con el voltaje de prueba. Puede tener también una componente debido a la superficie de fuga que se debe especialmente a la contaminación de la superficie.

$$Índice\ de\ polarización = \frac{Lectura\ a\ 10\ \min\ utos}{lectura\ a\ 1\ \min\ uto}$$

Tabla 9.5. Índices de polarización para el análisis de resultados de resistencia de aislamiento

Índices de polarización	Condiciones del aislamiento
> 2.0	Bueno
De 1.5 a 2.0	Justo
De 1.1 a 1.25	cuestionable
1.0 a 1.1	Pobre
< 1.0	Peligroso

Tabla 9.5. Índices de polarización para el análisis de resultados de resistencia de aislamiento

Cálculo de la resistencia de aislamiento mínima norma ANSI/IEEE C.57.125.1998.

Valores menores del resultado calculado son indicativos de probable ruptura del aislamiento. Cuando existe bajo valor, indican devanado a tierra, corto entre devanados carbonización del papel aislante, aislamiento débil y quebradizo.

R en mΩ; C= 1.5 para transformadores sumergidos en aceite a 20°C; E rango de voltaje en volts. C = 30.0 para transformadores tipo seco y llenos de compound sin tanque.

Prueba de resistencia de aislamiento al núcleo de transformadores.

Procedimiento de prueba:

1. Localizar boquilla de conexión a tierra,
2. Desconectar terminal de tierra,
3. El voltaje de prueba no debe exceder de 1000 volts,
4. La medición debe desarrollarse entre la conexión y tierra,

$$R = \frac{C\ x\ E}{\sqrt{kva}} M\Omega$$

Prueba de resistencia de aislamiento al núcleo de transformadores

Procedimiento de prueba:

1. Localizar boquilla de conexión a tierra.
2. Desconectar terminal de tierra.
3. El voltaje de prueba no debe exceder de 1000 volts.
4. La medición debe desarrollarse entre la conexión y tierra.
5. Las mediciones deben desarrollarse en condiciones climatológicas apropiadas, con una humedad residual en el medio ambiente menor a 65%.

EQUIPO	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO NUCLEO	CONDICIONES DEL AISLAMIENTO
NUEVO	> 1000 MΩ	
	> 100 MΩ	NORMAL
EN SERVICIO	10 –100 MΩ	INDICA DETERIORO AISLAMIENTO
	< 10 MΩ	CORRIENTES CIRCULANTES. INVESTIGAR

Precauciones de mantenimiento:

- Evitar operación con pérdida de conexión a tierra.
- Causa pequeños voltajes en laminaciones del núcleo.
- Calentamientos y generación de gases.
- Provoca cortos circuitos entre laminaciones.
- Envejecimiento prematuro reduciendo la vida útil del transformador.

ANEXO 11.

El tipo más común de un núcleo es un acero compuesto principalmente de hierro con un pequeño porcentaje de otros materiales, especialmente silicio.

Propiedades de los materiales principales.

En términos generales, hay cinco propiedades a considerar en los materiales básicos. Estos son: (1) permeabilidad, (2) saturación, (3) resistividad eléctrica, (4) remanencia y (5) coercitividad. La propiedad importante de la histéresis, que se explicará brevemente, se tiene en cuenta en la lista, ya que depende de los valores relativos de (4) y (5).

Permeabilidad (μ).

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Cuando B se traza contra H, se obtiene una curva llamada curva de magnetización, curva de saturación, o simplemente (y verdaderamente) la curva B-H, como en la Figura 4-1. Esta es una curva B-H para una muestra de material que previamente había sido totalmente desmagnetizado y luego sometido a una fuerza de magnetización gradualmente creciente mientras se medía la densidad de flujo. La pendiente de esta curva en cualquier punto dado da la permeabilidad en ese punto. Cuando la permeabilidad se calcula y se traza contra B (o H), se ve que no es constante. Varía y, por lo tanto, su valor solo puede expresarse en un valor dado de B (o H). Esta variación relativa se muestra mediante la línea de puntos en la Figura 4-2.

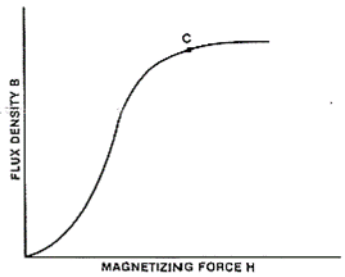


Figura 4.1 Curva B-H

Propiedades de los materiales principales.

En términos generales, hay cinco propiedades a considerar en los materiales básicos. Estos son: (1) permeabilidad, (2) saturación, (3) resistividad eléctrica, (4) remanencia y (5) coercitividad. La propiedad importante de la histéresis, que se explicará brevemente, se tiene en cuenta en la lista, ya que depende de los valores relativos de (4) y (5).

Cuando B se traza contra H, se obtiene una curva llamada curva de magnetización, curva de saturación, o simplemente (y verdaderamente) la curva B-H, como en la Figura 4-1. Esta es una curva

B-H para una muestra de material que previamente había sido totalmente desmagnetizado y luego sometido a una fuerza de magnetización gradualmente creciente mientras se medía la densidad de flujo. La pendiente de esta curva en cualquier punto dado da la permeabilidad en ese punto. Cuando la permeabilidad se calcula y se traza contra B (o H), se ve que no es constante. Varía y, por lo tanto, su valor solo puede expresarse en un valor dado de B (o H). Esta variación relativa se muestra mediante la línea de puntos en la Figura 4-2.

La permeabilidad a valores bajos de H se llama permeabilidad inicial. Las calidades comunes de los materiales de núcleo, como el acero con bajo contenido de carbono y el acero al silicio, tienen baja permeabilidad inicial.

Muchas aleaciones, en particular los tipos de níquel-hierro, se han desarrollado en las últimas décadas para proporcionar altas permeabilidades iniciales, a menudo increíblemente altas.

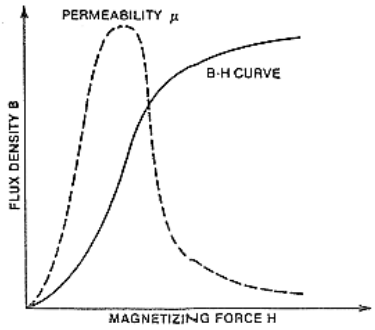


Figura 4.2. variación relativa de μ con B y H.

Otro término que se encuentra con frecuencia en el diseño de transformadores es la permeabilidad incremental, a veces aparente o permeabilidad de corriente alterna. Esta es la permeabilidad cuando una fuerza de magnetización de CA se superpone a una fuerza de magnetización de CC, una situación común en algunos tipos de circuitos electrónicos. El efecto de la corriente continua es acercar el hierro a su punto de saturación y, por lo tanto, disminuir (generalmente) la permeabilidad para la corriente alterna. En estas condiciones, la permeabilidad se mejora al incluir un espacio de aire de tamaño óptimo en el circuito magnético. La Figura 4-3 muestra el efecto de variar el espacio del núcleo en la inductancia de cualquier bobina con núcleo de hierro. Se muestran tres niveles de la corriente continua para un nivel fijo de CA.

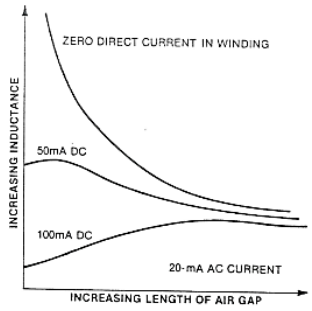


Figura 4-3. Variación de inductancia con tres valores de corriente directa en devanados y fijos con corriente alterna.

Saturación.

La curva B-H muestra claramente el significado de saturación. Se puede ver que más allá de un cierto valor de H (punto C en la Figura 4-1) hay poco aumento en B; El hierro se acerca a la saturación. Los diferentes materiales se saturan a diferentes valores de densidad de flujo. Tenga en cuenta que en la saturación la permeabilidad debe ser pequeña o cero porque hay poco o ningún aumento en B para un aumento en H. Esto significa que la inductancia es muy pequeña cuando el hierro se satura. Normalmente, se tiene cuidado de no correr el hierro más allá de este punto, aunque hay excepciones importantes como se verá más adelante.

Resistividad eléctrica.

Las líneas de flujo que unen los devanados del transformador también pasan a través del núcleo e inducen corrientes eléctricas en él. Estas corrientes parásitas calientan el núcleo, por lo tanto, generan mucho poder. Si la resistencia eléctrica del núcleo es alta, la corriente será baja; Por lo tanto, una característica del material de baja pérdida es la alta resistencia eléctrica. Este tipo de pérdida también se reduce al construir el núcleo con láminas delgadas, cada una aislada de las demás.

Histéresis (remanencia y coercitividad).

Cuando una muestra de material inicialmente desmagnetizada se toma a través de un ciclo completo de magnetización y B traza nuevamente H, aparece una figura como en la Figura 4-4. Se notará que esta curva, como la Figura 4-1, también es una curva B-H. La diferencia es que en la Figura 4-1 el material se tomó solo a través de un cuarto de ciclo, mientras que la Figura 4-4 es una imagen del ciclo completo que sigue al primer cuadrante. El primer cuadrante del ciclo se muestra con la línea de puntos. Aquí la curva comienza en 0. A medida que H aumenta, la densidad de flujo (B) aumenta a lo largo de la línea punteada hasta el punto de saturación, S. Cuando ahora H disminuye y se traza B, se encuentra que la curva sigue un camino como SR; no regresa a lo largo de la ruta original del sistema operativo. Obviamente, entonces, cuando H se ha reducido a cero, el núcleo todavía está magnetizado y todavía queda un valor R de densidad de flujo en la muestra. Esta cantidad R se denomina apropiadamente remanencia.

“La fuerza de magnetización H ahora se invierte en polaridad para dar valores negativos. Estos aumentan progresivamente y la curva continúa de R a C. En el punto C, la densidad de flujo vuelve a ser cero, pero H tiene un valor específico. Este valor (OC) se llama coercitividad; es la cantidad de fuerza de magnetización Hc necesaria para forzar (o coaccionar) la densidad de flujo a cero.”

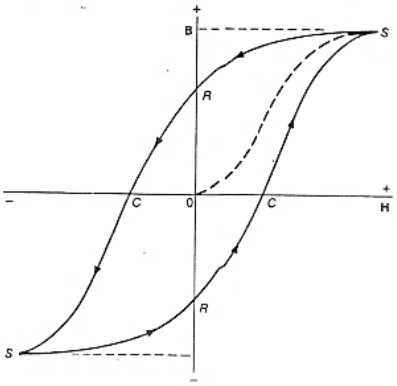


Figura 4.4. Ciclo de Histéresis

Un punto interesante de todo esto es que, en la práctica, la magnetización de un núcleo en un transformador de trabajo nunca sigue la curva B-H de la Figura 4.1. Puede ocurrir solo una vez en la vida útil de un núcleo en funcionamiento y solo por un instante fugaz si el núcleo se encuentra en una fuerza totalmente desmagnetizada se enciende por primera vez (un evento poco probable). El área del ciclo de histéresis es una medida de la pérdida.

Pruebas a los parámetros eléctricos del transformador.

En un transformador Estrella – delta al medir la corriente de excitación se esperan dos lecturas similares altas y una lectura baja, la fase central en un 20% o 25% aproximadamente. Al realizar la prueba, se está midiendo las pérdidas en el núcleo en cada una de las fases.

Si la prueba de corriente de excitación no se puede medir, es debido al magnetismo residual que se tiene como se indica en la teoría previa; por lo que no se deben realizar mediciones de corriente directa previas a las de corriente alterna para evitar estos problemas. Bajo este entorno, los valores medidos de corriente de excitación para obtener las pérdidas por fase del núcleo del transformador son satisfactorias.

ANEXO 12.

Prueba de corriente de excitación.

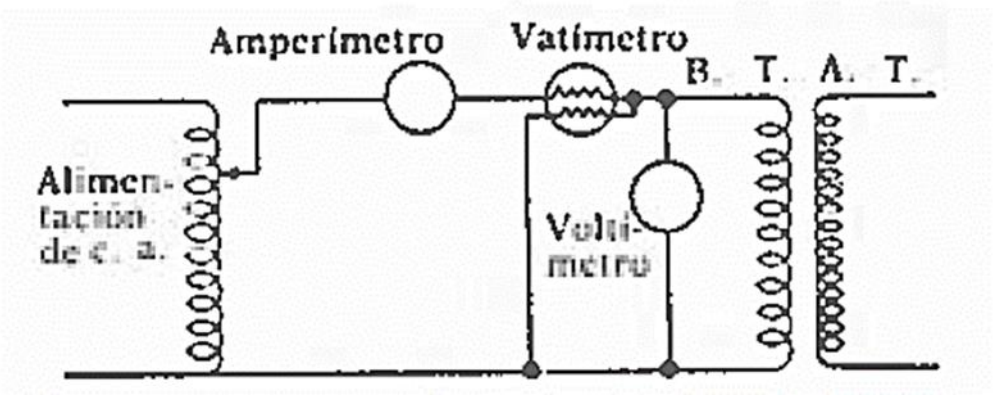


Figura 1 circuito eléctrico para prueba de corriente de excitación. Pérdidas en el núcleo.

CAMBIADOR DE DERIVACIONES FUERA DE SERVICIO

```
FABRICANTE: FERRANTI PACKARD:            Type:
PASOS: 5      Boost 2.5%     Buck:- 2.5%
Posición encontrada:3        PSN-Left:3
```

- ✓ Los valores son satisfactorios, están dentro de la diferencia del ± 10% en el tap nominal; en la próxima salida, realizar un ajuste al mecanismo para observar la resistencia de contacto.

DETC PSN	KV	H1 – H0		H2 – H0		H3 – H0		RTG	
		mA	watts	mA	watts	mA	watts		
1	10	33.360	244.60	25.490	193.60	33.450	244.0	G	
2	10	35.120	255.60	26.920	202.60	35.270	255.30	G	
3	10	37.140	268.10	28.540	212.60	37.300	267.80	G	
4	10	39.290	281.80	30.270	223.30	39.460	28140	G	
5	10	41.520	296.20	32.020	236.60	41.720	295.90	G	
3	10	37.090	268.20	28.420	214.10	37.250	268.00	G	

ANEXO 13.

Prueba de relación de transformación.

Prueba de relación de transformación a devanados.

- Calibración del capacitor

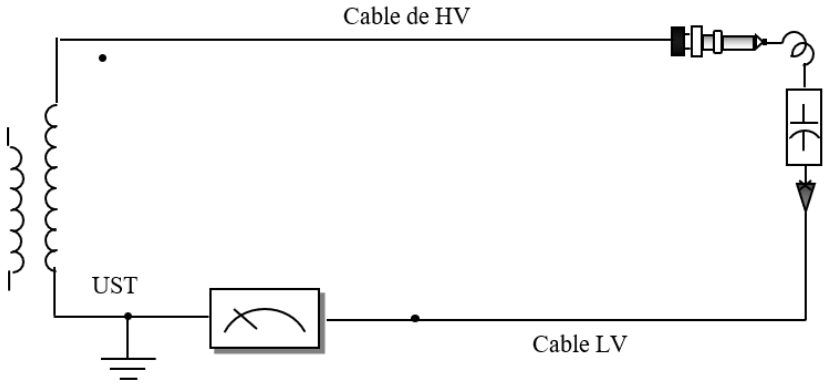


Tabla 1. Resultados de mediciones de relación de transformación en cada una de las posiciones.

Tap	Voltage A.T.	Voltage B.T.	Relac. Teórica	H1-H0 X1-.X2	H2-H0 X2-.X3	H3-H0 X3-.X1	Límite Inferior	Límite Superior	RTG
1	242.48	20	12.124	12.134	12.134	12.129	12.134	12.063	G
2	236.71	20	11.836	11.836	11.843	11.834	11.776	11.895	G
3	230.94	20	11.547	11.547	11.546	11.545	11.489	11.605	G
4	225.16	20	11.258	11.251	11.251	11.548	11.202	11.314	G
5	219,39	20	10.970	10.957	10.957	10.957	11.024	11.024	G
3	230.94	20	11.547	11.548	11.548	11.548	11.489	11.605	G
Nota 1. Realizar ajuste en cambiador de derivaciones, hay lecturas similares a la relación teórica y algunas abajo del calculado.									

ANEXO 14.

Prueba de reactancia e impedancia de dispersión.

Prueba de reactancia e impedancia de dispersión a devanados. Resultados con equivalente trifásico.

Tabla 1. Datos de placa del transformador requeridos para la prueba. (Tap 1).

Fecha	Localización	Fabricante	Número Serie	Modo pueba
04/05/06		Ferranti Packar	TP-610	Equiv. 3F
Tipo devanado	Frecuencia	Base Voltamperes	Base en volts	Z% placa
Estrella-Delta	60 Hz	135 MVA	420 kV	3.880 %
Punto de referencia	Punto de referencia X%	Posición Cambiador		
3.880	3.880	1		
Comentarios:				

Cálculo de impedancia en % nueva base al cambiar la posición del tap.

$$Z(nueva\ base)\ \ \% = \left[\frac{KV(\ base\ \ dada)}{KV(base\ nueva)}\right]^2 x\ Z\%\ (Placa)$$

- Resultados:

Tabla 2. Valores de prueba con equivalente trifásico Tap 1.

Resultados de prueba	FASE A– H1–H0 X-1,2,3,	FASE B H2–H0-X-1,2,3	FASE C H3–H0-X1,2,3,
VolTaje de prueba CC	82.72 Volts	85.07 Volts	82.74 Volts
Corriente CC	0.8133 A	0.8339 A	0.8150 A
Factor de potencia CC	2.14 %	2.81 %	2.91 %
ΔX	0.21 %		
ΔZ	0.25 %		
X – Ohms	101.60 Ohms	101.90 Ohms	101.40 Ohms
Z – Ohms	101.60 Ohms	101.90 Ohms	101.40 Homs
Comentario: todos los valores son positivos, en los parámetros eléctricos el transformador puede ser energizado; pero debe de realizarse antes una inspección interna en el devanado secundario y observar la sujeción de las bobinas.			

Tabla 3. Datos de placa para prueba de reactancia de dispersión en Tap 3.

Fecha	Localización	Fabricante	Número Serie	Modo prueba
04/05/06		Ferranti Packart	TP-610	Equiv. 3F
Tipo devanado	Frecuencia	Base Voltamperes	Base en volts	Z% placa
Estrella-Delta	60 Hz	135 MVA	400 kV	3.880 %
Punto de referencia	Punto de referencia X%	Posición Cambiador		
3.880	3.880	3		
Comentarios:				

Tabla 4. Valores de prueba con equivalente trifásico Tap 3.

Resultados de prueba	FASE A– H1–H0 X-1,2,3,	FASE B H2–H0-X-1,2,3	FASE C H3–H0-X1,2,3,
Voltaje de prueba C.C	189.30 Volts	186.90 Volts	187.50 Volts
Corriente C.C	2.045 A	2.011 A	2.028 A
Factor de potencia C.C	2.30	3.04 A	3.33 A
ΔX	0.21 %		
ΔZ	0.25 %		
X – Ohms	92.63 Ohms	92.94 Ohms	92.42 Ohms
Z – Ohms	92.56 Ohms	92.99 Ohms	92-47 Ohms
Comentario: los valores obtenidos en los parámetros eléctricos, el transformador puede ser energizado bajo previa inspección interna en devanado de baja tensión.			

- ✓ La diferencia encontrada entre el valor indicado en la placa de datos y el medido está dentro del valor indicado en las normas ANSI/IEEE Std. 62. y de la norma ANSI/IEEE C57. 125 ±3.0%

A continuación, se anexan gráficos de las mediciones:

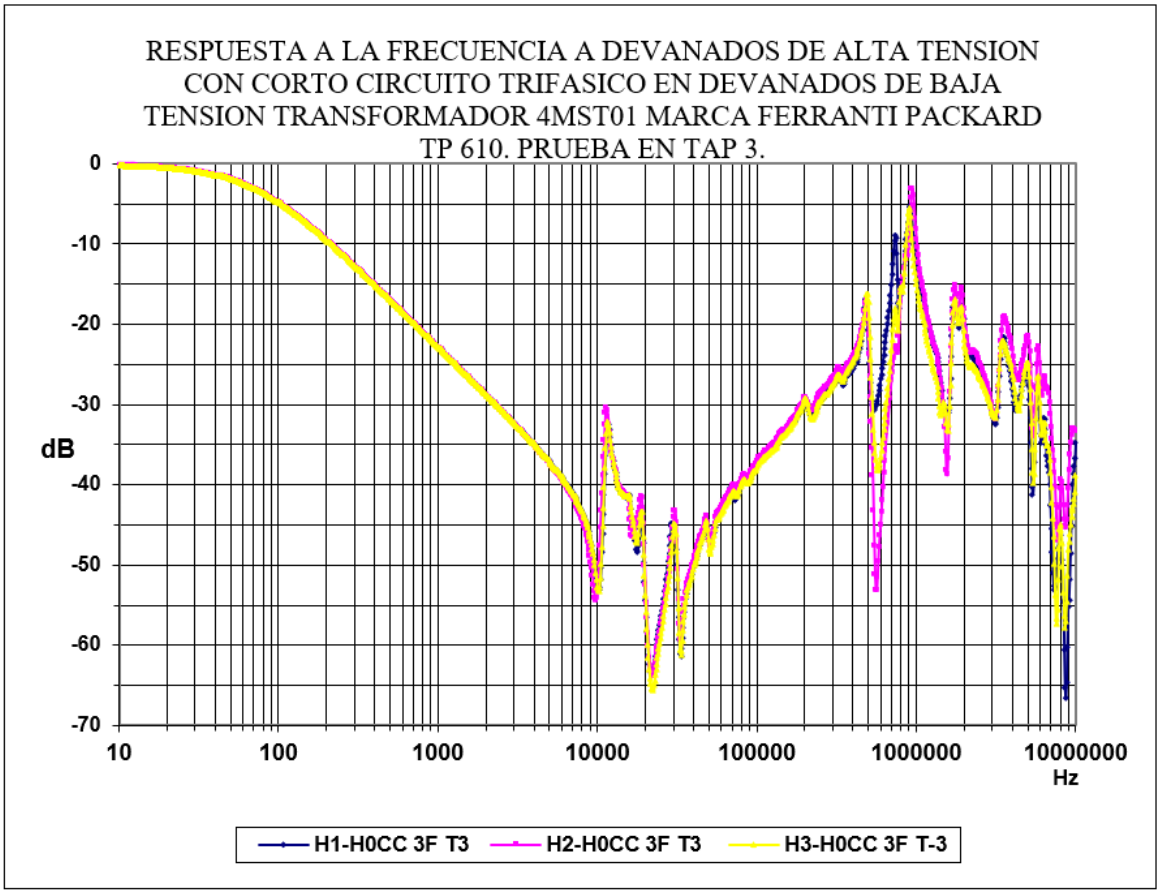


Gráfico 1. Prueba de respuesta a la frecuencia en devanados de alta tensión, con corto circuito trifásico en baja tensión.

1. De la frecuencia cero hasta la frecuencia de 10 kHz los conductores de las tres fases H1, H2 y H3 se mantienen homogéneos en el trazo.
2. De la frecuencia de 20 kHz hasta la frecuencia de 10 MHz se inicia distorsión de la fase H2 (fase central) de la frecuencia de 550 kHz a 900 kHz indica problemas de contacto en el cambiador de derivaciones. Este problema de ajuste se observa también en el resultado de las pruebas de relación de transformación.
3. Este problema de ajuste nos puede causar el inicio de arqueos en los contactos fijos o móviles del cambiador de derivaciones.
4. Requiere esto una inspección interna y consultar con el fabricante.

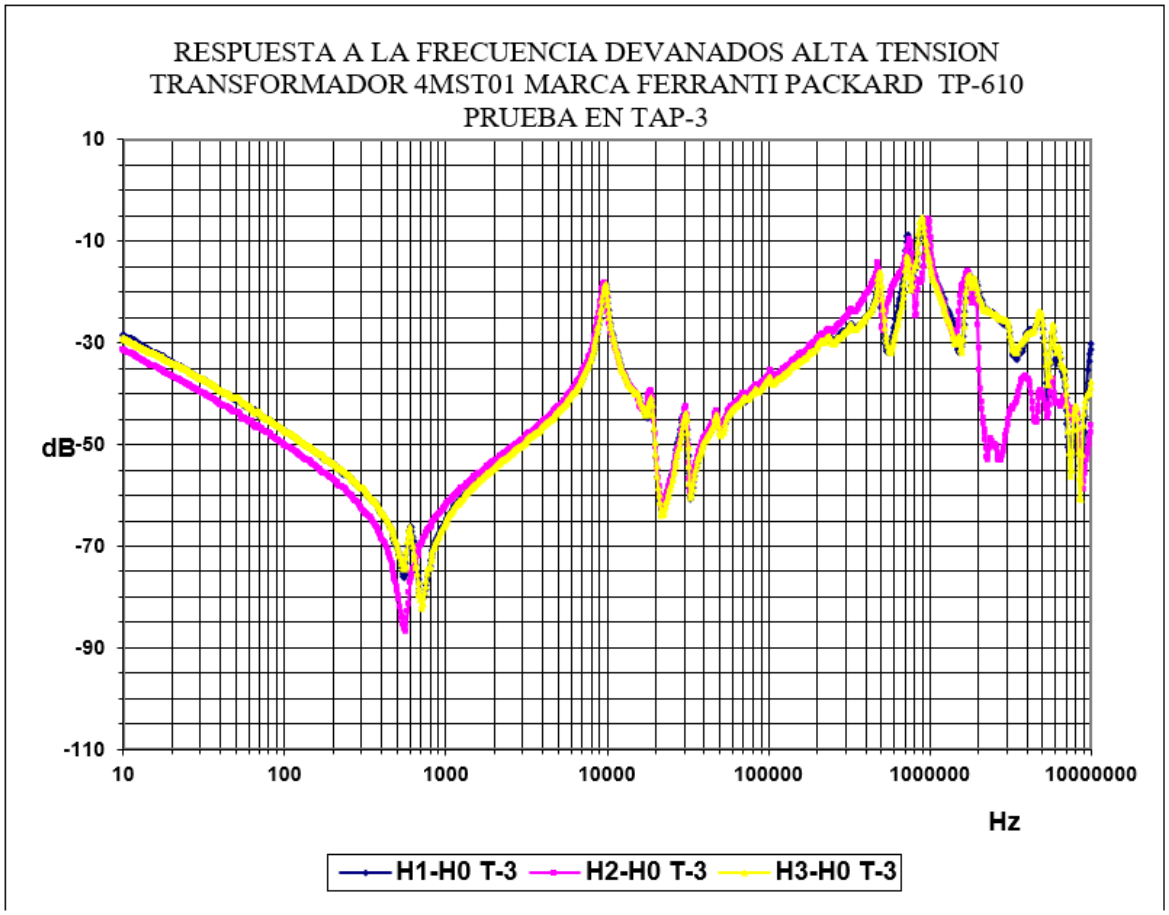


Gráfico 2. Prueba de l barrido de respuesta a la frecuencia en devanados de alta tensión con devanados de baja tensión en circuito abierto.

1. En la escala de decibeles, se aprecia un pequeño aflojamiento en laminaciones o del yugo del núcleo en la fase H1-H0.
2. De la frecuencia – 30 dB a 10kHz se aprecia una curva casi perfecta, en estos rangos se tiene que el núcleo magnético no tiene problemas fuertes que indiquen laminaciones flojas.
3. Realizar una inspección minuciosa a loa yugos y al núcleo magnético.
4. De la primera resonancia que ocurre entre las frecuencias de 500 y 600 Hz, inicia una pérdida de geometría en fase H2 hasta la frecuencia de 10 MHz.
5. Un soporte más para que se autorice la inspección.

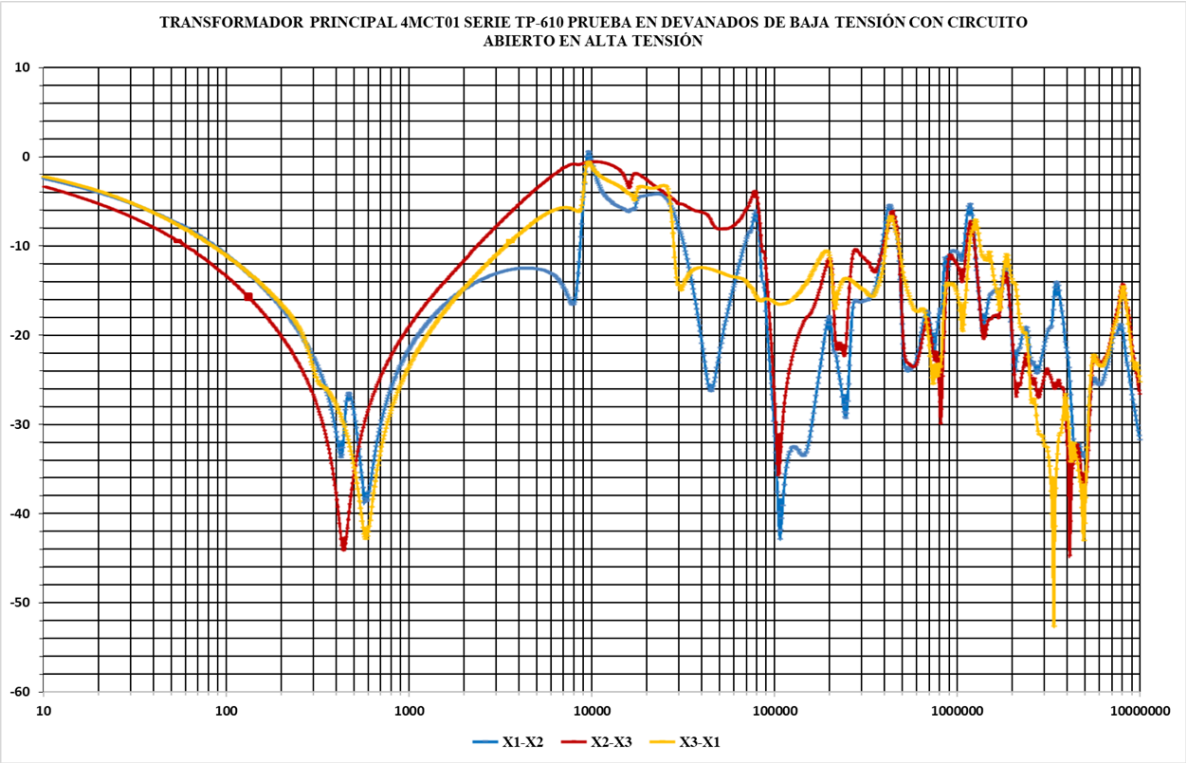
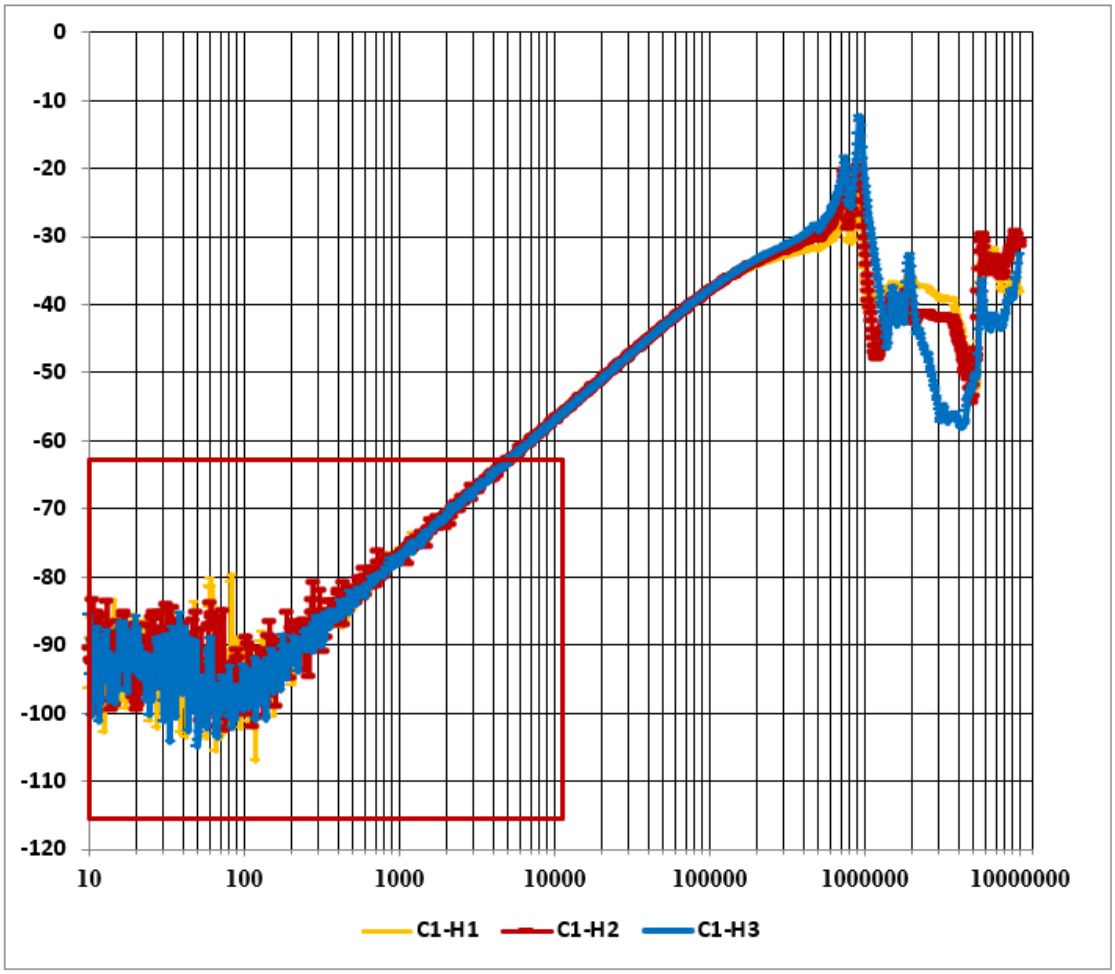


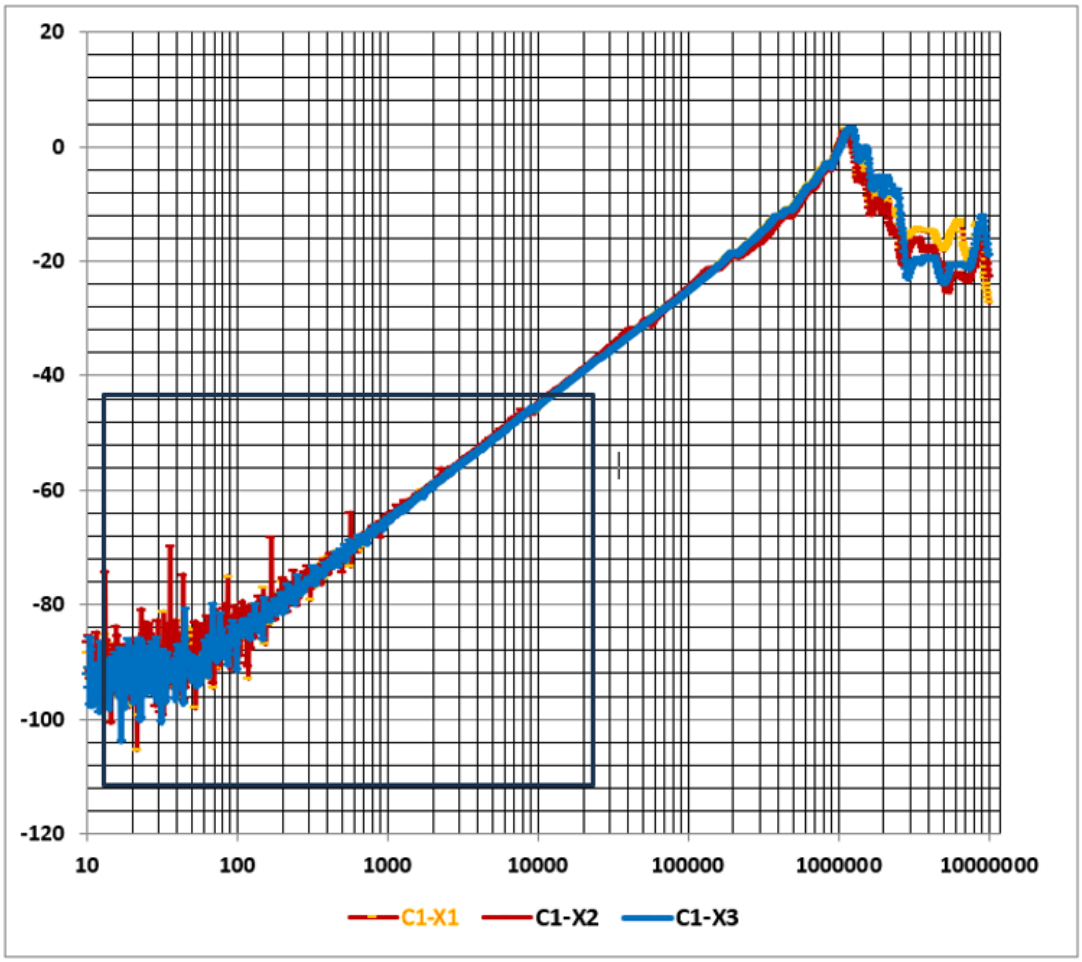
Gráfico 3. Barrido de respuesta a la frecuencia en devanados de baja tensión con devanados de alta tensión en circuito abierto.

1. De la frecuencia de 2 Hz hasta la primera y segunda resonancia, se tiene que las fases X1-X2, X2-X3 y X3-X1, tienen ligero desplazamiento.
2. De aquí hasta la frecuencia de 10 MHz existe una pérdida de geometría en las tres fases difícil de explicar.
3. Esto fue debido al disparo súbito del generador que está conectado en el devanado de 20 kV del transformador.
4. Con estos gráficos soportan la problemática existente en el transformador, por lo cual no se puede energizar.



Gráfica 4. Prueba de respuesta a la frecuencia en el aislamiento C1 de boquillas de alta tensión transformador principal.

1. Se tuvo problemas de fuga de aceite por boquillas H1 y H3 de alta tensión. Se debió realizar llenado de aceite y pruebas de los aislamientos principales C1 de las tres boquillas y boquilla H0.
2. Medir resistencia de aislamiento en conductor principal de los devanados.



Gráfica 5. Pruebas a los aislamientos principales C1 de Boquillas de baja tensión.

Tabla. Guía IEEE para interpretar los gráficos del SFRA (Análisis del Barrido de Respuesta a la Frecuencia).

FRECUENCIA	CONDICIONES
< 2 kHz	- Deformación del núcleo - Circuitos abiertos - Vueltas en corto - Magnetismo residual
De 2 kHz a 20 kHz	- Movimiento de devanados con respecto a otros - Tornillos de sujeción flojos
De 20 kHz a 400 kHz	- Deformación dentro del conductor principal y derivaciones de los devanados
De 400 kHz a 2 MHz	- Movimiento de conductor principal y, - Terminales de los taps de los devanados -
De 2 MHz. A 3MHz	- Condiciones de boquillas de alta y baja tensión

Observaciones:

3. Esto es una base para el análisis, se debe de contar con la experiencia en las mediciones para definir en forma correcta las condiciones del transformador juntamente con las pruebas de diagnóstico aplicables, así se puede determinar las condiciones de servicio del equipo.
4. Debe llevarse a cabo un análisis comparativo con equipos similares, fabricante, tensión, capacidad, corriente, etc.

ANEXO 15.

En la prueba de tensión de recuperación se instala el equipo en modo automático a partir de las 18 horas del primer día de prueba hasta las 09:00 am del día posterior para observar un mejor análisis con 12 horas de medición observando el siguiente gráfico y sus tiempos de medición indicados en la tabla anexa.

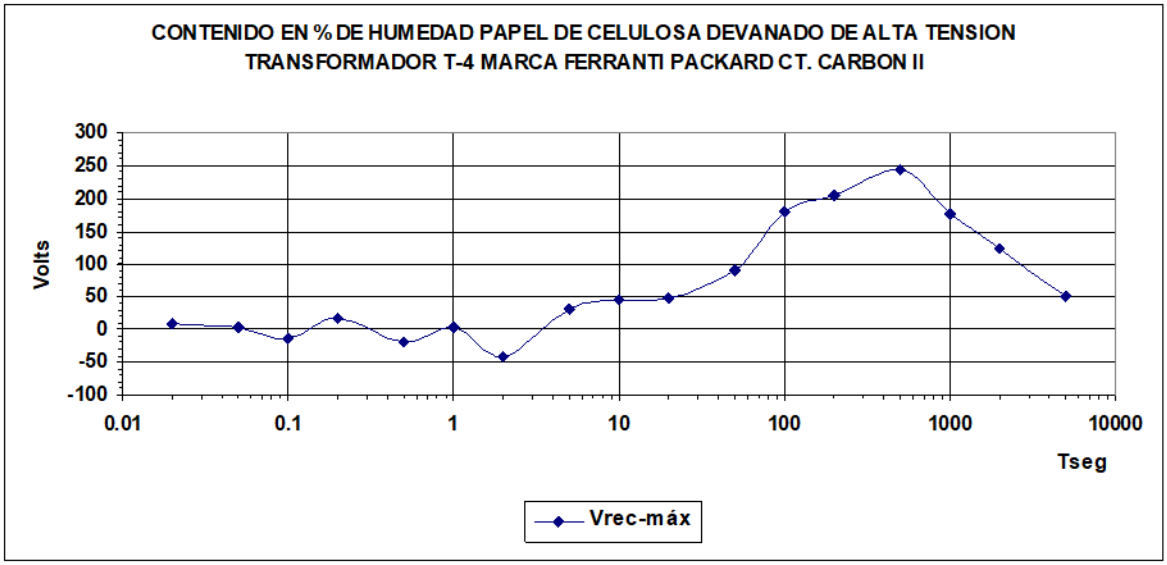


Tabla 1. Valores de Tensión de Recuperación.

Tseg	Vmáx-rec (V)	H_2O %	Tcrit (°C)
0.03	10.6	6.0	43
0.20	17.6	5.1	48
0.92	5.5	4.4	54
8.15	44.8	3.3	65
427.8	246.4	1.4	102

La tabla nos indica lo siguiente:

1. En esta prueba, se observan en el gráfico cinco puntos altos, que quiere decir que se encuentran moléculas de agua que pueden eliminarse con una recirculación de aceite a una temperatura de 30°C en tres ocasiones o sea por tres días consecutivos.
2. No se recomienda realizar el tratamiento de secado normal, debido a que el transformador es nuevo y el aceite aislante y el papel de los aislamientos no han tenido interacción química para realizarlo.
3. Deben esperarse hasta los 4 años para realizar el primer tratamiento de secado y así, no se envejece la vida útil de los aislamientos aceite papel.
4. Un transformador tiene una vida útil de 30 años o más, si se realizan los mantenimientos apropiados cada cuatro años o se detecta alguna anomalía interna y se corrige, esto se detecta en cualquiera de las pruebas de diagnóstico mencionadas anteriormente.

5. Llevar de la mano los resultados de los análisis fisicoquímicos, cromatografía y las pruebas de diagnóstico.
6. Es recomendable que antes de que se realicen las reparaciones totales llevadas a cabo, se haga un análisis de furanos por cualquiera de los dos métodos (Griffin P.J.) o Chendong y/o algún laboratorio reconocido por el fabricante.
7. Método Chendong:

GP> 800 el papel está en buenas condiciones
GP< 800 > 400 el papel tiene media vida
GP< 400 el papel aislante está en su último tercio de vida útil.

8. Otro criterio dado por el investigador Griffin P.J. considerando el 2-furfural es:

Aislamiento normal	< 100 μg/kg
Media vida	≥ 100 < 1000 μg/kg
Último tercio de vida	≥ 1000 μg/kg

Para un envejecimiento normal, el incremento en la concentración anual de 2-furfural.

ANEXO 16.

Prueba de resistencia óhmica a devanados.

Las mediciones de resistencia óhmica de los devanados nos sirven para detectar continuidad en las bobinas (falsos contactos y espiras en corto circuito). El valor de la resistencia obtenida en la medición servirá para calcular las perdidas en el cobre, así como para calcular las elevaciones en la prueba de temperatura.

Una resistencia medida en los devanados mayor al rango de aceptación de ± 5% indica un falso contacto interno. Debe programarse una inspección interna.

Una resistencia muy alta se debe a bobinas o conexiones abiertas internamente. Debe programarse una inspección interna.

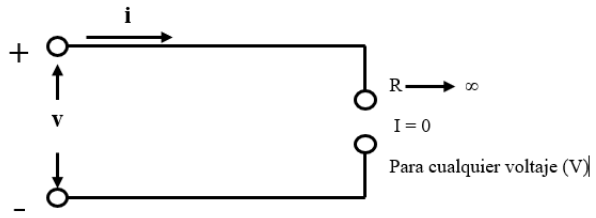
Equipo utilizado:

1. Puente de Kelvin: (para valores de resistencia < 1 Ω)
2. Puente de Wheatstone: (para valores de resistencia ≥ 1 Ω)

Un puente de Weasthone consta de 4 resistencias conectadas en un dispositivo de medición. Una de las resistencias "RX" tiene un valor desconocido "A". Esta resistencia se conecta a y un galvanómetro sensible entre las otras dos.

<u>Circuito abierto</u>:

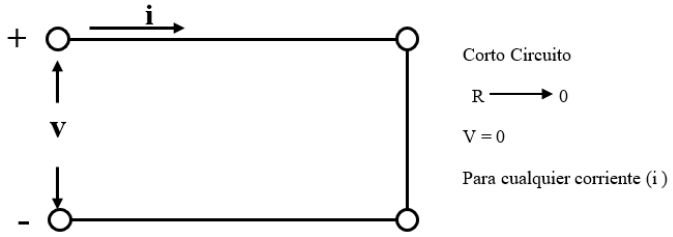
Un elemento del circuito cuya resistencia tienda a infinito recibe el nombre de circuito abierto.



Sin embargo, la forma ideal para un circuito abierto, como se observa en la figura, no existe para voltajes muy altos. El material aislante entre dos conductores aislados fallará a un voltaje suficientemente alto.

<u>Cortocircuito</u>:

Cuando la resistencia de un elemento del circuito tiende a cero, se denomina corto circuito. Formalmente se define un corto circuito como un elemento del circuito cuyo voltaje es igual a cero, independientemente de la corriente.



Finalidad de las mediciones.

- ✓ Checar conexiones sueltas, trenzas de los devanados
- ✓ Alta resistencia de contactos en el cambiador de derivaciones

Interpretación de los resultados.

Comparar mediciones con resultados de fábrica o historial de pruebas los valores no deben exceder del ± 5% al ± 10% ya sea para una conexión delta o estrella.

$$R_{dev} en°C = Rprueba * \frac{234.5 + T_{75}\ °C}{234.5 + T\ dev\ °C}$$

Año 2006				Año 2019			
Tap	H1 – H0	H2 – H0	H3 –H0	Tap	H1 – H0	H2 – H0	H3 –H0
1	0.381	0.371	0.381	1			
3	0.368	0.355	0.367	3			
5	0.355	0.342	0.353	5			
	X1 –X2	X2 –X3	X3 – X1		X1 –X2	X2 –X3	X3 – X1
	0.00145	0.00153	0.00151				
Se desconocen las causas de resultados de prueba de resistencia óhmica.							

Personal que realizó las mediciones en año 2019 después de limpieza de boquillas de alta y baja tensión no probaron la resistencia óhmica de los devanados.