

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA MEDIANTE PRUEBAS DE IMPULSO PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO EN TRANSFORMADORES

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

VÍCTOR HUGO TIBANLOMBO TIMBILA

vic_230594@hotmail.com

DIRECTOR: Dr. Ing. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ

nelson.granda@epn.edu.ec

Quito, Septiembre del 2018

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Víctor Hugo Tibanlombo Timbila, bajo mi supervisión.

DR. ING. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Víctor Hugo Tibanlombo Timbila, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

VÍCTOR HUGO TIBANLOMBO TIMBILA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanas, por su sacrificio y apoyo incondicional, me motivaron con su amor y paciencia.

A las personas que me brindaron su apoyo y que siempre creyeron en mí.

Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Yo estaré contigo en dondequiera que vayas.

- *Josué 1:9*

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza y valentía para culminar una de tantas metas de mi vida.

A mis padres Clemencia y Víctor, por su total apoyo, paciencia, sacrificio y amor incondicional durante esta etapa de mi vida.

A mis hermanas Pamela y Daniela, por su paciencia y cariño, siempre contarán conmigo.

A mis amigos con los cuales compartí esta etapa universitaria, por cada partido disputado, por cada consejo brindado, por cada semestre culminado, gracias por estar ahí.

A los profesores del DEE, por brindarme su amistad y consejos durante mi etapa laboral como Asistente de Cátedra en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Al Dr. Nelson Granda por su apoyo desinteresado en el desarrollo y culminación de este proyecto.

Al Ingeniero Juan Ramírez, quien me brindó su ayuda y amistad sincera durante el desarrollo del proyecto, brindando ideas y apoyo en cada actividad realizada en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
PRESENTACIÓN.....	X
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
1.2 Alcance	2
1.3 Marco Teórico	3
1.3.1 El Transformador Eléctrico	3
1.3.2 Pruebas en Transformadores de Distribución.	7
1.3.3 Modelos del Transformador.....	9
1.3.4 Revisión de la Respuesta en Frecuencia en Transformadores	13
2 METODOLOGÍA PROPUESTA.....	19
2.1 Transformador Bajo Prueba	19
2.2 Pruebas de Rutina.....	20
2.2.1 Medición de la Resistencia de Aislamiento.....	21
2.2.2 Relación de Transformación Medida.	22
2.2.3 Prueba de Circuito Abierto.....	23
2.2.4 Prueba de Cortocircuito	23
2.2.5 Prueba de Voltaje Aplicado	24
2.2.6 Prueba Dieléctrica del Aceite Aislante.	24
2.3 Mantenimiento Correctivo	25
2.4 Generación de Impulsos Atmosféricos.....	28
2.5 Medición y Obtención de la Respuesta en Frecuencia	30
2.5.1 Conexiones para Medición FRA	31

2.5.2	Digitalización de Datos	33
2.5.3	Obtención de la Respuesta en Frecuencia.....	35
2.5.4	Resolución en el Dominio de la Frecuencia (Zero Padding).....	37
2.5.5	Coherencia	38
2.6	Evaluación del Aislamiento del Transformador a Partir de FRA.....	39
2.6.1	Efecto de la Condición del Aislamiento en Parámetros Eléctricos....	40
2.6.2	Porcentaje de Cambio de Capacitancia.....	41
2.6.3	Capacitancia de la Prueba de “Entrelazado Capacitivo”.....	42
3	PRUEBAS EN EL LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
3.1	Pruebas de Rutina.....	44
3.1.1	Medición de la Resistencia de Aislamiento.....	44
3.1.2	Prueba Dieléctrica del Aceite Aislante	45
3.1.3	Relación de Transformación Medida	45
3.1.4	Prueba de Circuito Abierto.....	46
3.1.5	Prueba de Cortocircuito	47
3.1.6	Prueba de Voltaje Aplicado	48
3.2	Respuesta en Frecuencia Mediante Pruebas de Impulso	48
3.2.1	Tipo de Prueba: A.V Circuito Abierto (OC)	49
3.2.2	Tipo de Prueba: B.V Circuito Abierto (OC)	57
3.2.3	Tipo de Prueba: Cortocircuito (SC).....	59
3.2.4	Tipo de prueba: Entre Devanado o Entrelazado Capacitivo (IC)	66
3.2.5	Tipo de Prueba: Entre Devanado o Entrelazado Inductivo (EI)	75
3.3	Evaluación del Aislamiento a Partir de las Mediciones IFRA	82
3.3.1	Porcentaje de Cambio de Capacitancia.....	82
3.3.2	Capacitancia Calculada de la Prueba de “Entrelazado Capacitivo”..	84
3.4	Resultados de la Metodología IFRA.....	87
3.4.1	Inspección Visual y Valoración Cualitativa de las Trazas	87
3.4.2	Valoración Cuantitativa.....	88
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
4.1	Conclusiones.....	91
4.2	Recomendaciones y Futuras Aplicaciones.....	94
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
6	ANEXOS.....	98
	ANEXO I. Ficha Técnica: Aceite Mineral Tipo II (Inhibido).....	98

ANEXO II. Transformadores de Distribución Nuevos Trifásicos. Valores de Corriente sin Carga. Pérdidas y Voltaje de Cortocircuito. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2115:2004.....	99
ANEXO III. Niveles de Aislamiento.....	100
ANEXO IV. Código computacional para la obtención de la respuesta en frecuencia. Ejemplo: Prueba de Entrelazado Capacitivo.....	101
ORDEN DE EMPASTADO	116

RESUMEN

En este proyecto técnico se hace una evaluación experimental del estado del aislamiento de un transformador triásico de 50 kVA sumergido en aceite por medio de la aplicación de impulsos atmosféricos estándar de alto voltaje y su respuesta en frecuencia, realizando un análisis de la respuesta en frecuencia (FRA). El análisis se lleva a cabo mediante la obtención de la respuesta del transformador en dos estados representativos del aceite dieléctrico (deteriorado y nuevo) y bajo diferentes configuraciones medición.

Como aplicación del proyecto se realiza también pruebas de rutina que normalmente se ejecutan a transformadores trifásicos en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional para una evaluación general del transformador bajo estudio.

Una vez obtenido una idea general del estado del transformador y su aislamiento mediante las pruebas de rutina, se procede a la obtención de la respuesta en frecuencia del transformador con el aceite deteriorado, posteriormente se realiza un mantenimiento correctivo del aislamiento que consiste en el cambio del aceite deteriorado contenido en el interior del transformador por un nuevo aceite mineral dieléctrico del tipo II.

Después del cambio, se aplica de nuevo las pruebas de rutina que evalúan el aislamiento para obtener una idea del efecto del cambio del aceite en este. En el nuevo estado del aislamiento se aplica impulsos de alto voltaje para obtener la respuesta en frecuencia del transformador en su nuevo estado representativo.

Se plantea también una metodología experimental para obtener mediciones de respuesta en frecuencia a partir de la aplicación de impulsos de alto voltaje estándar, aprovechando los equipos presentes en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN.

Por último, se presenta los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el Laboratorio de Alto Voltaje. Se realiza una comparación entre las respuestas en frecuencia de los estados representativos del transformador, evaluando cualitativamente y cuantitativamente las figuras obtenidas y relacionándolas con el estado del aislamiento.

PALABRAS CLAVE: Análisis de respuesta en frecuencia, transformador trifásico de 50 kVA sumergido en aceite, aislamiento, pruebas de rutina, impulsos de alto voltaje, aceite dieléctrico.

ABSTRACT

In this technical project, an experimental evaluation of the insulation state of a 50 kVA three-phase transformer submerged in oil is made by applying high-voltage standard atmospheric impulses to obtain frequency response, performing a Frequency Response Analysis (FRA). The analysis is carried out by obtaining the transformer response in two representative states of the dielectric oil (deteriorated and new) and under different measurement configurations.

As a project application, also routine tests are carried out that are normally executed on three-phase transformers in the High Voltage Laboratory of the National Polytechnic School for a general evaluation of the transformer under study.

Once obtained a general idea of the transformer state and its isolation through routine tests, the frequency response of the transformer with deteriorated oil is obtained, subsequently a corrective maintenance of the isolation is made, which consists in changing the oil-deteriorated content inside the transformer by a new type II dielectric mineral oil.

After the change, the routine tests that evaluate the insulation are again applied to get an idea of the effect of the oil change. In the new isolation state, high voltage impulses are applied to obtain the frequency response of the transformer in its new representative state.

In addition, an experimental methodology is proposed to obtain frequency response measurements from the application of standard high voltage lightning impulses, using the equipment available in the High Voltage Laboratory of the EPN.

Finally, the results obtained from the measurements made in the High Voltage Laboratory are presented. A comparison is made between the transformer frequency responses of the representative states, evaluating qualitatively and quantitatively the figures obtained and relating them to the state of the insulation.

KEYWORDS: Frequency response analysis, 50-kVA three-phase transformer submerged in oil, insulation, routine tests, high voltage impulses, dielectric oil.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo está conformado por 4 capítulos principales, los cuales envuelven todos los conceptos investigados acerca de pruebas de rutina en transformadores, análisis de respuesta en frecuencia en transformadores y la evaluación del aislamiento del transformador a partir de mediciones de respuesta en frecuencia.

En el capítulo 1, se presenta la introducción, describiendo el objetivo general, objetivos específicos a cumplirse y el alcance del proyecto, también contiene el marco teórico para el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 2, se presenta la metodología propuesta para la medición y obtención de la respuesta en frecuencia mediante la inyección de impulsos atmosféricos de alto voltaje y la evaluación del aislamiento a partir de las mediciones de respuesta en frecuencia. También se presenta la metodología para las pruebas de rutina y cambio del aceite dieléctrico realizado en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional.

En el capítulo 3, se presenta la aplicación de la metodología con pruebas en el Laboratorio de Alto Voltaje y el análisis de los resultados obtenidos, se presenta los resultados de las pruebas de rutina, los resultados de la respuesta en frecuencia mediante pruebas de impulso, todo esto se realiza antes y después del cambio del aceite deteriorado para realizar una evaluación del aislamiento interno ante este cambio realizado.

El capítulo 4, comprende las conclusiones del proyecto realizado y las recomendaciones para la ejecución de futuros proyectos relacionados a este tópico.

1 INTRODUCCIÓN

El Sistema Nacional Interconectado del Ecuador ha presentado un notable desarrollo en los últimos años debido al crecimiento poblacional y la necesidad de proveer un servicio eficiente y de mejor calidad. Los transformadores desempeñan un papel importante en este progreso, por esta razón se les realiza una serie de pruebas tanto en el proceso de fabricación para constatar su calidad y cumplimiento de normas internacionales de diseño, como en su etapa de operación, para tener un registro del estado general del transformador. Dentro de estas pruebas de rutina se encuentran los ensayos de prueba dieléctrica del aceite y de medida de la resistencia de aislamiento que son destinadas a dar una idea del estado del aislamiento en transformadores.

La prueba de impulso en transformadores tiene como meta calificar el aislamiento del transformador ante sobrevoltajes tipo impulso. Consiste en aplicar impulsos de voltaje de forma normalizada a los devanados del transformador bajo estudio. Es un ensayo de diseño o tipo para transformadores de distribución y potencia [12].

Como una prueba complementaria se tiene el análisis de la respuesta en frecuencia (FRA, Frequency Response Analysis), la cual es una técnica para la evaluación del estado de los transformadores, utilizada a nivel mundial como un complemento y apoyo de otras técnicas de diagnóstico, que permite obtener una mejor visualización del estado de los elementos RLC que conforman al transformador [9], entre ellos el aislamiento del transformador [11], [15], [16].

Para la ejecución de este tipo de pruebas se necesita de equipo especializado, por ejemplo: para las pruebas "SFRA" se necesita de analizadores de barrido en frecuencia o de medición de la impedancia, los cuales son de difícil acceso debido a su alto costo.

En este proyecto se plantea una alternativa al uso de equipo especializado para análisis de respuesta en frecuencia (caro y de difícil adquisición) mediante la aplicación de impulsos atmosféricos estándar de alto voltaje, utilizando el equipo presente en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional para ensayos de impulso y con la respuesta del transformador ante este "estimulo", poder obtener resultados semejantes a una prueba FRA y relacionarlos con el cambio del estado del aislamiento del transformador.

1.1 Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el estado del aislamiento de un transformador trifásico de 50 kVA sumergido en aceite por medio de la aplicación de impulsos de alto voltaje y su respuesta en frecuencia.

Objetivos Específicos

- Desarrollar una metodología práctica para la obtención de respuesta en frecuencia mediante impulsos de alto voltaje en transformadores.
- Obtener una estimación del estado general del transformador mediante la aplicación de pruebas de rutina con el equipamiento disponible en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional.
- Obtener la respuesta en frecuencia para diferentes configuraciones del transformador bajo estudio, mediante la aplicación de impulsos de alto voltaje.
- Comparar los resultados de las pruebas realizadas y relacionarlas con el estado del aislamiento eléctrico del transformador.

1.2 Alcance

El alcance de este proyecto abarca la determinación del estado actual de un transformador trifásico de 50 kVA sumergido en aceite mediante pruebas de rutina siguiendo la norma ANSI/IEEE C57.12.90 en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN, posteriormente, se obtuvo la respuesta en frecuencia mediante pruebas de impulso atmosférico estándar (1.2/50 μ s) y se realizó un análisis del estado del aislamiento del transformador, mediante el muestreo de las señales obtenidas con un osciloscopio de rayos catódicos (ORC) y el desarrollo de un código en MATLAB® para obtener los diagramas de frecuencia necesarios para el análisis del transformador.

Este proyecto incluye la parte práctica del mantenimiento en la que se realizó el cambio de aceite del transformador y cambio de un bushing de alto voltaje, para finalmente analizar y comparar los resultados de los espectros obtenidos para cada configuración según la norma IEEE C57.149, antes y después del mantenimiento.

1.3 Marco Teórico

En esta sección se presenta el sustento teórico del presente estudio basado en la revisión bibliográfica correspondiente. La sección comprende cuatro sub-secciones: la primera hace mención al transformador, su constitución y clasificación. En la segunda se describe las pruebas en transformadores de distribución sumergidos en aceite. La tercera sub-sección habla de los modelos del transformador: ideal, real y en altas frecuencias. En la última se hace una revisión de la respuesta en frecuencia en transformadores, métodos para la obtención de la respuesta y conexiones para mediciones de análisis de respuesta en frecuencia (FRA).

1.3.1 El Transformador Eléctrico

El transformador es una máquina eléctrica estática que permite modificar (aumentar o disminuir) el nivel de voltaje en un sistema de transmisión de corriente alterna, con la característica de mantener constante su potencia, mediante la acción de un campo magnético. Debido a su facilidad de operación tiene un uso muy extenso tanto en sistemas eléctricos de transmisión como de distribución de energía eléctrica [1].

Un transformador eléctrico está constituido esencialmente por:

- Núcleo: El núcleo es la parte constitutiva formada por laminas u hojas de material ferromagnético y proporciona un camino al flujo magnético, es decir lo mantiene confinado en él, evitando así que se disperse por el aire [2].
- Bobinas: Los bobinados son conductores de aluminio o cobre barnizados en esmalte, enrollados en el núcleo, que pueden ser redondos o rectangulares, dependiendo la potencia del transformador. Estos bobinados están formados por varias capas aisladas entre sí, evitando así la suscitación de cortocircuitos entre devanados [1].

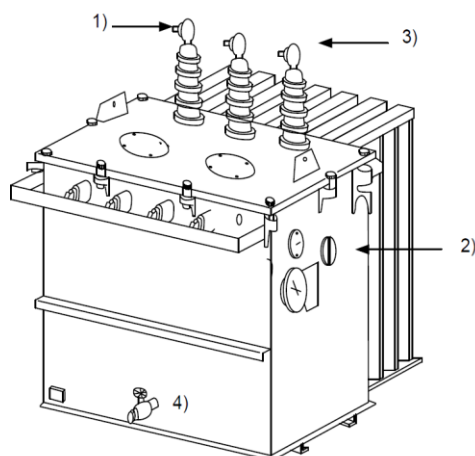
Generalmente, hay dos bobinados: primario y secundario. Los devanados del primario y del secundario están físicamente enrolladas una sobre la otra; el devanado de menor voltaje está situado en la parte interna (cercano al núcleo). La función del bobinado primario consiste en generar un campo electromagnético mediante la corriente alterna que circula en él y por medio de la inducción se genera una corriente en el devanado secundario [1], [3].

- Aislamiento: El aislamiento tiene la finalidad de aislar eléctricamente a las bobinas, el núcleo y partes de acero de la estructura siendo el medio que soporta los esfuerzos eléctricos entre los puntos energizados [2].

El aislamiento se ubica dentro las capas de las bobinas, en medio de las bobinas y entre la bobina y el núcleo. Los principales materiales utilizados como aislantes son: el papel (kraft, manila y corrugado), cartón (prensado laminado o de alta densidad), esmaltes y barnices. Con el objeto de aumentar el aislamiento se puede colocar aceite ayudando así también a la refrigeración del transformador [2], [3].

- Otros componentes: dependiendo del tipo de transformador (monofásico o trifásico), uso, sistema de refrigeración y nivel de potencia encontramos diferentes componentes que ayudan a la operación normal de este [2]:

- 1) Bushings de A.V y B.V: Su función es aislar al conductor a su paso por la tapa o cuba del transformador para conectar los devanados al sistema eléctrico. Un buje proporciona una entrada aislada hermética al aceite y hermética para el conductor en el transformador. Por lo general, se compone de un cuerpo de porcelana exterior, y a voltajes más altos, se utiliza aislamiento adicional en forma de aceite y papel enrollado dentro de la columna de porcelana [3].
- 2) Cambiador de Taps: Es un mecanismo que faculta el cambio del nivel de voltaje variando la relación de transformación a través de la adición o sustracción del número de espiras, puede estar ubicado en el lado primario, secundario o en ambos [2], [3].
- 3) Terminales de cobre de A.V y B.V: Sirven como conexión a las bobinas del transformador [2].
- 4) Válvula de muestreo del aceite: Permite la obtención fácil de muestras del aceite contenido en el interior del tanque [2].



- 1) Bujes de A.V y B.V.
- 2) Cambiador de Taps.
- 3) Terminales de cobre para A.V y V.B.
- 4) Válvula de muestreo del aceite.

Figura 1.1. Componentes externos de un transformador [2].

Además de los componentes anteriores, se puede encontrar en transformadores de gran potencia [2]:

- Termómetros.
- Medidor de nivel de aceite.
- Relé Buchholz.
- Tanque de expansión.
- Ventilador.

1.3.1.1 Clasificación de los Transformadores

Los transformadores pueden clasificarse de la siguiente manera [2]:

a) Por su operación:

- Transformadores de distribución: Potencia de 5 a 500 kVA.
- Transformadores de potencia: Potencia mayores a 500 kVA.

b) Por la cantidad de fases:

- Monofásicos: Estos cuentan con un solo devanado de alto y bajo voltaje, se conectan a una línea o fase y al neutro o tierra.
- Trifásicos: Tienen tres devanados de alto y tres de bajo voltaje, se conectan a tres líneas o fases y pueden estar conectados a un neutro o tierra mediante diferentes conexiones o grupos de conexiones.

c) Por su empleo:

- Para generación: Conectado después del generador para elevar el nivel de voltaje y transmitir energía al sistema.
- Para subestación: Se conecta en el extremo de la línea de transmisión generalmente para reducir el nivel de voltaje para subtransmisión.
- Para distribución: Reduce el voltaje de subtransmisión a niveles de consumo.
- Para instrumentación: Se encargan de suministrar corriente y voltaje a los equipos de medición, control y protección. También transforman tanto corriente como voltaje en medidas de lectura.

d) Por el tipo de núcleo:

- Tipo acorazado o concha: El núcleo cubre a los bobinados de alto y bajo voltaje.
- Tipo núcleo en columnas: Los bobinados abrazan en su mayoría al núcleo.

e) Por el sistema de refrigeración:

Debido a las pérdidas originadas en la operación del transformador que son emitidas en forma de calor, se necesita establecer sistemas que favorezcan a enfriar los elementos constitutivos de este, ya que un calentamiento excesivo influye negativamente en la vida útil del transformador. Existen varios sistemas de enfriamiento para transformadores sumergidos en aceite, estos se muestran en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Tipos de refrigeración en transformadores sumergidos en aceite [3].

Denominación	Significado	Función
ONAN	Oil Natural circulation Air Natural circulation	Es el más usado, el aceite circula de forma natural dentro del tanque, o puede tener enfriadores tubulares o radiadores.
ONAF	Oil Natural circulation Air Forced circulation	Sumergidos en aceite y enfriados por aire forzado mediante ventiladores.
OFAF	Oil Forced circulation Air Forced circulation	El enfriamiento es a base de una circulación forzada por los radiadores y ventiladores .
ODAF	Oil Forced circulation Direct Air Forced	El aceite realiza una circulación forzada y dirigida, el aire tiene una circulación forzada a través de los radiadores.
OW	Oil/Water	El enfriamiento es con agua que circula por tubos colocados fuera del tanque
OFWF	Oil Forced circulation Water Forced circulation	El enfriamiento es de aceite forzado con enfriador de agua forzada.

La Tabla 1.2 muestra tipos de refrigeración para transformadores de tipo seco.

Tabla 1.2. Tipos de refrigeración en transformadores de tipo seco [2].

Denominación	Significado	Función
AA	Air/Air	Enfriamiento propio.
AFA	Air/Forced Air	Enfriamiento con aire forzado producido por ventilador.
AA/FA	(Air/Air)/(Forced/Air)	Con enfriamiento propio y por aire forzado con ayuda de ventiladores

f) Por la ubicación:

- Tipo poste
- Tipo pedestal
- Padmounted
- Sumergible

g) Por la condición de servicio:

- Interiores.
- Exteriores.

1.3.2 Pruebas en Transformadores de Distribución.

Los transformadores ejercen un papel importante en la transmisión de la energía eléctrica. Son sometidos a una serie de pruebas tanto en el proceso de fabricación para constatar su calidad y cumplimiento de normas internacionales de diseño, como en su etapa de operación, para tener un registro del estado general del transformador.

La norma IEEE Std. C57.12.90 detalla las pruebas que se aplican a transformadores de distribución sumergidos en aceite [4]. Debido a que en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN no se cuenta con todos los equipos necesarios para realizar en su totalidad los ensayos, a continuación, se resumen las pruebas de rutina que normalmente se realizan bajo norma:

1.3.2.1 Medición de la Resistencia de Aislamiento

Las pruebas de resistencia de aislamiento se realizan para definir la resistencia de aislamiento de bobinados individuales a tierra o entre arrollamientos individuales. La resistencia de aislamiento en tales pruebas se mide comúnmente en megaohmios o puede calcularse a partir de mediciones de voltaje aplicado y corriente de fuga [4].

Mediante un megaóhmetro se mide la resistencia que posee el aislamiento entre bobinados de:

- Alto Voltaje-Bajo Voltaje.
- Alto Voltaje-Tanque.
- Bajo Voltaje-Tanque.

1.3.2.2 Relación de Transformación Medida

Se utiliza un equipo de pruebas de relación de espiras en transformadores (T.T.R) para determinar la relación de transformación. Esta prueba se realiza en cada posición del cambiador de taps [5].

Tolerancia: En el tap principal la tolerancia es el menor de estos dos valores:

$\pm 1/200$ de la relación indicada por el fabricante, o el porcentaje de la relación declarada igual a $1/10$ del voltaje de cortocircuito actual a corriente nominal expresado en porcentaje [4].

1.3.2.3 Prueba de Circuito Abierto

Se realiza con el fin de determinar la corriente de magnetización y las pérdidas en vacío. Se alimenta el lado de baja a voltaje nominal dejando el lado de alto voltaje abierto. Los equipos de medición son conectados en el lado de alimentación.

La pérdida sin carga de un transformador consiste principalmente en la pérdida de hierro en el núcleo del transformador y es una función de la magnitud, frecuencia y forma de onda del voltaje suministrado.

La corriente de excitación de un transformador es la corriente que mantiene la excitación del flujo magnético en el núcleo del transformador y se expresa en porcentaje de la corriente nominal en el lado medido [4].

Se mide la potencia absorbida, la corriente de magnetización y el voltaje de alimentación [4].

1.3.2.4 Prueba de Cortocircuito

Se realiza con la finalidad de obtener las pérdidas en los devanados y verificar la impedancia señalada en la placa de datos del transformador [4].

Se alimenta el lado de alto voltaje con una fuente variable, hasta conseguir en el lado de bajo voltaje en cortocircuito la corriente nominal de placa. Se toman medidas de potencia, voltaje y corriente [4].

La impedancia de voltaje comprende un componente resistivo eficaz correspondiente a las pérdidas de carga, y un componente reactivo correspondiente a los enlaces de fuga de los devanados. No es práctico medir estos componentes por separado, pero después de medir la pérdida de carga total y el voltaje de impedancia total, los componentes se pueden separar mediante ecuaciones matemáticas. La impedancia de voltaje generalmente cae

entre el 3% y el 15% del voltaje nominal del devanado excitado [4] y se expresa como porcentaje del voltaje nominal.

Las pérdidas serán medidas en los devanados conectados en el tap principal [4].

1.3.2.5 Prueba de Voltaje Aplicado

Se realiza para comprobar si todas las partes sometidas a alto voltaje están aisladas suficientemente del lado de bajo voltaje y del tanque. El ensayo se realiza aplicando un cuarto o menos del voltaje establecido y debe subir gradualmente a su valor máximo en no más de 15 s. Después de mantenerse durante 1 minuto, se debe aminorar gradualmente (en no más de 5 s) a un cuarto o menos del valor máximo y se debe abrir el circuito [4].

Se debe prestar mucha atención a la evidencia de posibles fallas que podrían incluir elementos, como una indicación de humo y burbujas que se elevan en el aceite, un sonido audible como un golpe o un aumento repentino en la corriente del circuito de prueba. Cualquier indicación de este tipo debe investigarse cuidadosamente mediante la observación, la repetición de la prueba o mediante otras pruebas para determinar si se ha producido una falla [4].

1.3.2.6 Prueba Dieléctrica del Aceite Aislante

Esta prueba muestra cualitativamente el voltaje de ruptura del aceite, así como su grado de contaminación. Se toma 5 pruebas por muestra, dejando reposar al aceite 1 minuto entre pruebas. Se califica al aceite en buen estado si el voltaje promedio de disrupción medido es igual o mayor a 30 kV [6].

1.3.3 Modelos del Transformador

1.3.3.1 Modelo Ideal del Transformador

Al modelar idealmente un transformador se debe aplicar su principio básico sin ninguna valoración de las características de los materiales utilizados en su construcción, no hay pérdidas ni flujo de dispersión [1]. En otras palabras, se postula lo siguiente:

- a) $r = 0$ La resistencia (r) de cada bobinado es despreciable.
- b) $P_{Fe} = 0$ En el núcleo no se aprecian pérdidas (P_{Fe}) por corrientes parásitas, ni pérdidas por histéresis.
- c) $\mu_{Fe} = \infty$ El núcleo del transformador es sumamente permeable; la permeabilidad del núcleo (μ_{Fe}) tiende a infinito.
- d) $C = 0$ Capacidades (C) parásitas nulas.

Al conectar una fuente de corriente alterna en el bobinado primario, se genera un flujo magnético que rodea a este, entonces este flujo concatenará al bobinado secundario por medio del núcleo de material ferromagnético, induciendo así un voltaje en la bobina secundaria [1], [3]. El esquema del transformador ideal se presenta en la Figura 1.2.

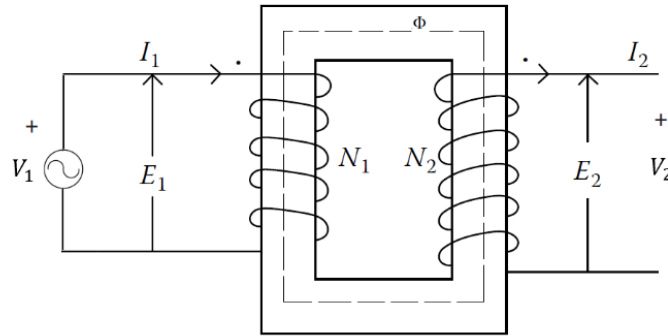


Figura 1.2. Esquema de un transformador ideal.

El transformador mostrado en la Figura 1.2 tiene N_1 vueltas de conductor en el primario y N_2 vueltas de conductor en el secundario. La relación entre el voltaje V_1 suministrado al lado primario del transformador y el voltaje V_2 producido en el lado secundario es [1]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Ecuación 1.1. Relación entre voltajes y números de espiras en un transformador.

Donde a es definido como relación de transformación.

La relación entre la corriente I_1 que circula en el lado primario del transformador y la corriente I_2 que sale por el lado secundario es:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Ecuación 1.2. Relación entre corrientes y números de espiras en un transformador.

Con base a las ecuaciones 1.1 y 1.2 es claro que:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

Ecuación 1.3. Relación entre voltajes y corrientes de un transformador.

La ecuación 1.3 confirma simplemente el supuesto de que no hay pérdidas en un transformador ideal.

1.3.3.2 Modelo Real del Transformador

Al desarrollar el modelo del transformador real se toma como base el modelo ideal y se añaden parámetros relacionados con las propiedades de los materiales como [1]:

- **Resistencia del devanado:** Todo conductor eléctrico se opone a la circulación de electrones a través de la sección de este, a esto se conoce como resistencia eléctrica. La inclusión de la propiedad de resistencia define que [1]:

- a) La potencia de entrada es mayor que la salida (pérdidas en los devanados).
- b) La eficiencia de un transformador real es menor que 100%.

- **Flujos de dispersión:** No todo el flujo que crea un devanado se confina en el núcleo. Una parte del flujo, conocida como flujo de dispersión, se dispersa en el aire, por lo que el flujo de dispersión primario, no enlaza al devanado secundario. De manera similar, el flujo de dispersión secundario se restringe solo a éste. El flujo común que circula en el núcleo y llega a ambos se denomina flujo mutuo [1].

El flujo de dispersión asociado con cualquier devanado es responsable de la caída de voltaje a través de él, por ello se puede representar esta caída de voltaje con una reactancia de dispersión [1], estas propiedades son representadas en la Figura 1.3:

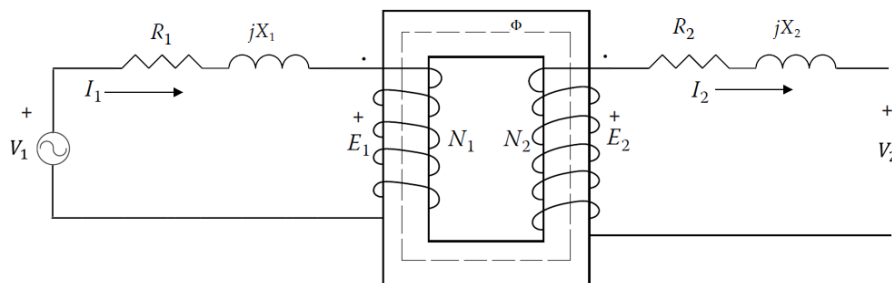


Figura 1.3. Representación de un transformador no ideal con resistencias y reactancias de dispersión.

- **Permeabilidad finita:** El núcleo es fabricado de un material que es conductor eléctrico, al ser no ideal tiene una permeabilidad finita y por ende pérdidas. Por ello, aun cuando se deja abierto el secundario (sin carga), el devanado primario toma de la fuente algo de corriente, conocida como corriente de excitación [1]. Por esta razón al núcleo se lo representa como un arreglo formado por una resistencia y una inductancia, como se muestra en la Figura 1.4.

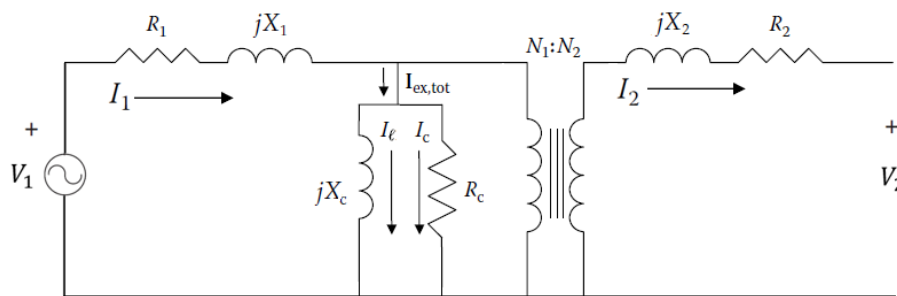


Figura 1.4. Modelo del transformador real o no ideal.

Donde:

- | | |
|---|--|
| R_1 : Resistencia del bobinado primario. | X_C : Reactancia de magnetización. |
| X_1 : Reactancia del bobinado primario. | I_ℓ : Corriente de magnetización del núcleo. |
| R_2 : Resistencia del bobinado secundario. | I_C : Corriente de pérdidas en el núcleo |
| X_2 : Reactancia del bobinado secundario. | $I_{ex,tot}$: Corriente de excitación del núcleo del transformador. |
| R_C : Resistencia equivalente de la pérdida en el núcleo. | |

1.3.3.3 Modelo del Transformador a Frecuencias Altas

En el campo del modelado de transformadores, el enfoque más común son los circuitos o modelos de parámetros concentrados, estos simplifican el análisis de un sistema completo bajo la premisa de que el sistema operará en estado estable con una frecuencia máxima alrededor de los 3 kHz. Pero muchas veces en los sistemas de energía eléctrica se pueden producir transitorios que pueden llegar a frecuencias de hasta 50 MHz [7], como se presenta en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Rango de frecuencia para algunos fenómenos transitorios [7].

Origen del Transitorio	Rango de Frecuencia
Ferro-resonancia en transformadores	0.1 Hz – 1 kHz
Rechazo de carga	0.1 Hz – 3 kHz
Energización de Líneas	50/60 Hz – 20 kHz
Re-cierre de líneas	50/60 Hz – 20 kHz
Falla en líneas	50/60 Hz – 20 kHz
Voltaje transitorio de recuperación	50/60 Hz – 20 kHz
Arco secundario en interruptores	10 kHz – 1 MHz
Descargas atmosféricas	10 kHz – 3 MHz
Fallas en subestaciones encapsuladas GIS	100 kHz – 50 MHz

Para fenómenos transitorios mayores a 3 kHz se utilizan modelos de parámetros más complejos en comparación a los de parámetros concentrados.

Un transformador se aproxima a una colección de elementos de circuito agrupados, como se muestra en la Figura 1.5. Se supone que las inductancias mutuas entre todos los inductores están presentes [8].

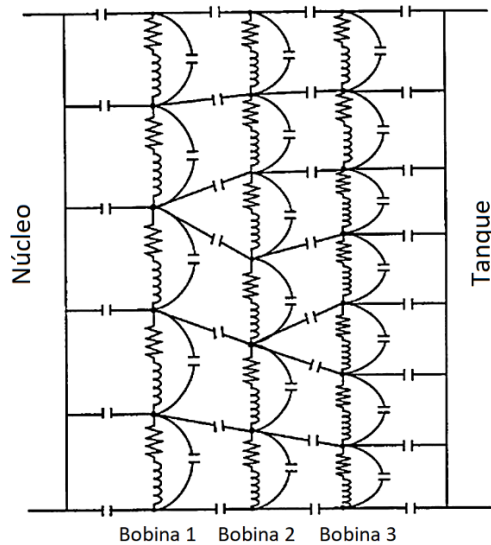


Figura 1.5. Modelo circuital de un transformador para altas frecuencias [8].

1.3.4 Revisión de la Respuesta en Frecuencia en Transformadores

El Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) es un procedimiento común para realizar la evaluación y diagnóstico del estado de los transformadores. Es utilizada a nivel mundial como complemento y apoyo de otras técnicas de diagnóstico. Es especialmente empleada para la detección de posibles problemas mecánicos, tales como desplazamientos o deformaciones en los arrollamientos o chapas del núcleo, las que son muy difíciles de localizar con otros métodos [9].

Su principio básico es considerar al transformador como un modelo de parámetros distribuidos e ingresar a un terminal una señal con un ancho de banda de frecuencia amplio para obtener la respuesta de la red en un terminal distinto, La relación de estas dos señales se denomina función de transferencia, a partir de la cual se pueden obtener las variaciones de magnitud y ángulo de fase en relación con la frecuencia [10].

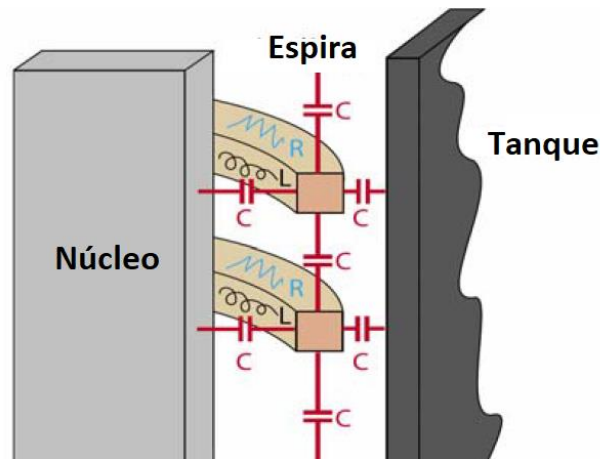


Figura 1.6. Red compleja RLC del transformador.

La respuesta de frecuencia se grafica como una traza con resonancias y antiresonancias en varias frecuencias diferentes. Estas resonancias son producidas debido a la resistencia (R) del devanado, la inductancia (L) de las bobinas de bobinado y la capacidad (C) de las capas de aislamiento entre las bobinas, los devanados, el devanado y el núcleo, el núcleo y el tanque, el tanque y el devanado, etc. En la Figura 1.6. se observa la red compleja RLC en un transformador. Cualquier daño interno en el transformador cambiará esta red RLC [10], [16]. El método FRA se usa para identificar estos pequeños cambios en los parámetros de la red RLC dentro del transformador al examinar la respuesta de frecuencia del transformador [10], ya que generalmente la comparación de trazas es el método principal para el análisis de los resultados FRA, se pueden hacer comparaciones con las líneas de base (pruebas FRA de fábrica) y los datos previos, los resultados de las unidades hermanas o entre fases del mismo transformador [10], [11], [14], [23].

1.3.4.1 Métodos de Análisis de Respuesta en Frecuencia

De acuerdo con la naturaleza de la señal de entrada, existen dos métodos principales de medición: análisis de barrido de frecuencia (SFRA) y análisis de respuesta en frecuencia al impulso (IFRA) [10].

- **Análisis de barrido de frecuencia (SFRA):** En el método de medición SFRA, la señal o entrada de excitación es una señal sinusoidal con una amplitud baja (generalmente en el rango de 1-20 V), que se aplica a un terminal del transformador con un barrido de frecuencia (en el rango de hertz a Megahertz), la función de transferencia (TF) se obtiene de la relación salida / entrada para varias frecuencias [10]. La Figura 1.7 muestra las mismas curvas SFRA en cuatro modos diferentes para la representación de la función de transferencia. Se usan todas las combinaciones de escalas lineal y logarítmica. De acuerdo con el modo de ilustración utilizado se puede lograr diferentes aspectos visuales para la

representación de las curvas. La selección del mejor modo de presentación es esencial, ya que la interpretación generalmente se basa en una evaluación puramente visual de las curvas FRA [11].

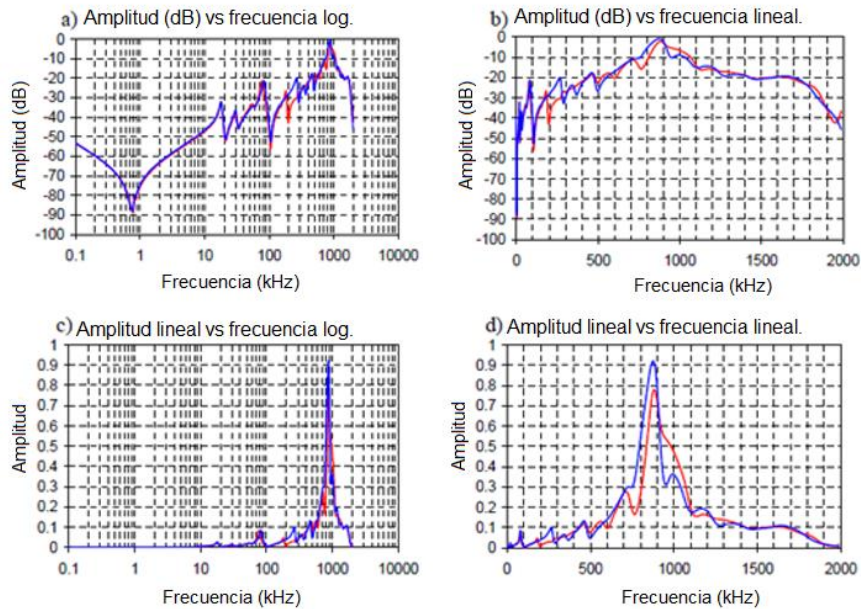


Figura 1.7. Tipos de ilustración de curvas SFRA [11].

El estudio SFRA generalmente se realiza con el transformador descargado y desenergizado, utilizando equipos especializados en este tipo de pruebas. En la Figura 1.8 se muestra un equipo con los accesorios que se utilizan para su realización.



Figura 1.8. Megger FRAX 101 con sus accesorios [29].

- **Análisis de respuesta en frecuencia al Impulso (IFRA):** El método IFRA usa una sola señal no periódica como excitación o entrada, se inyecta en cualquiera de los terminales del transformador disponibles. El valor máximo del impulso de entrada puede alcanzar cientos de voltios y el amplio contenido de frecuencia se asegura adecuadamente mediante la forma de onda del pulso de entrada. Esta excitación provoca voltajes inducidos en los extremos restantes del mismo transformador. Estas señales inducidas dependen de la estructura del transformador y se miden como un resultado interesante para evaluar. El espectro de frecuencia de la señal inyectada (entrada) y la señal medida (salida) se obtienen a través de procedimientos matemáticos, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) [10].

Este método se basa en que un sistema lineal e invariante en el tiempo, tiene una respuesta singular al impulso (Dirac) que depende exclusivamente de las características físicas del sistema [12].

Para tener la respuesta en frecuencia del transformador al impulso se debe obtener la Transformada de Fourier (FFT) de la señal inyectada y de la señal de salida. Finalmente, se obtiene la relación entre los dos espectros de frecuencia conocido como función de transferencia [10] [12] [13].

$$TF = \frac{FFT(Vout)}{FFT(Vin)}$$

Ecuación 1.4. Función de transferencia o respuesta impulsiva en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 1.9 se observa el principio para calcular la función de transferencia.

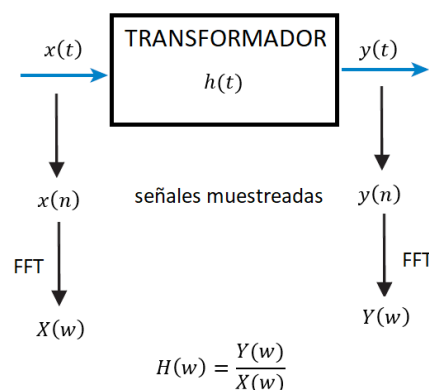


Figura 1.9. Principio de cálculo de la función de transferencia $H(w)$ [13].

Ya que normalmente se miden o muestrean señales de voltaje (entrada) y corriente (salida), los autores suelen graficar la impedancia del sistema en función de la frecuencia $Z(w) = V(w)/I(w)$ [9], [12] o la admitancia del sistema que es la función de transferencia $Y(w) = H(w) = I(w)/V(w)$.

Para representar la función de transferencia mediante el método IFRA se utiliza al igual que en las pruebas SFRA graficas lineales, logarítmicas o una combinación de estas dependiendo de cuál visualice mejor la traza obtenida. En la Figura 1.10 se muestra la respuesta en frecuencia a partir de una señal de impulso.

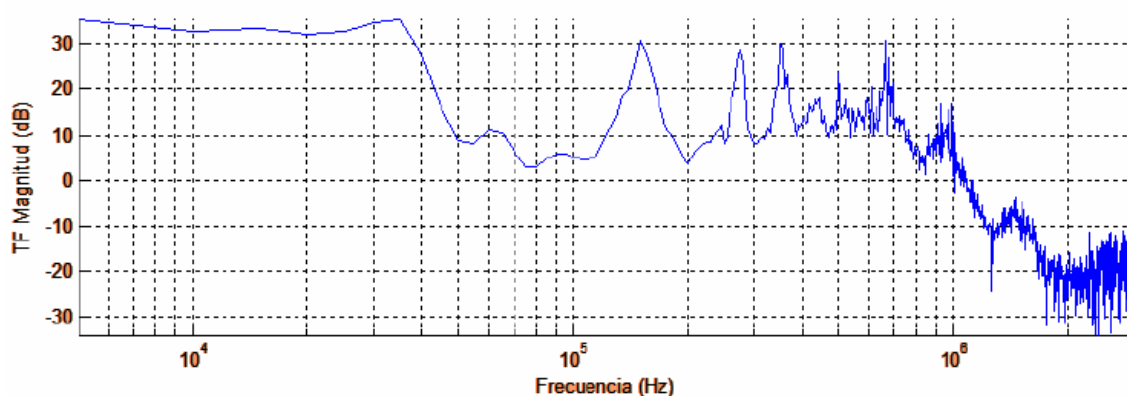


Figura 1.10. Respuesta en frecuencia a partir de señales de voltaje de impulso y corriente de neutro medida. Transformador trifásico, 500 kVA, 15kV/220V [12].

1.3.4.2 Metodología para Mediciones FRA

La base del análisis de FRA es la comparación con mediciones de referencia [14], por lo que tener una referencia en cuanto a conexiones de pruebas facilita la aplicación y repetición de pruebas.

La norma IEEE Std C57.149-2012 detalla las conexiones que se pueden realizar a transformadores (trifásicos y monofásicos) para mediciones FRA [14], esta información se detalla en la Tabla 1.4.

La referencia [11] también presenta las conexiones que se realizan para mediciones FRA, menciona que en distintos casos se aplican resistencias a los terminales flotantes, como se presenta en [23], los autores indican que estos resistores ayudan a suavizar oscilaciones secundarias en los bobinados no excitados y poder aminorar capacitancias parásitas en las terminales de los bushings.

Tabla 1.4. Conexiones para medición de pruebas FRA [14].

Tipo de Prueba	No. Prueba	3ϕ Δ – Y	3ϕ Y – Δ	3ϕ Δ – Δ	3ϕ Y – Y	1ϕ
HV Circuito Abierto (OC)	1	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	3	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
LV Circuito Abierto (OC)	4	X1-X0	X1-X2	X1-X3	X1-X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2-X0	X2-X3	X2-X1	X2-X0	
	6	X3-X0	X3-X1	X3-X2	X3-X0	
Cortocircuito (SC) Corto[X1-X2-X3] ^a	7	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 Corto [X1-X2] ^a
	8	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	9	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
Entredevanado capacitivo	10	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	11	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	12	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	
Entredevanado Inductivo Tierra(H- y X-) ^b	13	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1 Tierra [H2-X2]
	14	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	15	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	

^aIndica que los terminales de prueba están en corto, pero no conectadas a tierra. El neutro no está incluido en conexiones de estrella 3 ϕ , pero puede incluirse para conexiones 1 ϕ .

^bDenota otro extremo del devanado; opuesto a las conexiones de referencia y medida.

2 METODOLOGÍA PROPUESTA

2.1 Transformador Bajo Prueba

El transformador que se utilizará para aplicar la metodología experimental es un transformador trifásico de marca ELIN de 50 kVA sumergido en aceite, este se encontraba abandonado junto al edificio de Ciencias Básicas de la EPN y en un estado externo visualmente deteriorado.

En la Tabla 2.1 se presentan las características tomadas de sus datos de placa.

Tabla 2.1. Datos de placa del transformador bajo prueba.

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO								
Marca		ELIN			Año		1965	
Tipo		OD 51/10			N° serie		1077117	
Frecuencia		60	Hz		Conexión		DY5	
Potencia		50	kVA		Impedancia		3.95	%
Primario					Secundario			
1	6300	V	4.82	A	231.133	V	125.2	A
2	6150							
3	6000							
4	5700							



Figura 2.1. Transformador encontrado junto al edificio de Ciencias Básicas EPN.

En la Figura 2.1 se puede observar al transformador que se utilizará para aplicar la metodología. Se observan marcas de óxido en la parte externa, lo cual evidencia que se ha encontrado a la intemperie durante un largo tiempo.

En la Figura 2.2 se puede observar los bushings del transformador, visualmente tienen un estado aceptable, después de limpiarlos de elementos externos (suciedad, telarañas).

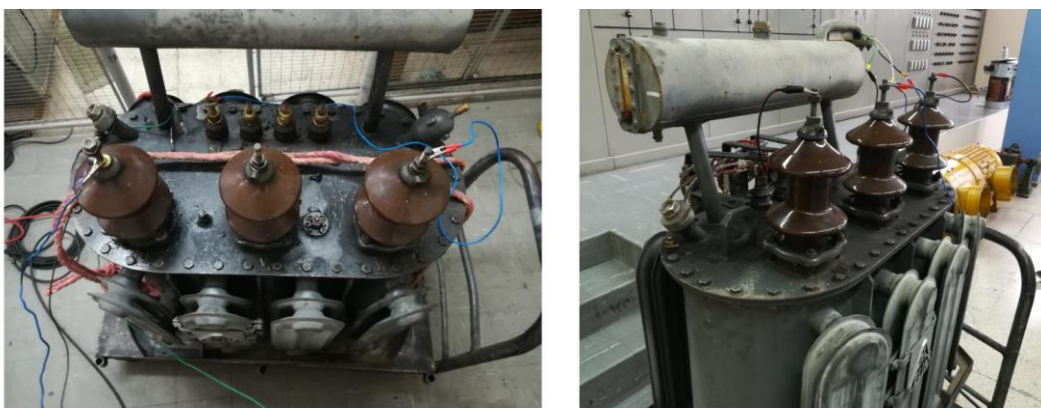


Figura 2.2. Bushings de alto y bajo voltaje.

La metodología que se aplicará al transformador descrito consiste en la aplicación de pruebas de rutina bajo norma en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN, para obtener una idea del estado del aislamiento. Después se realizará el cambio del aceite contenido en el interior de la estructura, realizando así un mantenimiento correctivo del aceite dieléctrico.

Se aplicará impulsos atmosféricos estándar ($1.2/50 \mu s$) para la adquisición de la respuesta en frecuencia del transformador mediante la medición de las señales en el dominio del tiempo con el osciloscopio del laboratorio, después se aplicará la transformada de Fourier a las señales muestreadas para obtener las gráficas en el dominio de la frecuencia de la respuesta del transformador. La respuesta en frecuencia se obtendrá para dos estados representativos del transformador, antes y después del cambio de aceite. Para finalmente analizar y comparar las respuestas en frecuencia obtenidas para cada estado, relacionando los resultados con el aislamiento.

2.2 Pruebas de Rutina

Los procedimientos de pruebas para transformadores sumergidos en aceite se describen en la norma IEEE Std. C57.12.90 [4]; debido a que en el laboratorio de Alto Voltaje de la EPN no se cuenta con todos los equipos necesarios para realizar en su totalidad los ensayos, a continuación, se listan las pruebas de rutina que normalmente se realizan bajo norma en el laboratorio y que fueron descritas en la sección 1.2.

2.2.1 Medición de la Resistencia de Aislamiento.

Objetivo: Determinar si las partes activas del transformador están suficientemente aisladas entre sí, es decir si muestran una resistencia alta, previo a la energización del transformador [4].

Equipo: Megahmetro MEGGER MIT 525



Figura 2.3. Equipo de medición de resistencia de aislamiento Megger MIT525.
Laboratorio de Alto Voltaje EPN.

Con el megaóhmetro se mide la resistencia a un voltaje de 5000 V durante 1 minuto. Esta prueba debe involucrar las siguientes maniobras de conexión [2], [4]:

-Alto Voltaje-Bajo Voltaje.

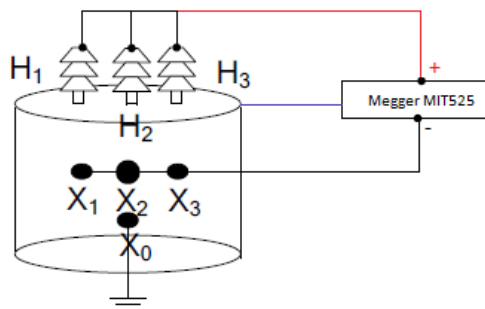


Figura 2.4. Diagrama de conexión medición de aislamiento A.V-B.V.

-Alto Voltaje-Tanque.

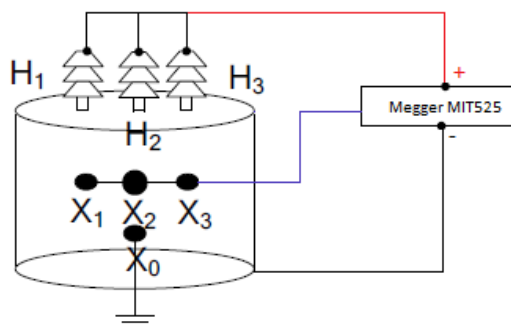


Figura 2.5. Diagrama de conexión medición de aislamiento A.V-T.

-Bajo Voltaje-Tanque.

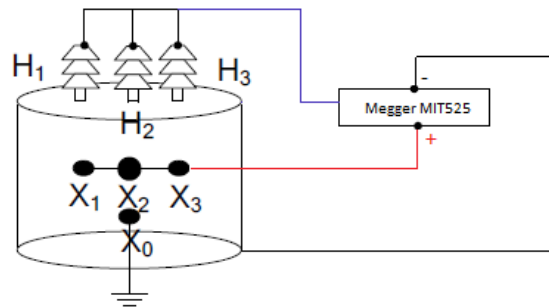


Figura 2.6. Diagrama de conexión medición de aislamiento B.V-T.

2.2.2 Relación de Transformación Medida.

Objetivo: Constatar los datos de placa del transformador en relación al voltaje [2], [4].

Equipo: TTR AEMC 8500.



Figura 2.7. Equipo de medición de relación de transformación AEMC 8500. Laboratorio de Alto Voltaje EPN.

Se debe tomar alternando cada fase en el lado de alto y bajo voltaje y en cada posición de tap si se tiene [4], [5].

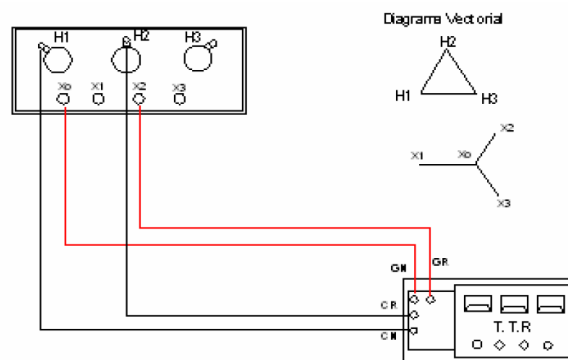


Figura 2.8. Conexión para la prueba de relación de transformación. Delta-Estrella [5].

2.2.3 Prueba de Circuito Abierto

Objetivo: Definir la corriente de magnetización y pérdidas en vacío [4], [5].

Equipo: Fuente de voltaje variable de 60 Hz, Registrador Trifásico Fluke 1735.



Figura 2.9. Analizador Trifásico Fluke 1735. Laboratorio de Alto Voltaje EPN.

Con el circuito primario abierto se alimenta por el secundario a voltaje nominal a 60 Hz, mediante el analizador se registra los valores de: voltaje línea a línea, corrientes de línea y potencias [4], [5].

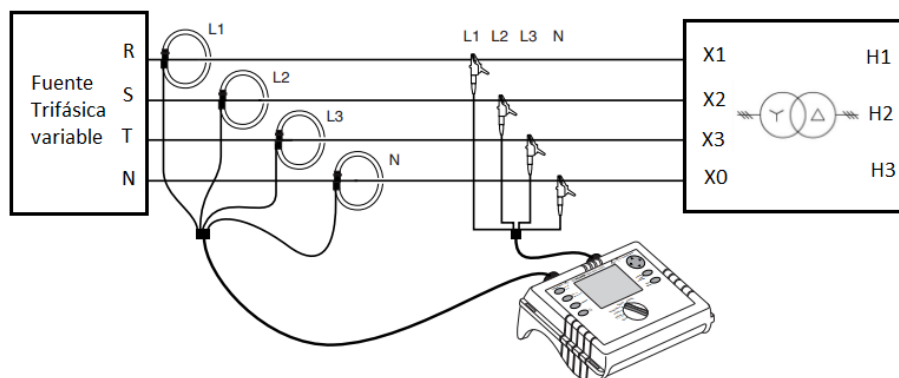


Figura 2.10. Conexión: Prueba de circuito abierto registrador Fluke 1735.

2.2.4 Prueba de Cortocircuito

Objetivo: Determinación de las pérdidas en los devanados y verificación de la impedancia señalada en la placa [4], [5].

Equipo: Fuente de voltaje variable de 60 Hz, Registrador Trifásico Fluke 1735, Pinza amperimétrica Fluke 376.

Se debe alimentar el primario con un voltaje variable de 60 Hz hasta alcanzar en el lado secundario, en cortocircuito, el 25% o 100% de la corriente nominal. Se toman mediciones de potencia, voltaje y corriente [4].

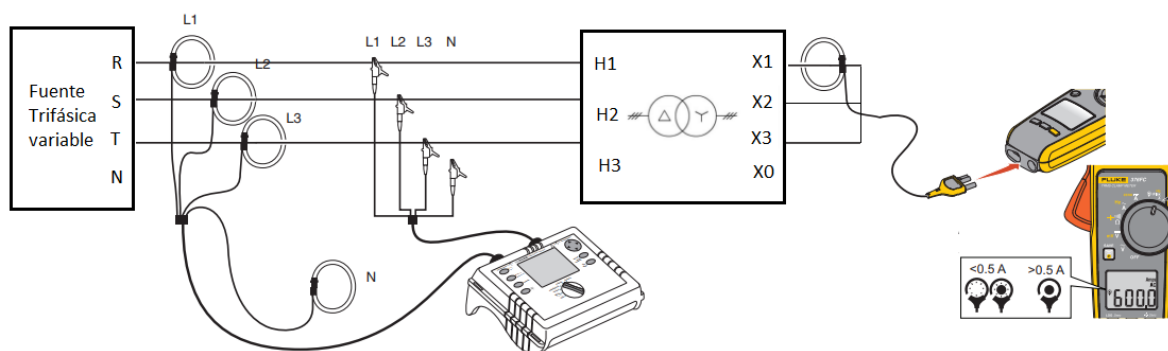


Figura 2.11. Conexión: Prueba de cortocircuito registrador Fluke 1735 y pinza Fluke 376.

2.2.5 Prueba de Voltaje Aplicado

Objetivo: Constatar si todas las partes sometidas a alto voltaje están aisladas suficientemente del lado de bajo voltaje [4], [5].

Equipo: Fuente de alto voltaje variable de 60 Hz, aparatos de medición.

Tiempo de aplicación: 1 minuto

Para el terminal de alto voltaje se hace un puente entre sus fases, así mismo se realiza un puente entre los terminales de bajo voltaje y se aterriza.

2.2.6 Prueba Dieléctrica del Aceite Aislante.

Objetivo: Verificar la bondad del dieléctrico [4], [5], [6].

Equipo: Probador de aceite, Fuente de voltaje variable de 60 Hz, aparatos de medida.

NORMA A.S.T.M. (29-D-877) [6]:

Electrodos: Discos $\varnothing 1''$.

Separación: 0.1".

Régimen de elevación de voltaje: 3 kV/seg. Hasta perforación.

Número de pruebas por muestra: 5

Período de tiempo entre pruebas: 1 minuto

Criterio o principio de bondad del dieléctrico: Se establece que el aceite está en buen estado si su voltaje promedio de disrupción es igual o mayor a 30 kV.

Las pruebas de rutina permiten tener una idea del estado interno del transformador, en especial las pruebas de: resistencia de aislamiento, voltaje aplicado y prueba de aceite, que son destinadas para evaluar el aislamiento del transformador y que es de interés en el objetivo de este proyecto.

2.3 Mantenimiento Correctivo

Con el fin de revitalizar al transformador cuando sus propiedades físico-electro-químicas se encuentran degradadas, se realiza la regeneración o el cambio del aceite aislante [3], [5].

Las actividades propuestas para el cambio de aceite son:

- Suministro de aceite mineral.

El aceite suministrado fue adquirido en la empresa ECUATRAN S.A, este es un aceite dieléctrico mineral inhibido del tipo II. La ficha técnica se adjunta en el ANEXO I.

- Desenergización del transformador.
- Revisión y lavado exterior del tanque, gargantas, radiadores, boquillas, indicador de nivel, etc.
- Pruebas preliminares dieléctricas (medición de la resistencia de aislamiento y prueba dieléctrica del aceite a cambiar).



Figura 2.12. Muestra de aceite del transformador bajo prueba.

En la Figura 2.12 se observa una muestra obtenida del dieléctrico interno del transformador bajo prueba, se observa el contenido de impurezas, también indicios de humedad en el aceite.

- Extracción del aceite del transformador.



Figura 2.13. Extracción del aceite del transformador bajo prueba.

La Figura 2.13 muestra el proceso de vaciado de aceite del transformador, se observa que en el fondo del tanque se acumulan diferentes impurezas, lo cual afectaría notablemente el aislamiento.

- Inspección interna (núcleo, bobinados) y ajuste de tornillería en general.



Figura 2.14. Conjunto núcleo-bobinado del transformador bajo prueba.

Se realizó una inspección interna visual del transformador. La Figura 2.14 muestra los bobinados y demás componentes. El tipo de núcleo del transformador es de tipo laminado en columnas y tanto este y los devanados mostraron un aspecto aceptable, es decir, no se encontró daños en su integridad visualmente.

- Secado del conjunto núcleo-bobinas.

Para realizar el secado del conjunto se realizó un conexión similar a la prueba de cortocircuito, es decir se alimenta por el lado de alto voltaje con fuente variable hasta alcanzar una corriente cercana a la nominal en el cortocircuito realizado en el lado de bajo voltaje, midiendo la temperatura en los bobinados.

- Lavado del tanque del transformador con el nuevo aceite mineral.



Figura 2.15. Lavado del tanque y limpieza de impurezas sobrantes.

Se lavó el interior del tanque con el nuevo aceite dieléctrico, para limpiar excedentes del anterior aceite y crear una capa nueva de dieléctrico en las paredes internas antes del llenado.

Se lavó también el interior del tanque de expansión del transformador.

- Lavado del conjunto núcleo-bobinas con el nuevo aceite mineral.



Figura 2.16. Lavado del conjunto núcleo-bobinas.

De igual manera que el tanque, se lavaron las bobinas y el núcleo para limpiar residuos y excedentes del aceite deteriorado que pueda presentarse.

- Inyección del aceite nuevo al transformador.
- Revisión del nivel de aceite.



Figura 2.17. Llenado y verificación de nivel de aceite.

Se llenó el aceite mediante una bomba manual inyectando el aceite a través de una manguera al tanque de expansión del transformador, verificando el nivel correcto para su posterior reposo.

- Pruebas dieléctricas posteriores al cambio (medición de la resistencia de aislamiento y prueba dieléctrica del aceite).

Se realizan las pruebas dieléctricas para comprobar el cambio del aceite dieléctrico.

2.4 Generación de Impulsos Atmosféricos

La descarga de los rayos atmosféricos en las líneas de transmisión en un sistema eléctrico o sus proximidades originan sobrevoltajes que viajan por las líneas como ondas transitorias, la magnitud de estos puede llegar a los miles de kilovoltios.

Una ardua investigación y la experiencia exponen que los sobrevoltajes ocasionados por las descargas atmosféricas se caracterizan por poseer un frente de onda de corto tiempo (0.1 μ s-ms) y que luego decrecen lentamente hasta cero [20].

Una onda de impulso atmosférico estándar que simula un sobrevoltaje de esta naturaleza es una señal aperiódica que adquiere su valor pico en 1.2 μ s y aminora lentamente a la mitad de su valor pico alrededor de los 50 μ s. Esta onda normalizada se detalla en la norma IEC 60060-1 “High-voltage test techniques”, donde se establece a detalle su traza y tolerancias [20].

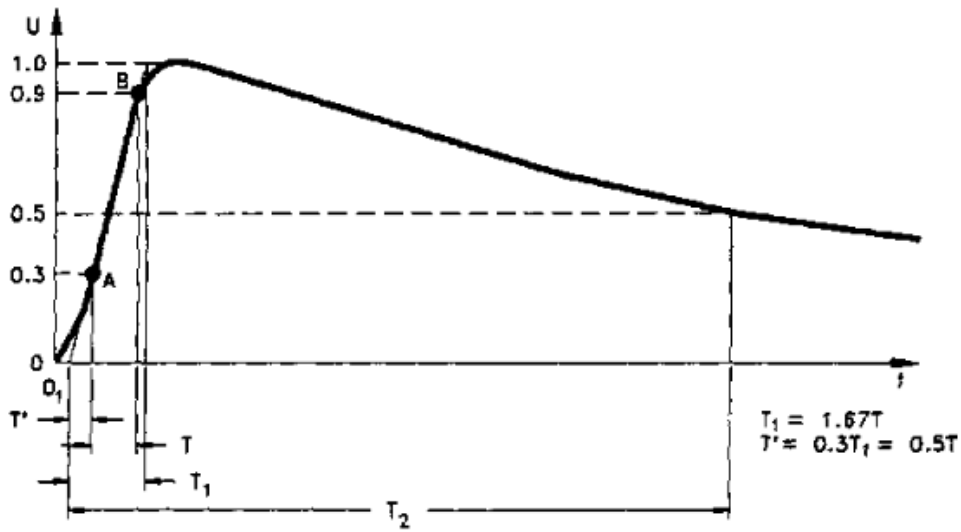


Figura 2.18. Onda normalizada de impulso atmosférico según IEC60-1 [21].

Para la generación de este tipo de impulso, el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN tiene un “Kit de Construcción de Alto Voltaje” [20], este se conforma por:

- Transformador elevador TGZ de 220V / 100 kV. 60 Hz. Potencia máxima de salida 5 kVA.
- Elementos pasivos que a partir del alto voltaje y mediante configuraciones de estos se puede obtener alto voltaje DC y de impulso [20] como se observa en la Figura 2.19.

En la tabla 2.2 se puede ver un listado y las características de estos.

Tabla 2.2. Elementos pasivos del Kit Alto Voltaje [20].

Cantidad	Símbolo	Denominación	Características
4	GS	Rectificadores de Selenio	140 kV - 5 mA- 500 kΩ
3	CS	Capacitor de choque	140 kV – 6000 pF
3	CB	Capacitor de carga y de medida para voltajes de impulso	140 kV – 1200 pF
1	CM	Capacitor de medida	100 kV – 100 pF
2	RD	Resistencia de amortiguamiento	140 kV - 416 kΩ - 60 W
2	RE	Resistencia de descarga	140 kV - 9500 kΩ - 60 W
1	RL	Resistencia de carga	140 kV - 10 MΩ - 60 W
2	RL	Resistencia de carga	140 kV - 50 kΩ - 125 W
2	RM	Resistencia de medida	140 kV - 140 MΩ

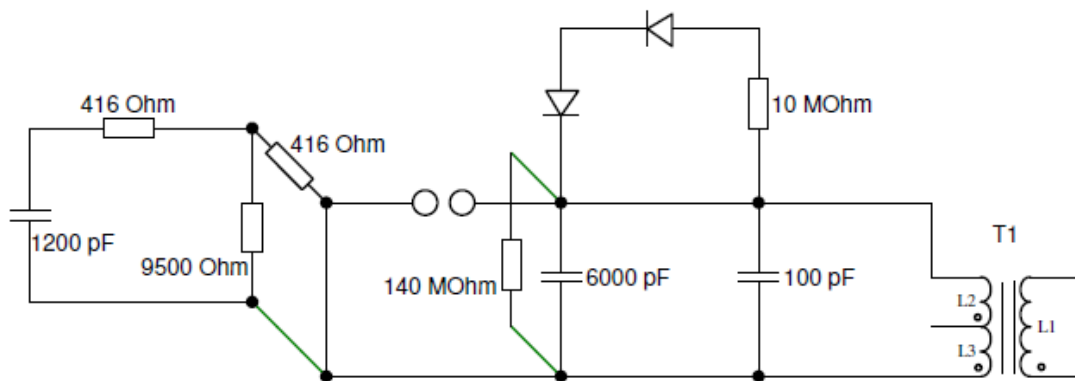


Figura 2.19 Esquema básico generador de impulsos modular. Laboratorio de Alto Voltaje EPN.



Figura 2.20 Generador de impulsos modular. Laboratorio de Alto Voltaje EPN.

2.5 Medición y Obtención de la Respuesta en Frecuencia

Una prueba de impulso en transformadores tiene como objetivo evaluar el aislamiento de este ante sobrevoltajes de tipo impulso, llamado nivel básico de aislamiento al impulso tipo rayo (BIL).

La forma como se administra depende del caso para el cual se aplica. En resumen, se puede decir que se aplican ondas de impulso a voltaje reducido (50 %-70% BIL) y ondas a voltaje pleno (BIL) [4] [12].

Como se mencionó en la sección 1.3, un estudio de respuesta en frecuencia se puede realizar mediante dos métodos, inyección de una onda senoidal a diferentes frecuencias (barrido de frecuencia), o la inyección de una onda no periódica de un determinado ancho de banda (respuesta al impulso) que excite al sistema (transformador).

En el caso de este estudio, la excitación corresponde a un impulso atmosférico estándar de cresta entre los 25 kV y 50 kV con una estimación aproximada del ancho de banda del

impulso de 300 kHz; se puede definir el ancho de banda BW según el tiempo de subida T_r de la onda, mediante la ecuación $BW = 0.35 / T_r$ [22].

2.5.1 Conexiones para Medición FRA

La aplicación del impulso se realiza de igual manera que un estudio FRA y mediante conexiones que generalmente se aplican a transformadores sumergidos en aceite como se mencionan en la Tabla 1.4, estas consisten en:

- **Medición de circuito abierto:** Se realiza una medición de circuito abierto desde el final de un devanado a otro con todos los demás terminales flotando. La prueba de circuito abierto se puede aplicar a transformadores monofásicos y trifásicos. Se realiza en el lado de alto y bajo voltaje.

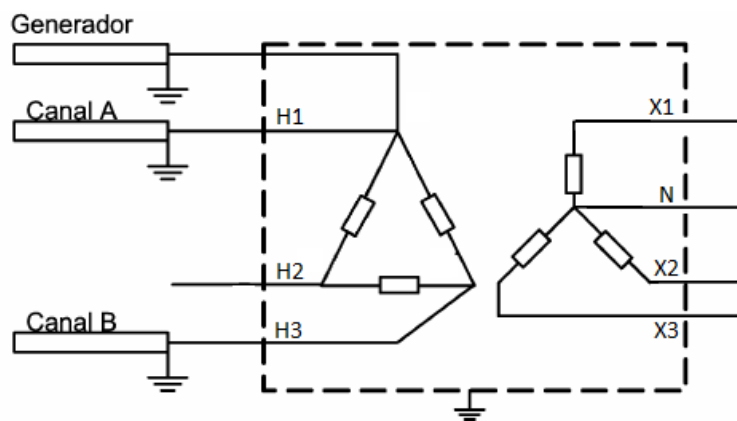


Figura 2.21. Conexión medición de circuito abierto [23].

- **Medición de cortocircuito:** La medición de cortocircuito se realiza desde el final de un devanado de alto voltaje a otro, mientras que el devanado de bajo voltaje asociado está cortocircuitado [14].

Para fines de repetitividad, se recomienda realizar un cortocircuito trifásico en los devanados de bajo voltaje para crear un modelo de cortocircuito de tres fases equivalente. Esto garantiza que las tres fases de alto voltaje tengan un cortocircuito similar para proporcionar una impedancia uniforme. Las conexiones neutrales disponibles no deben incluirse en el proceso de cortocircuito [14].

La figura 2.22 representa la conexión recomendada para crear un modelo de cortocircuito equivalente en la medición de la respuesta de cada fase de alto voltaje, se observa que no se incluye el terminal de neutro en el cortocircuito.

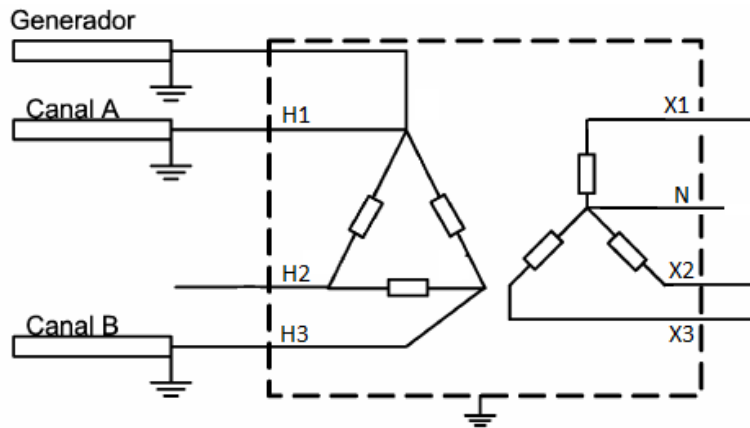


Figura 2.22. Conexión medición de cortocircuito.

- **Medición de entrelazado capacitivo:** Se realiza entre dos devanados aislados eléctricamente. Se realiza una medición capacitiva de entredevanados desde un extremo de un devanado y se mide la señal a través de uno de los terminales de otro devanado, con todos los demás terminales flotando [14].

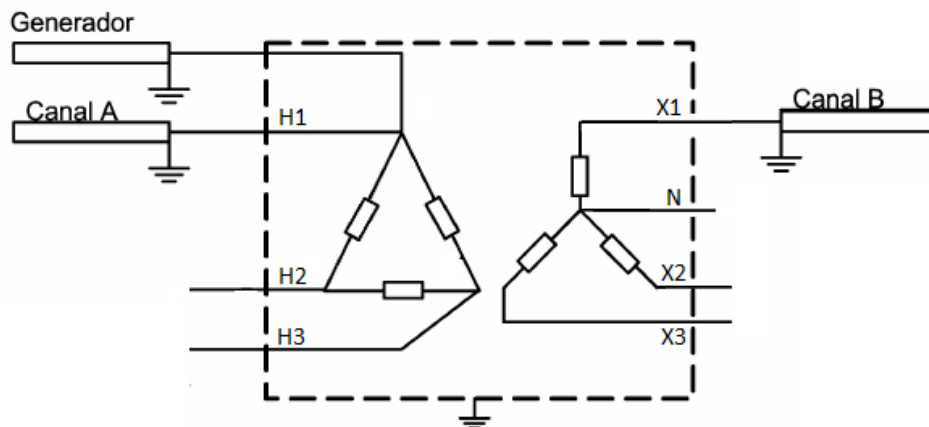


Figura 2.23. Conexión medición de entrelazado capacitivo.

- **Medición de entrelazado inductivo:** La medición inductiva, también conocida como medición del voltaje transferido, se realiza entre dos devanados con un extremo de cada devanado conectado a tierra. Todos los demás terminales de bobinado que no se prueben deben permanecer flotantes [14].

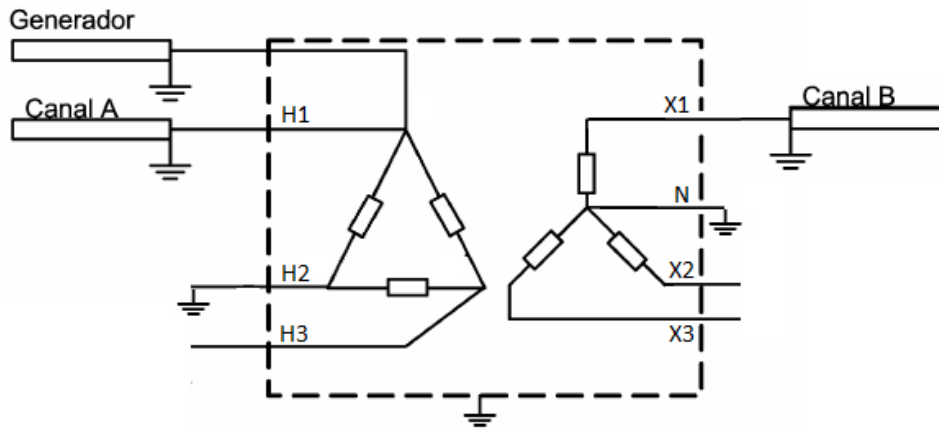


Figura 2.24. Conexión medición de entrelazado inductivo.

2.5.2 Digitalización de Datos

El Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN cuenta con un osciloscopio Tektronix TDS 1012B que se observa en la Figura 2.25 y es usado para capturar las señales en el dominio del tiempo. Las características de este equipo son:

- Ancho de banda máxima 100 MHz.
- Velocidad de muestreo 1GS/s.
- Longitud de registro: 2500 puntos.
- 2 canales.
- Entrada USB para almacenamiento de datos.
- Resolución vertical: 8 bits

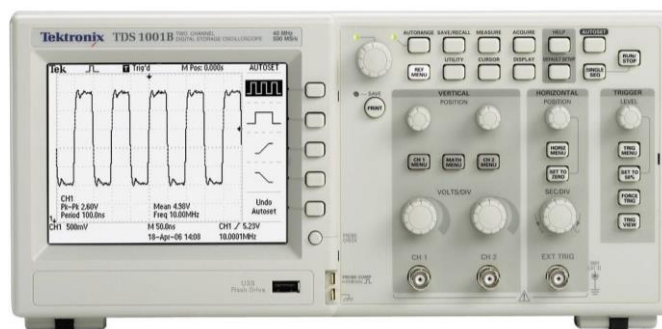


Figura 2.25. Osciloscopio Tektronix TDS 1012B.

Para la medición del impulso inyectado se recurre a la combinación de un divisor capacitivo que está conformado por el capacitor de medida CB de 1200 pF del Kit de Alto Voltaje del laboratorio y un capacitor de 487.3 nF en serie con una resistencia de 150 Ohms. La relación de este divisor es 407.08 debido a que la señal necesita una reducción para

conectarlo al osciloscopio, sin que el impulso afecte la integridad de este ya que se manejan valores de entre 25 kV y 50 kV.

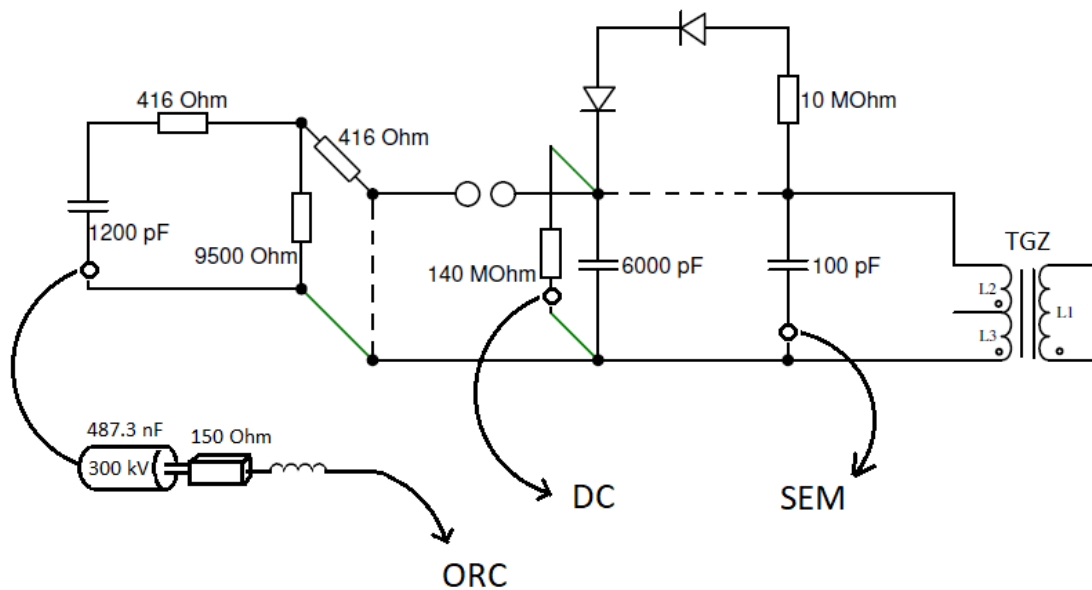


Figura 2.26. Generador de impulsos con elementos de medición. Laboratorio de Alto Voltaje.

En la figura 2.26 se presenta el circuito generador impulsos formado a partir de elementos pasivos del Kit de Alto Voltaje, en la figura se detalla:

- Elementos activos: Transformador elevador TGZ 220 V /100 kV. 60 Hz.
- Elementos pasivos: resistencias, rectificadores y capacitancias.
- ORC: Conexión al osciloscopio de rayos catódicos para medición del voltaje de impulso atmosférico estándar 1.2/50 μ s mediante divisor capacitivo.
- DC: Kilovoltímetro de corriente directa.
- SEM: Kilovoltímetro de corriente alterna.

La medición del voltaje de impulso de entrada se realiza en el canal 1 del osciloscopio del laboratorio mientras que la señal de salida se mide en el canal 2 mediante una resistencia que se conectada en paralelo de 265.25 Ω para obtener la onda de intensidad de corriente. Un esquema básico de la medición de las señales en el dominio del tiempo se presenta en la figura 2.27.

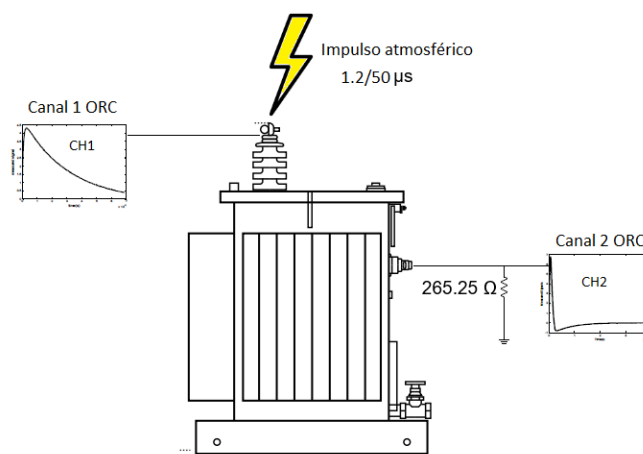


Figura 2.27. Esquema básico de medición de las señales en tiempo.

Para la medición de las señales se configura al Osciloscopio Tektronix en la máxima tasa de muestreo, aunque en la práctica la adquisición de la señal será determinada por el barrido de la ventana.

El osciloscopio permite guardar los datos de los canales 1 y 2 en formato .CSV mediante su puerto externo con lo cual se puede trasladar los datos para su procesamiento y obtención de la respuesta en frecuencia.

2.5.3 Obtención de la Respuesta en Frecuencia

La obtención de la respuesta en frecuencia se realiza a través de la Transformada de Fourier. En la Figura 2.28 se ilustra la metodología. Si se tiene un sistema con respuesta al impulso $h(t)$, entrada $x(t)$ y salida $y(t)$, su entrada y salida se relacionan por la integral de convolución [24].



Figura 2.28 Representación de un transformador como un sistema.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau = y(t) = h(t)*x(t)$$

Ecuación 2.1. Integral de convolución.

En la ecuación 2.1 se presenta la convolución que es una herramienta para el análisis de sistemas en el dominio del tiempo. Debido a que la convolución en el dominio de la

frecuencia corresponde con la multiplicación, la relación entre la entrada y salida del sistema viene dada por la ecuación 2.2.

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$$

Ecuación 2.2. Relación entrada salida en el dominio de la frecuencia.

Como se puede deducir de la ecuación 2.2, si se tiene las señales de entrada y salida de un sistema en el dominio del tiempo y se transforman al dominio de la frecuencia, se puede obtener la función de transferencia del sistema de una manera más sencilla que en el dominio del tiempo, con lo cual se obtiene también la respuesta en frecuencia del sistema.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$

Ecuación 2.3. Respuesta en frecuencia de un sistema [10] [12] [13].

Para el caso de este estudio, las señales que se muestrean son el voltaje de impulso (entrada) aplicado en un terminal determinado e intensidad de corriente medida (salida) en un distinto terminal durante la aplicación del impulso, el cociente entre sus respectivas Transformadas de Fourier es la respuesta en frecuencia del transformador $H(\omega) = I_{out}(\omega)/V_{in}(\omega)$.

Ya que al muestrear las señales se obtiene vectores discretos, se utiliza el programa computacional MATLAB que cuenta con la rutina de la Transformada rápida de Fourier *fft* para la obtención de la transformada de Fourier de las señales muestreadas.

Sintaxis: $Y = fft(X)$, Calcula la transformada discreta de Fourier (DFT) de X utilizando un algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT) [25].

$$Y(k) = \sum_{n=1}^N x(n)e^{(-2\pi i)(k-1)(n-1)/N} , 1 \leq k \leq N$$

Ecuación 2.4. Algoritmo DFT predefinido en MATLAB [25] [26].

La ecuación 2.4 representa el algoritmo para obtener la transformada discreta de Fourier donde:

N: Número de muestras

n: n-ésima muestra original

k:k-ésimo término de la transformada

La anterior ecuación considera ejecutar un gran número de operaciones, pues para obtener N componentes en frecuencias de N muestras, se necesita realizar N^2 multiplicaciones complejas, siendo un algoritmo ineficiente en cuanto al tiempo de computación [26].

Para dar solución, surge la FFT que obtiene el mismo resultado que la DFT, pero solo con $N \cdot \log_2 N$ multiplicaciones complejas, este algoritmo introduce “atajos” matemáticos para aminorar drásticamente el número de operaciones [26].

2.5.4 Resolución en el Dominio de la Frecuencia (Zero Padding)

La resolución de la respuesta en frecuencia es función del número de puntos del muestreo realizado y de la tasa de muestreo utilizada, esto limita el nivel de detalle que se puede obtener en dicha respuesta. Ya que la tasa de muestreo y el número de puntos registrados están limitados, para mejorar la resolución de la respuesta en frecuencia algunos autores recomiendan el uso de ceros añadidos a las señales de voltaje y corriente, este proceso se conoce por su nombre en inglés “Zero padding” [24].

Zero padding, como su nombre lo indica, significa agregar una cadena de ceros a los datos y es una técnica asociada a las FFTs. Un uso muy común de este proceso es ampliar los datos de series de tiempo para que el número de muestras se convierta en una potencia de dos, haciendo que el proceso de conversión sea más eficiente o, con algún software, simplemente posible. Debido a que el espaciado de datos en el dominio de frecuencia es inversamente proporcional al número de muestras en el dominio de tiempo, aumentando el número de muestras, incluso si sus valores son cero, el espectro de frecuencia resultante contendrá más puntos de datos para el mismo rango de frecuencia [27].

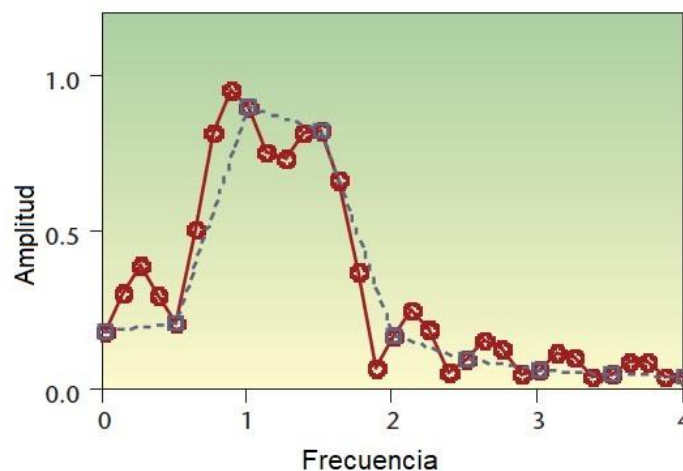


Figura 2.29 Efecto de mejorar la resolución y detalle aplicando “zero padding” [27].

En la rutina *fft* de Matlab se puede especificar el número n de puntos de la transformada mediante la sintaxis $Y = \text{fft}(X, n)$, si no se especifica, el número de puntos será igual al del vector original, es decir Y tendrá la misma longitud que X [25].

El tiempo de ejecución para *fft* depende de la longitud del vector X . El tiempo es menor para potencias de dos, por lo que para utilizar la función *fft* para transformar la señal en el dominio de la frecuencia, en primer lugar, se identifica una nueva longitud de entrada siendo la siguiente potencia de 2 de la longitud de la señal original. Esto rellenará la señal X con ceros finales para mejorar el rendimiento de *fft* [25].

2.5.5 Coherencia

El problema del ruido impuesto sobre las cantidades medidas ha sido extensamente estudiado en varios campos, y los métodos de procesamiento de señal exitosos para evaluar la influencia del ruido. La función coherencia posibilita establecer un límite de frecuencia, que se puede considerar veraz a la respuesta obtenida, antes de ser afectado por ruido [24].

La función coherencia se deriva de todos los registros de dominio de tiempo utilizados en el cálculo de la función de transferencia. Suponiendo un comportamiento lineal del sistema examinado, y un sistema de medición ideal sin ruido, la coherencia debe ser igual a la unidad en toda la banda de frecuencia analizada. Esta se calcula entre diferentes impulsos como un promedio, con la siguiente ecuación.

$$Cf = \frac{|G_{xy}|^2}{G_{xx}G_{yy}}$$

Ecuación 2.5. Función coherencia [24].

En la ecuación 3.5 se muestra el cálculo de la función coherencia, donde:

G_{xy} : Densidad cruzada de potencia espectral de las dos señales a comparar.

G_{xx} y G_{yy} : Densidad espectral de cada señal.

Estas densidades son promediadas según el número de mediciones realizadas y se obtienen mediante las transformadas en el dominio de la frecuencia de las señales medidas:

$$G_{xx} = X(k)^* X(k)$$

Ecuación 2.6. Densidad espectral de la señal de entrada $x(t)$.

$$G_{yy} = Y(k)*Y(k)$$

Ecuación 2.7. Densidad espectral de la señal de salida $y(t)$.

$$G_{xy} = X(k)*Y(k)$$

Ecuación 2.8. Densidad cruzada de potencia espectral.

Siendo $X(k)$ y $Y(k)$ las transformadas en el dominio de la frecuencia de las señales de entrada y salida respectivamente.

2.6 Evaluación del Aislamiento del Transformador a Partir de FRA

Evaluar la condición del aislamiento de papel-aceite de un transformador de potencia es una práctica importante para determinar su fiabilidad. Hay tres métodos notables para medir la respuesta dieléctrica del transformador, concretamente la espectroscopía en dominio de frecuencia (FDS), la polarización y la corriente de despolarización (PDC) y la medición del voltaje de retorno (RVM). El parámetro más importante a considerar aquí es el contenido de humedad debido a su efecto perjudicial sobre las condiciones de aislamiento [15]. Por otro lado, el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) es un método completamente diferente, utilizado deliberadamente para evaluar la condición mecánica del transformador. Sin embargo, diferentes autores han investigado acerca de la sensibilidad de la medición FRA con respecto a la condición del aislamiento en transformadores [11], [15], considerando factores como: contenido de humedad, temperatura o presencia de aceite.

Las mediciones FRA se pueden considerar como “huella dactilar” de las condiciones dieléctricas y mecánicas del transformador. Si se producen cambios en el dieléctrico interno del transformador por cualquier motivo, las curvas se cambiarán de forma correspondiente [16].

La base del análisis de FRA es la comparación con mediciones de referencia; si hay disponibles medidas de referencia, se recomienda necesariamente repetir esas mediciones exactamente como se configuraron las conexiones de medida [14]. Cuando no se cuenta con registros homólogos de referencia se puede analizar con los registros de fases pertenecientes a la misma unidad y mismo nivel de voltaje, basándose en la similitud que debe existir entre las respuestas. Sin embargo, debido a la estructura propia de los transformadores, existen diferencias implícitas entre las fases [23].

2.6.1 Efecto de la Condición del Aislamiento en Parámetros Eléctricos

Varias capacitancias se distribuyen dentro del devanado, a saber, la capacitancia entre vueltas, capacitancia entre discos, capacitancia entre devanados, y capacitancia a tierra. La capacitancia varía de acuerdo con las condiciones de aislamiento del papel-aceite. Esto se debe a que la permitividad relativa compleja ε_r del papel-aceite depende del contenido de humedad y la temperatura [15].

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$$

Ecuación 2.9. Permitividad relativa compleja de un material [17].

Donde:

ε_r' : Es la parte real de la permitividad relativa compleja.

ε_r'' : Es la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja.

La relación entre la capacitancia compleja \tilde{C} de un material con la permitividad relativa ε_r se presenta en la ecuación 2.10.

$$\tilde{C}(\omega) = C' - jC'' = C_0\{\varepsilon_r'(\omega) - j[\varepsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0\omega]\}$$

Ecuación 2.10. Capacitancia compleja de un material [17].

Donde:

C' : Es la parte real de la capacitancia compleja.

C'' : Es la parte imaginaria de la capacitancia compleja.

C_0 : Capacitancia geométrica o del vacío.

σ_0 : Conductividad DC del material.

ε_0 : Permitividad del vacío.

En el caso de la inductancia de bobinado, no se verá afectada por el contenido de humedad en el sistema de aislamiento. Sin embargo, la inductancia está sujeta a cambios de temperatura en el bobinado. Esto se debe a que la permeabilidad de un material magnético depende de la temperatura [15].

Desde la perspectiva de FRA, una combinación paralela de inductancia y capacitancia produce antiresonancia (mínimo local) como se muestra en la Figura 2.30. Dado que la capacitancia compleja se compone de componentes reales e imaginarios, cada componente tiene su propia influencia sobre la antiresonancia [15].

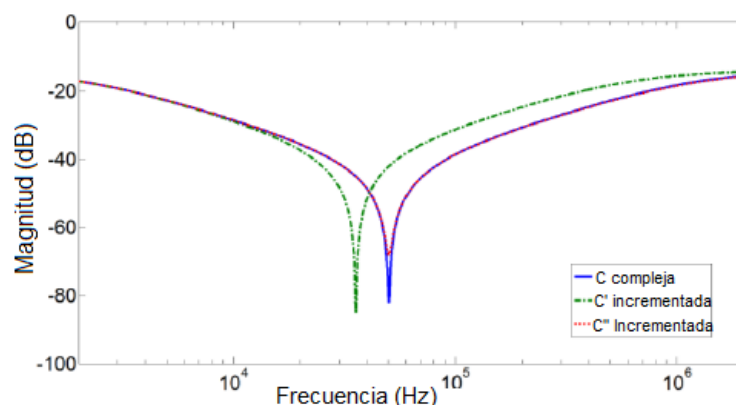


Figura 2.30. Respuesta en frecuencia de un circuito RLC basado en tres diferentes valores de capacitancia compleja [15].

En la figura 2.30 se presenta la simulación de tres valores diferentes de capacitancia compleja. Al cambiar solamente (multiplicado por 2) la capacitancia real, C' , la frecuencia de antiresonancia se altera. Por otro lado, al cambiar (multiplicado por 5) la capacitancia imaginaria, C'' , altera la ganancia en la antiresonancia. Esto ilustra claramente el efecto de estos parámetros en la resonancia [15].

En [15] el autor propone dos metodologías basadas en mediciones FRA para la evaluación del aislamiento. El primero es el método de usar el porcentaje de cambio de capacitancia para evaluar el estado del aislamiento y el segundo es el cálculo de la capacitancia entre devanados a partir de la respuesta de FRA medida.

2.6.2 Porcentaje de Cambio de Capacitancia

Los cambios de capacitancia se pueden calcular a partir de las mediciones FRA del transformador. Esto se puede explicar con la ecuación de la frecuencia de resonancia de un circuito LC paralelo [15].

$$f = 1/(2 \pi \sqrt{LC})$$

Ecuación 2.11. Frecuencia de resonancia circuito LC [18].

Suponiendo que la inductancia se mantiene sin cambios, la relación de capacitancia se puede lograr a partir de la frecuencia de resonancia.

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{f_1^2}{f_2^2}$$

Ecuación 2.12. Relación capacitancia frecuencia de dos medidas [15].

En la ecuación 2.12. C_1 y C_2 son capacitancias de la primera y segunda medición FRA, f_1 y f_2 son las frecuencias de resonancia respectivas de cada medición.

El porcentaje de cambio de capacitancia $\Delta C_{21}\%$ se puede calcular como en la ecuación 2.13.

$$\Delta C_{21}\% = \left(\frac{C_2}{C_1} - 1\right) \cdot 100 = \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1\right) \cdot 100$$

Ecuación 2.13. Porcentaje de cambio de capacitancia [15].

La aplicación de esta ecuación solo considera la capacitancia real ya que la capacitancia imaginaria solo afecta la magnitud de la resonancia y no la frecuencia [15].

2.6.3 Capacitancia de la Prueba de “Entrelazado Capacitivo”

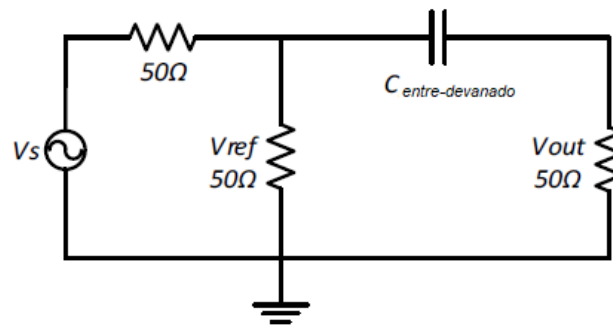


Figura 2.31. Circuito que representa la capacitancia entre devanados por fase de la medición [19].

La figura 2.31 muestra un circuito fundamental que representa la capacitancia entre devanados de un transformador que se mide utilizando la prueba de entrelazado capacitivo con un medidor FRA comercial. Sin embargo, este circuito puede ser válido solo en la región de baja frecuencia. Ya que la influencia de la capacitancia entre devanados está dominada a bajas frecuencias, aunque no se define específicamente el rango de frecuencia [19].

La relación voltaje de salida y entrada de la Figura 2.31 se puede obtener mediante la ecuación 2.14. Este es el resultado típico con un equipo para mediciones FRA.

$$\frac{V_{out}}{V_{ref}} = \frac{50}{50 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega 50C}{j\omega 50C + 1}$$

Ecuación 2.14. Relación voltaje de salida /entrada medida de un equipo FRA [19].

Conociendo que la capacitancia es extremadamente pequeña (en valores de $\times 10^{-10}$), se puede omitir la parte imaginaria del denominador de la ecuación 2.11 y simplificando con el valor absoluto se puede simplificar obteniendo la ecuación 2.15.

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{ref}} \right| = \omega 50 C$$

Ecuación 2.15. Ecuación para cálculo de la capacitancia del entre devanado [19].

Como $C' (\times 10^{-10} F)$ es prácticamente mayor que $C'' (\times 10^{-12} F)$, la ecuación 2.15 representa la parte real de capacitancia compleja [15].

Para poder aplicar este método al presente estudio, se debe dibujar un circuito equivalente fundamental que represente el sistema de medición de la respuesta en frecuencia de la metodología experimental propuesta.

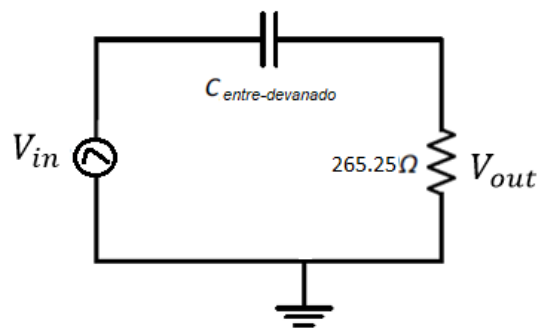


Figura 2.32. Circuito que representa la capacitancia entre devanados de la medición con el generador de impulsos y la resistencia shunt.

En la figura 2.32 se representa el circuito fundamental para la representación de la capacitancia entre devanados, mediante la medición IFRA experimental, de aquí al igual que el circuito de la figura 2.31 se puede deducir la ecuación para el cálculo de la capacitancia entre devanados.

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \omega 265.25 C$$

Ecuación 2.15. Ecuación para cálculo de la capacitancia del entre devanado a partir de la figura 2.32.

3 PRUEBAS EN EL LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados alcanzados por medio de las pruebas de rutina, para tener una idea del estado del transformador bajo estudio y de respuesta en frecuencia mediante la aplicación de impulsos de alto voltaje, antes y después del cambio del aceite dieléctrico, lo que permitirá evaluar el estado del aislamiento interno del transformador, esto mediante la metodología descrita en el capítulo 2.

3.1 Pruebas de Rutina

De acuerdo al objetivo de este estudio el cual es evaluar el aislamiento del transformador bajo prueba, los ensayos que nos dan una idea del estado del aislamiento interno son: medición de la resistencia de aislamiento y prueba dieléctrica del aceite aislante. Estos ensayos se realizaron antes del cambio del aceite dieléctrico deteriorado y también después de que este se cambió, para poder notar la diferencia en estas pruebas al mejorar el aislamiento con un aceite nuevo. También se desarrollaron los demás ensayos de rutina que normalmente se realizan en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN.

3.1.1 Medición de la Resistencia de Aislamiento

Se realizó la prueba de acuerdo al procedimiento indicado en la norma ANSI C.57.12.90. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.1, los cuales son comparados antes y después del cambio del aceite. Las conexiones se realizaron de acuerdo con lo especificado en la sección 2.2.

Tabla 3.1. Resultados: Medición de la resistencia de aislamiento

Conexión de bobinas	Voltaje aplicado		Resistencia de aislamiento			
			Antes		Después	
Alta-Baja	5000	V	7.14	GΩ	12.62	GΩ
Alta-Tanque	5000	V	6.70	GΩ	8.89	GΩ
Baja-Tanque	5000	V	82.5	MΩ	4.25	GΩ

Los resultados obtenidos reflejan que, al cambiar el aceite por uno nuevo, mejora notablemente el valor medido de la resistencia de aislamiento, el más notable se observa en la configuración Baja-Tanque que el valor cambia del orden de los MΩ a los GΩ.

Si bien, los valores mínimos que se tienen en cuanto al valor de resistencia de aislamiento generalmente son en el orden de megahomios, se puede decir que el aceite viejo se

consideraría buen aislante, sin embargo, hay que tomar en cuenta que se tiene una combinación de aceite y papel en el transformador, por lo que para verificar el estado en sí del aceite se realiza una prueba de rigidez dieléctrica a una muestra de este.

3.1.2 Prueba Dieléctrica del Aceite Aislante

Se realizó el ensayo según la norma A.S.T.M (29-D-877) [6].

Los resultados de la prueba dieléctrica del aceite se presentan en la Tabla 3.2, estos se comparan entre muestras obtenidas de la válvula de muestreo del transformador, entre el aceite original del transformador y el nuevo aceite dieléctrico.

Tabla 3.2. Resultados: Prueba dieléctrica del aceite aislante

No. Prueba	Aceite original		Aceite nuevo	
1	12.5	kV	40.2	kV
2	17.3	kV	35.5	kV
3	9.1	kV	33.3	kV
4	8.7	kV	32.2	kV
5	10.1	kV	30.6	kV
Promedio	11.54	kV	34.36	kV

Se puede observar de los resultados obtenidos que el aceite que originalmente estaba en el transformador no cumple con el criterio de bondad descrito en el numeral 2.2.6, ya que se tienen un voltaje promedio de disrupción menor a 30 kV, esto indicaría que el aceite tendría impurezas y humedad en su composición; por otra parte, al realizar el cambio del aceite, la muestra obtenida cumple con el criterio de bondad, por lo que mejoraría notablemente el aislamiento en el transformador tal y como se vio en la medición de resistencia de aislamiento.

3.1.3 Relación de Transformación Medida

Según [4], la relación de voltaje medida entre dos bobinados estaría dentro del 0.5% de la relación indicada en la placa, la relación de transformación teórica se calcula a partir de la ecuación 1.1.

Los resultados después de medir la relación de transformación mediante el medidor TTR del laboratorio se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados: Relación de transformación medida

Tap	H1-H2 X1-X0	H2-H3 X2-X0	H3-H1 X3-X0	Valor medido	Valor teórico	ε%
1	51.723	51.718	51.769	51.7366	47.21	8.74 %
2	50.641	50.607	50.636	50.628	46.09	8.96 %
3	49.456	49.452	49.502	49.47	44.96	9.11 %
4	42.762	42.779	42.760	42.767	42.71	0.13 %

Se observan los resultados medidos y calculados de relación de transformación, se puede diferenciar que los valores no están dentro del rango a excepción del tap 4. Esto podría reflejar alguna avería en los bobinados del cambiador de tomas o taps.

3.1.4 Prueba de Circuito Abierto

Para conocer tanto la pérdida sin carga y corriente de excitación se realizó el ensayo de circuito abierto, los resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados: Prueba de circuito abierto

Voltaje de alimentación B.V			Corriente de magnetización			Potencias en vacío (20° C)		
X1-X2	230.6	V	I1	3.45	A	P	0.1	kW
X2-X3	230.9	V	I2	2.68	A	Q	1.10	kVar
X3-X1	230.8	V	I3	1.86	A	S	1.11	kVA
Promedio	230.77	V	Promedio	2.66	A	Pérdidas	100	W
Valores NORMA INEN 2115:2004 (ANEXO II)			Io(%)	3.4	%	Po(W)	197	W

$$I_o\% = \frac{2.66}{125.2} \times 100 = 2.12\%$$

Ecuación 3.1. Calculo en porcentaje de la corriente de magnetización.

Una guía para conocer si las pérdidas y corriente de magnetización son consistentes, se lo realiza con la tabla de pérdidas en transformadores trifásicos de distribución Valores NORMA INEN 2115:2004 ya que en [4] no se detallan valores mínimos. Comparando con el ANEXO II se ve que los valores medidos están en el rango de los valores de referencia.

3.1.5 Prueba de Cortocircuito

En este ensayo se cortocircuita el secundario y se regula el voltaje del lado de alta hasta que la corriente en bajo voltaje alcance su valor nominal 125.1 [A]. La potencia consumida se transforma todo en pérdidas, las cuales se reducen casi totalmente a la pérdida en el cobre.

La impedancia porcentual de un transformador es la caída de voltaje a plena carga debido a la resistencia del bobinado y la reactancia expresada como un porcentaje del voltaje nominal.

Tabla 3.5. Resultados: Prueba de cortocircuito. Posición tap 1:

Voltaje de cc (20° C)			Corriente de alto voltaje			Potencias en CC (20° C)		
H1-H2	285.4	V	I1	4.30	A	P	1.26	kW
H2-H3	288.9	V	I2	4.34	A	Q	1.75	kVar
H3-H1	288.6	V	I3	4.50	A	S	2.15	kVA
Promedio	287.63	V	Promedio	4.38	A	Pérdidas	1260	W

La Tabla 3.5 presenta los resultados obtenidos al realizar el ensayo de cortocircuito con la máximo posición del tap, Obteniendo la impedancia porcentual.

$$Z\% = \frac{287.63}{6300} \times 100 = 4.5\%$$

Tabla 3.6. Resultados: Prueba de Cortocircuito. Posición tap nominal 3:

Voltaje de cc (20° C)			Corriente de alto voltaje			Potencias en CC (20° C)		
H1-H2	251	V	I1	4.13	A	P	1.03	kW
H2-H3	248	V	I2	4.37	A	Q	1.497	kVar
H3-H1	250.5	V	I3	4.03	A	S	1.808	kVA
Promedio	249.83	V	Promedio	4.17	A	Pérdidas	1030	W
Valores NORMA INEN 2115:2004 (ANEXO II)						Pc(W)	776	W

La Tabla 3.6 presenta los resultados obtenidos al realizar el ensayo, con esto se puede obtener la impedancia porcentual.

$$Z\% = \frac{249.83}{6000} \times 100 = 4.1\%$$

Como se observa la impedancia supera a la dada en la placa de datos sin embargo está dentro del límite de 3% y 15 %. Al igual que en el caso anterior se puede comparar el valor de potencia de cortocircuito con los valores en la tabla del ANEXO II, se observa que las pérdidas son un poco más altas a lo que generalmente se encuentra en transformadores de esta potencia.

3.1.6 Prueba de Voltaje Aplicado

Se realizó el ensayo de voltaje aplicado con un voltaje máximo de 19 kV siendo este aplicado durante 1 minuto. Esto se hizo antes y después de cambiar el dieléctrico.

Dado que durante la aplicación de la prueba se hace observaciones visuales y sonoras en cuanto a fallas se tuvo lo resumido en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados: Ensayo de voltaje aplicado.

Aceite deteriorado		Aceite nuevo	
Voltaje aplicado	19 kV [Anexo III]	Voltaje aplicado	19 kV [Anexo III]
Tiempo	1 minuto	Tiempo	1 minuto
Observaciones		Observaciones	
-Se presentó un sonido de efecto corona correspondiente a cables externos. -Se presentó un sonido de descarga parcial interna. -Olor a Ozono.		-Se presentó un sonido de efecto corona correspondiente a cables externos. -Olor a ozono.	

En ambos casos tanto antes y después del cambio de aceite se presentan sonidos de efecto corona estos son debido a la polarización del aire alrededor de los cables usados como puentes entre las fases de alto voltaje, sin embargo, al hacerse esta prueba con el transformador con el aislante deteriorado, se escuchó un sonido interno, el cual tentativamente se piensa que es debido a que el aceite no tiene una correcta rigidez dieléctrica como se vio en la prueba de rigidez dieléctrica del aceite.

3.2 Respuesta en Frecuencia Mediante Pruebas de Impulso

Según la metodología descrita en el capítulo 2, se presentan los resultados de la respuesta en frecuencia del transformador de marca ELIN bajo estudio, comparando las trazas obtenidas antes y después del cambio del dieléctrico para cada configuración o tipo de prueba.

Se presentan las ondas en el tiempo obtenidas mediante ORC y las trazas en función de la frecuencia a ser analizadas. Se hace un análisis de sensibilidad mediante la función coherencia entre respuestas del mismo estado del dieléctrico para ver el factor de repetitividad y determinar hasta qué frecuencia se puede considerar un buen análisis en cada estado del aislamiento, observando similitudes y diferencias en las trazas.

3.2.1 Tipo de Prueba: A.V Circuito Abierto (OC)

Este tipo de medición se realiza para definir la función de transferencia de un mismo devanado, es decir, se realiza en los terminales de un mismo nivel de voltaje, es una medición no transferida [23]. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que los bobinados están aislados por capas de papel y el dieléctrico en el cual están sumergidos, por lo que la respuesta también depende del ambiente dieléctrico que lo rodea.

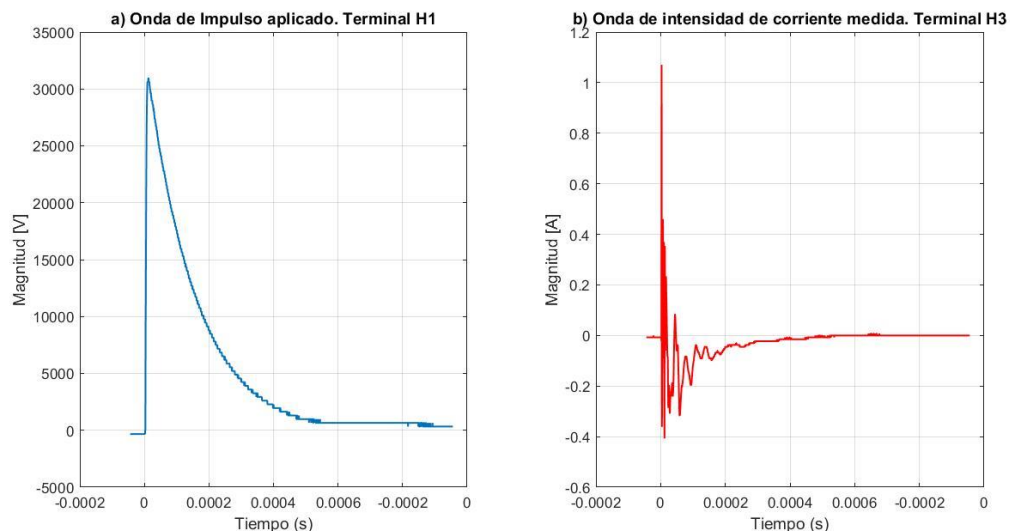


Figura 3.1. Ondas de voltaje de impulso (a) y corriente medida (b) con ORC. Tipo de prueba: OC H1-H3. Transformador con aceite deteriorado.

En la Figura 3.1 se puede observar el impulso standard 1.2/50 μ s inyectado en la prueba de circuito abierto (H1); se observa que su valor pico está alrededor de los 30 kV, que está dentro del límite establecido por el BIL: 60 kV (ANEXO III), así también se visualiza la intensidad de corriente medida en el extremo adyacente del bobinado (H3).

Se procedió de la misma manera en las siguientes fases de alto voltaje, observando que las ondas de corriente medidas tienen similar forma en el dominio del tiempo.

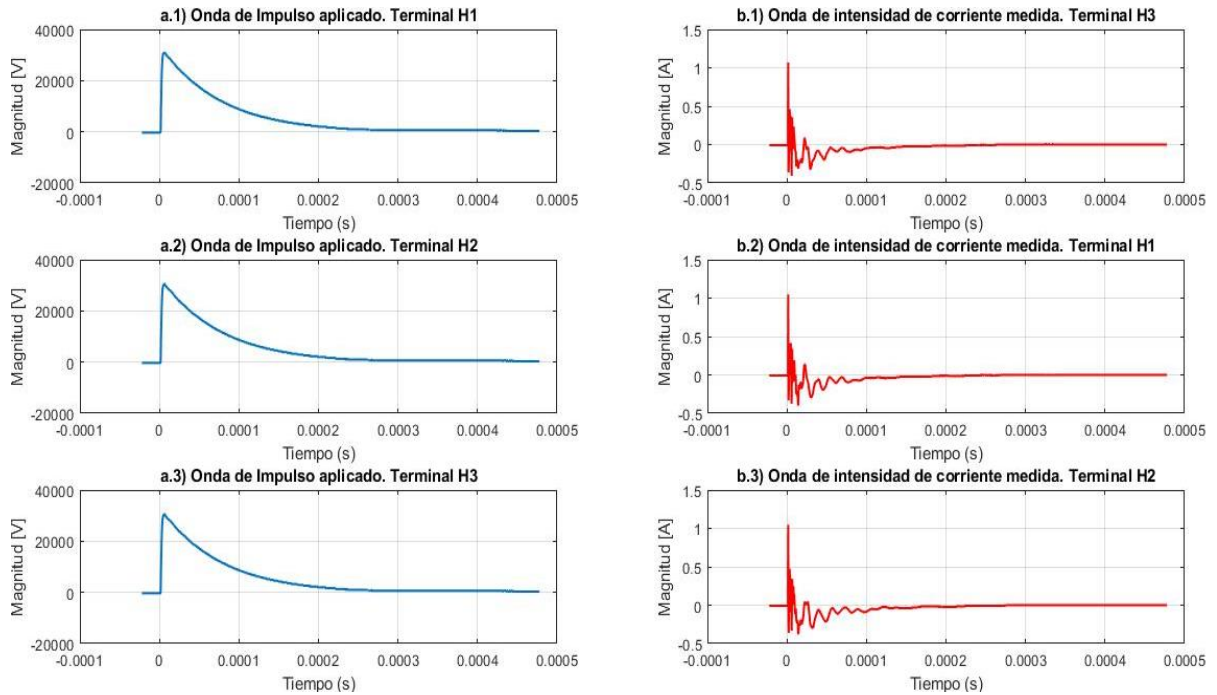


Figura 3.2. Ondas de voltaje de impulso (a.1, a.2, a.3) y corriente medidas (b.1, b.2, b.3) con ORC. Tipo de prueba: OC fases de alto voltaje (H1-H3, H2-H1, H3-H2).

En la Figura 3.2 se observan las ondas muestreadas mediante el osciloscopio Tektronix TDS 1012B del Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN, a simple vista no se encuentra diferencia en las ondas en el dominio del tiempo entre fases.

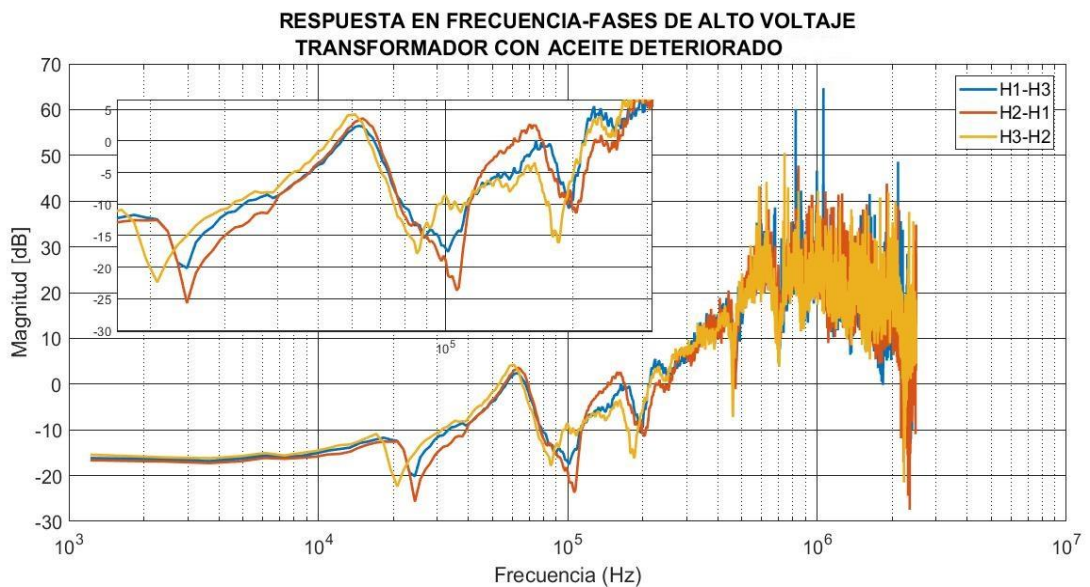


Figura 3.3. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: OC fases de alto voltaje (H1-H3, H2-H1, H3-H2). Transformador con aceite deteriorado.

En la Figura 3.3 se presenta la respuesta en frecuencia obtenida al aplicar la metodología a las señales de entrada y salida muestreadas de la Figura 3.2, si bien tienen una silueta

similar en cuanto a la forma del espectro, los picos de resonancias y antiresonancias que dependen de los parámetros RLC de la red equivalente no coinciden en la misma frecuencia, además se puede observar que las magnitudes de estos difieren entre sí, por lo tanto, comparando la función de transferencia de cada fase se puede ver como la premisa, de que, debido a la estructura propia de los transformadores, existen diferencias implícitas entre las fases, por ejemplo, el devanado puede ser estirado y luego se tensa debido a una reducción en el radio de devanados, causando que las resonancias se desplacen a través de un amplio rango de frecuencias [14] .

Al tener digitalizadas las muestras, siempre está presente un nivel de ruido, formado por ruido digital debido al número finito de bits del digitalizador y por ruido electromagnético ambiental [12]. Por ello la introducción del uso de la función coherencia, permite definir un límite de frecuencia para la comparación de medidas.

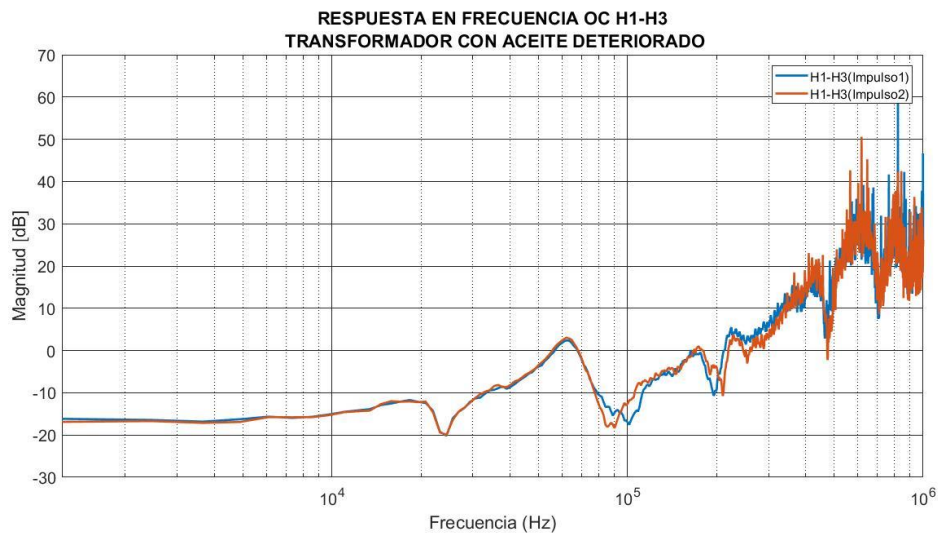


Figura 3.4. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: OC H1-H3. Transformador con aceite deteriorado.

En la Figura 3.4 a modo de ejemplo se presenta la comparación entre dos respuestas de frecuencia medidas en los terminales de la misma fase, esto para el cálculo de la función coherencia a partir de dos impulsos.

El cómputo de la coherencia para el sistema utilizado, se muestra en la Figura 3.5. Los resultados obtenidos son satisfactorios hasta aproximadamente 180 kHz, es decir que hasta ese valor de frecuencia se aproxima el valor de la coherencia a la unidad lo cual es lo ideal, sin embargo, en [24] el autor menciona según lo citado que los valores de coherencia bajos, hasta alrededor de 0.4 no implica que la respuesta en frecuencia obtenida no deba utilizarse, sino que esta puede ser ponderada.

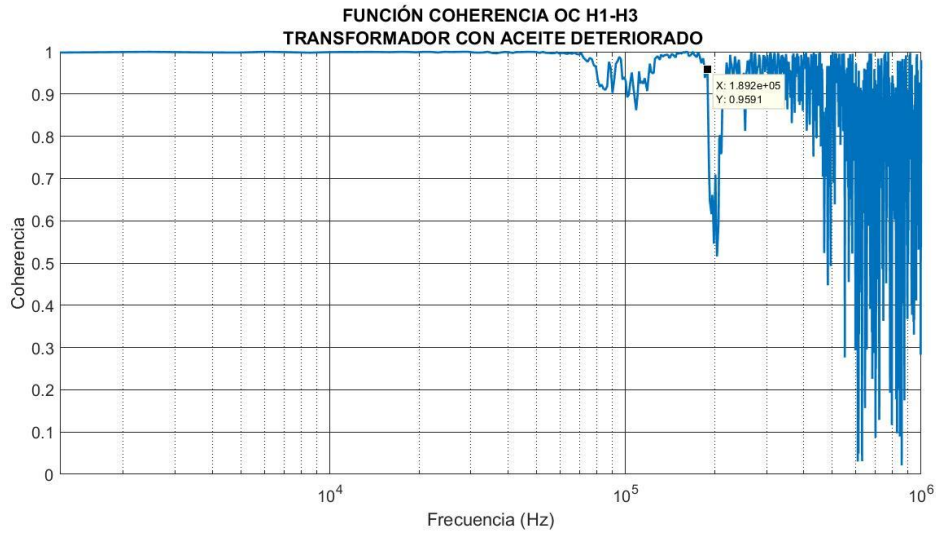


Figura 3.5. Coherencia. Tipo de prueba: OC H1-H3. Transformador con aceite deteriorado.

La coherencia nos puede dar una idea en cuanto al grado de repetitividad, es decir hasta cual valor de frecuencia la repetitividad es buena o pobre.



Figura 3.6. Coherencia. Tipo de prueba: OC H2-H1. Transformador con aceite deteriorado.

La Figura 3.6 muestra la coherencia a partir de dos impulsos aplicados en la fase H2-H1, se aprecia una disminución en 100 kHz, es decir que las respuestas en esa frecuencia varían un poco.

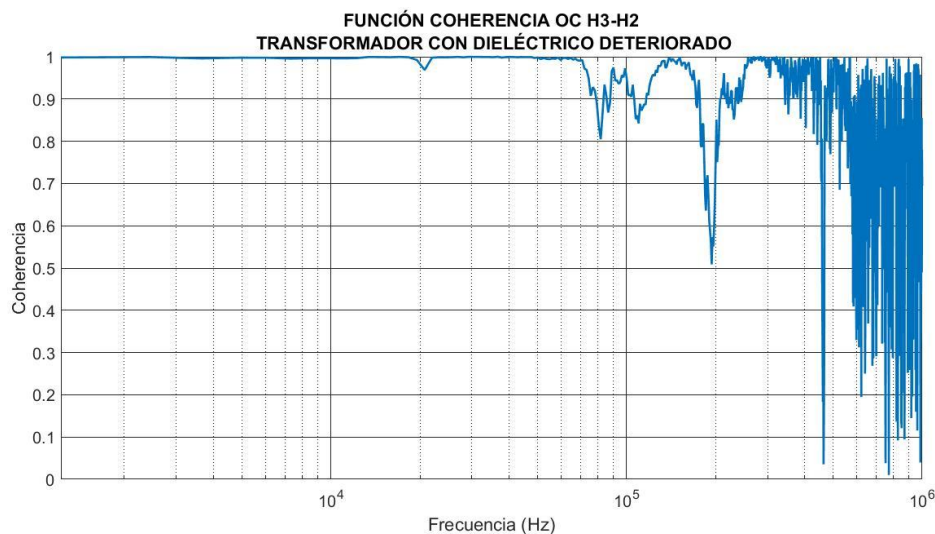


Figura 3.7. Coherencia. Tipo de prueba: OC H3-H2. Transformador con aceite deteriorado.

Para las demás fases (H2-H1 y H3-H2) se obtuvieron valores de coherencia similar, esto se muestra en las Figuras 3.6 y 3.7, pero varían alrededor de 100 kHz, por lo que para la prueba de circuito abierto del transformador en este estado (transformador con aceite deteriorado) se podría comparar mediciones hasta ese nivel de frecuencia.

Por otra parte, al cambiar el dieléctrico contenido en el interior del transformador, mediante inyección de impulsos y medición de la respuesta en la misma configuración o conexión se obtienen los siguientes resultados.

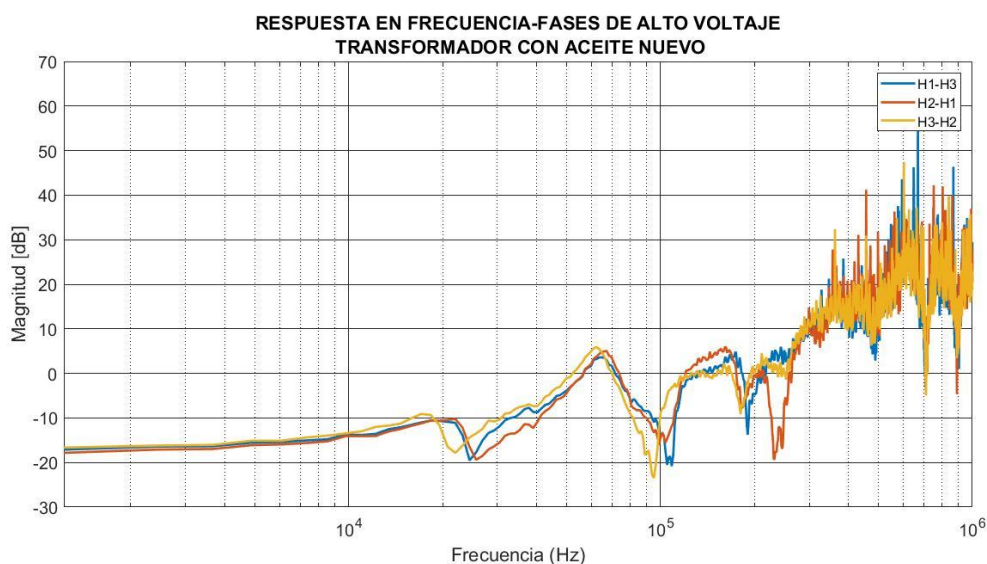


Figura 3.8. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: OC fases de alto voltaje (H1-H3, H2-H1, H3-H2). Transformador con aceite nuevo.

En la Figura 3.8 se presenta la respuesta en frecuencia de los bobinados de alto voltaje bajo la configuración del mismo tipo de prueba (OC) pero una vez cambiado el dieléctrico deteriorado por uno nuevo.

Al igual que en el caso del transformador con aceite deteriorado se calcula la función coherencia a partir de dos impulsos.

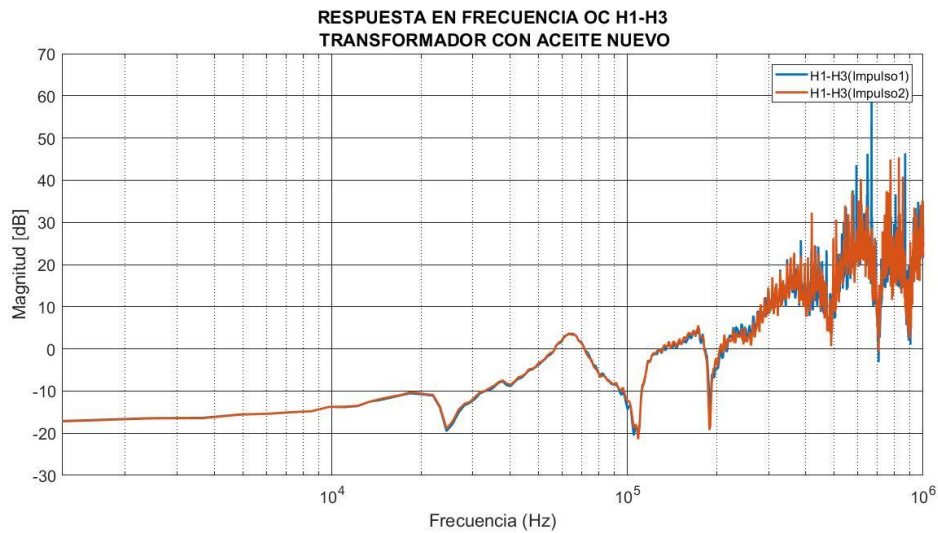


Figura 3.9. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: OC H1-H3. Transformador con aceite nuevo.

En la Figura 3.9 se presenta la comparación entre dos respuestas de frecuencia medidas en los terminales de la misma fase H1-H3 una vez cambiado el aceite del transformador.

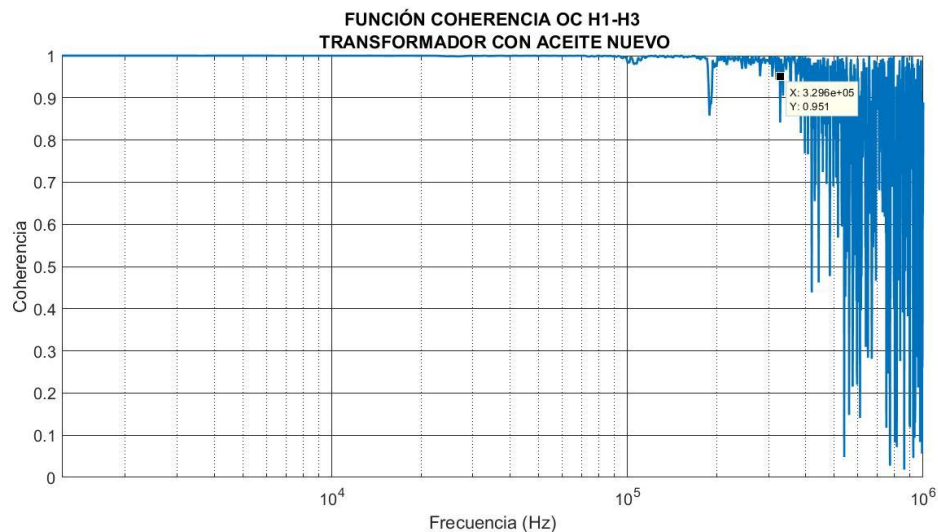


Figura 3.10. Coherencia. Tipo de prueba: OC H1-H3. Transformador con aceite nuevo.

La coherencia calculada para la fase H1-H3 una vez cambiado el aceite dieléctrico se presenta en la Figura 3.10, se observa una notable mejoría, ya que la pequeña disminución que se tenía alrededor de la frecuencia de 100 kHz desaparece, también se tiene que el valor de la coherencia mejora hasta aproximadamente 300 kHz lo cual corresponde al ancho de banda aproximado del impulso.

En las Figuras 3.11 y 3.12 se presenta la función coherencia para las demás fases, se observa igualmente una notable mejoría en cuanto al valor de la función hasta un valor de frecuencia aproximado de 300 kHz.

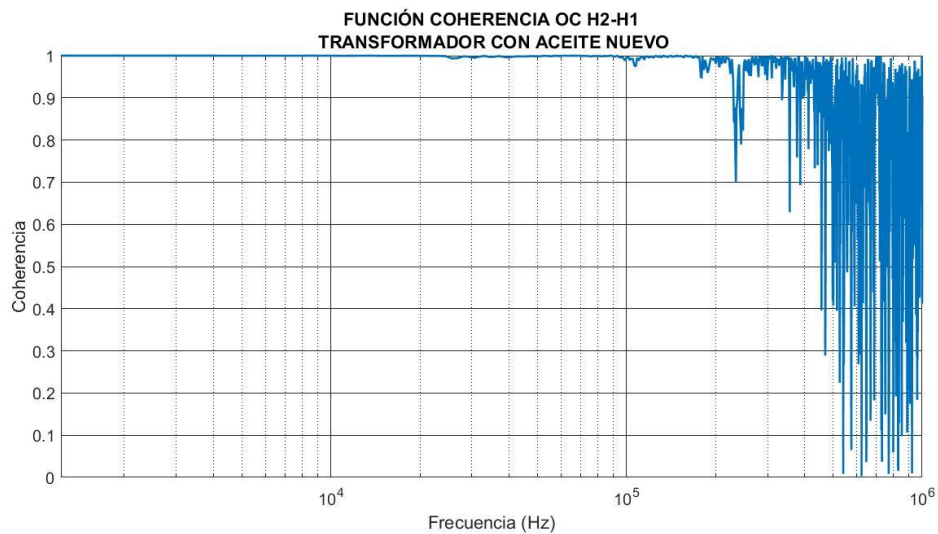


Figura 3.11. Coherencia. Tipo de prueba: OC H2-H1. Transformador con aceite nuevo.

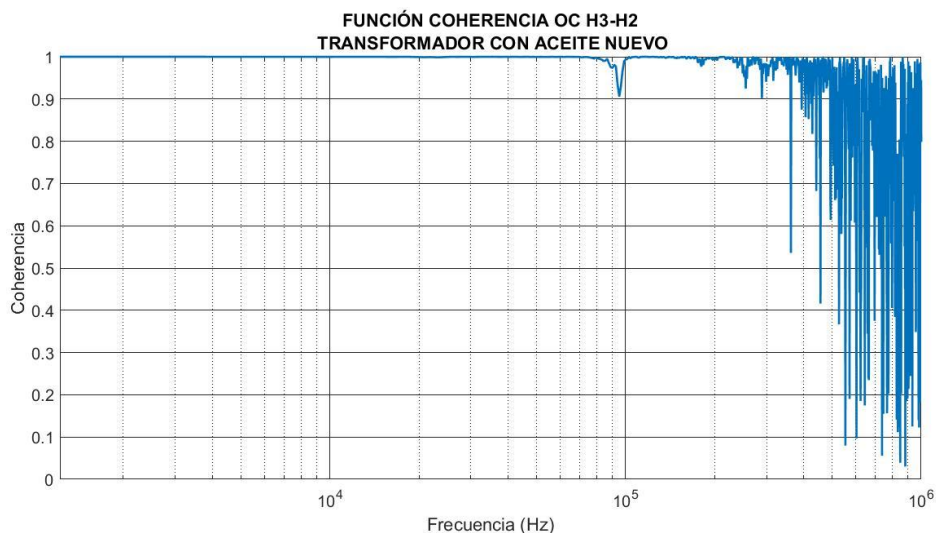


Figura 3.12. Coherencia. Tipo de prueba: OC H3-H2. Transformador con aceite nuevo.

En resumen, el valor de la función coherencia y por ende el grado de repetitividad entre muestras, mejoran una vez que se cambia el medio dieléctrico deteriorado en el cual está sumergido el transformador.

3.2.1.1 Comparación Entre Estados

Como se mencionó anteriormente, el diagnostico empleado en mediciones FRA se basa en la comparación entre curvas de estados representativos, esta comparación es por inspección visual de las trazas, en las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se presenta los resultados de las mediciones de respuesta en frecuencia de cada terminal de alto voltaje en circuito abierto para los dos estados del transformador.

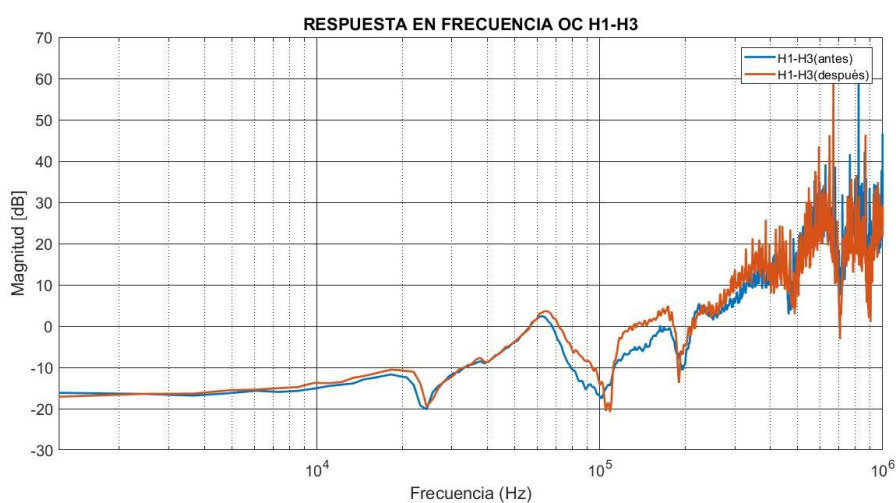


Figura 3.13. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: OC H1-H3.

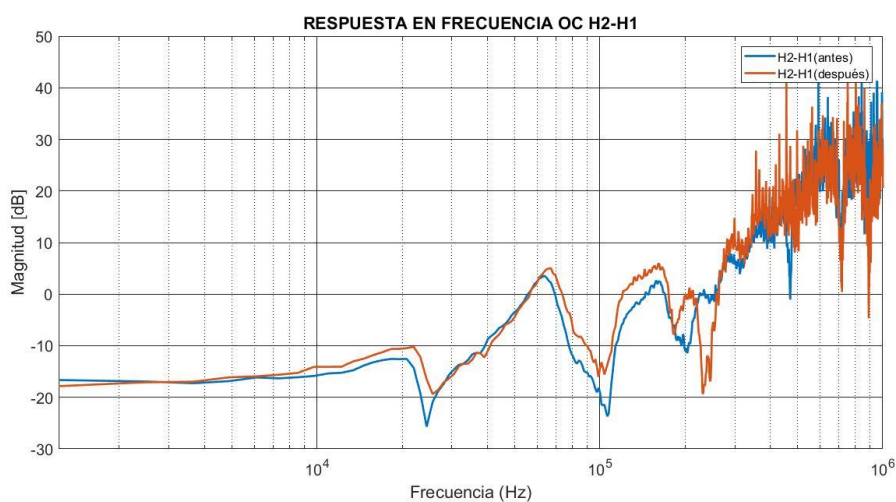


Figura 3.14. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: OC H2-H1.

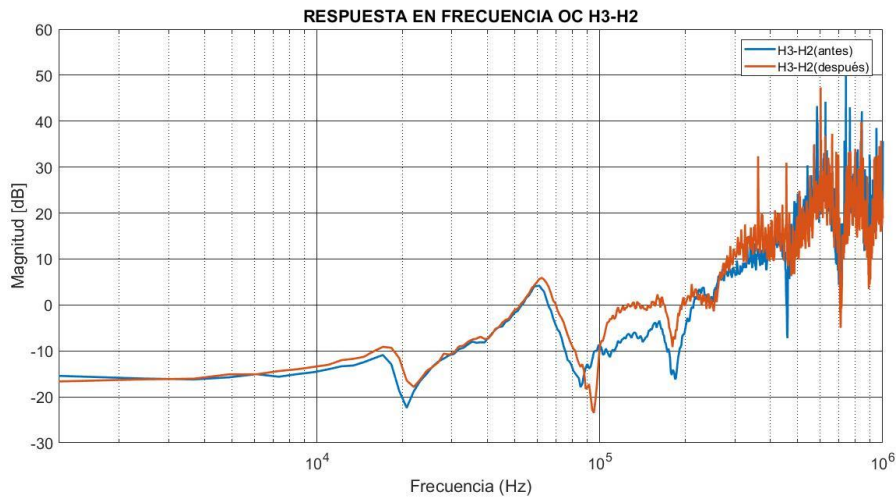


Figura 3.15. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: OC H3-H2.

Como se observa en las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15, al cambiar el aceite la respuesta en frecuencia se desplaza hacia frecuencias más altas, pero manteniendo su forma, este cambio se puede asemejar a los ejemplos de la referencia [18] en el cual los autores presentan el efecto de la humedad contenida en el aislamiento de papel en varios modelos y casos; el papel al tener un alto contenido de humedad presenta una respuesta que se desplaza hacia frecuencias menores.

Basado en los ejemplos de la referencia [18] y por los resultados de la prueba dieléctrica al aceite deteriorado, el conjunto (aceite deteriorado-papel) aislante del transformador podría contener un nivel alto de humedad debido a que esta afecta la rigidez dieléctrica tanto del aceite y del papel, pues el voltaje de ruptura medida del aceite no cumplió con el criterio de bondad.

3.2.2 Tipo de Prueba: B.V Circuito Abierto (OC)

Al igual que la prueba de circuito abierto en alto voltaje, la señal se aplica a un extremo de cada devanado sucesivamente, y la señal transmitida se mide en el otro extremo. Aplicar un impulso de estas características, tiene una cierta dificultad, ya que al ser el bobinado de bajo voltaje, el impulso de alto voltaje sobrepasa la capacidad del aislamiento básico en bajo voltaje, lo cual es perjudicial para el aislamiento y el bobinado, además el impulso más bajo generado el equipo del laboratorio de Alto Voltaje oscila en magnitud entre los 5 kV y 7 kV, a manera de ejemplo en la figura se muestra la onda inyectada en el lado de bajo voltaje en el cual acercando lo máximo posible las esferas se consigue disminuir

considerablemente la magnitud hasta 2 kV, sin embargo, al inyectar la onda se puede observar que esta pierde las características de una onda atmosférica estándar.

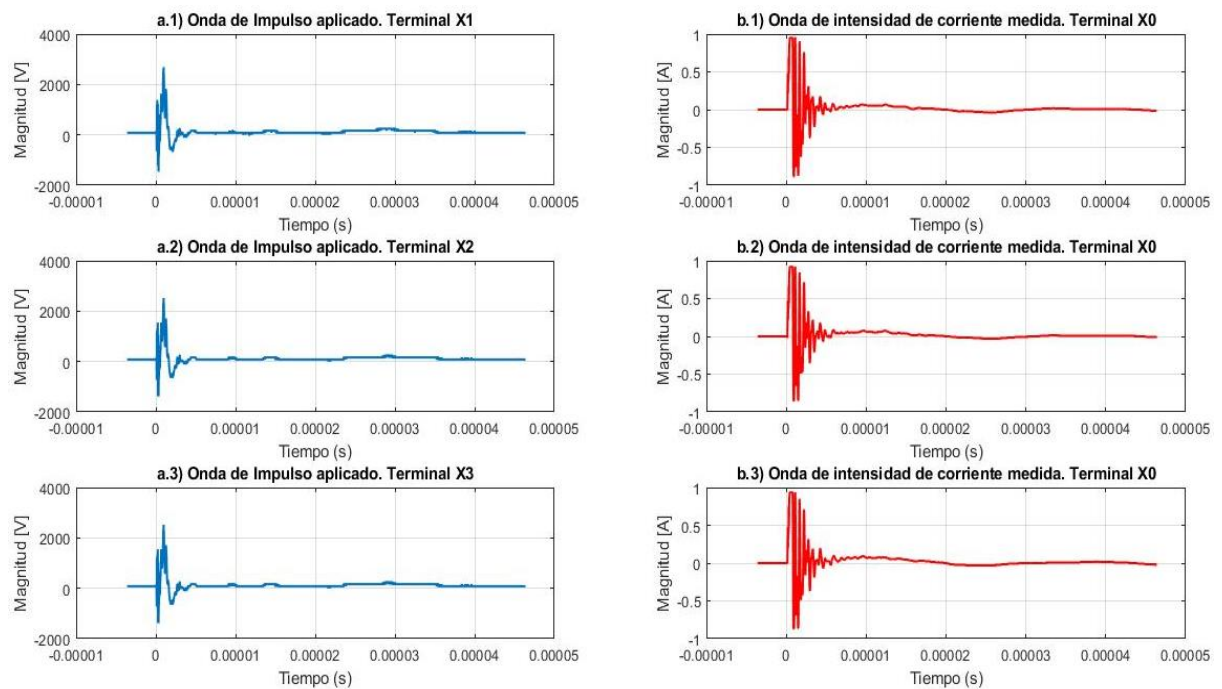


Figura 3.16. Ondas de voltaje de impulso (a.1, a.2, a.3) y corriente medidas (b.1, b.2, b.3) con ORC. Tipo de prueba: OC fases de bajo voltaje (X1-X0, X2-X0, X3-X0).

En la Figura 3.16 se observa que el impulso atmosférico se ve afectado notablemente en su forma, esto puede ser debido a que en el lado de bajo voltaje se tiene un conductor de calibre mayor al bobinado de alto voltaje ya que se manejan corrientes superiores.

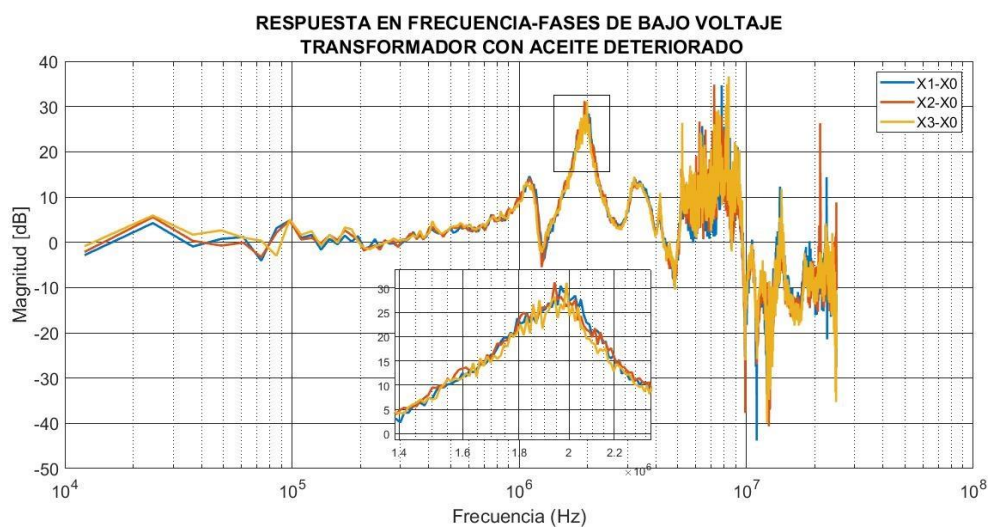


Figura 3.17. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: OC fases de bajo voltaje (X1-X0, X2-X0, X3-X0). Transformador con aceite deteriorado.

En la Figura 3.17 se presenta la respuesta en frecuencia obtenida de la señal inyectada ya que al deformarse se tiene igualmente una señal de respuesta, se observa que se tiene una respuesta similar en las tres fases, sin embargo, estas varían notablemente al presentarse distintos picos en las trazas.

Debido que, al inyectar un impulso, este se deforma notablemente no se utilizará esta configuración para evaluar el aislamiento pues también se tiene una gran variación en la respuesta una vez cambiado el aceite deteriorado como se ve en la Figura 3.18.

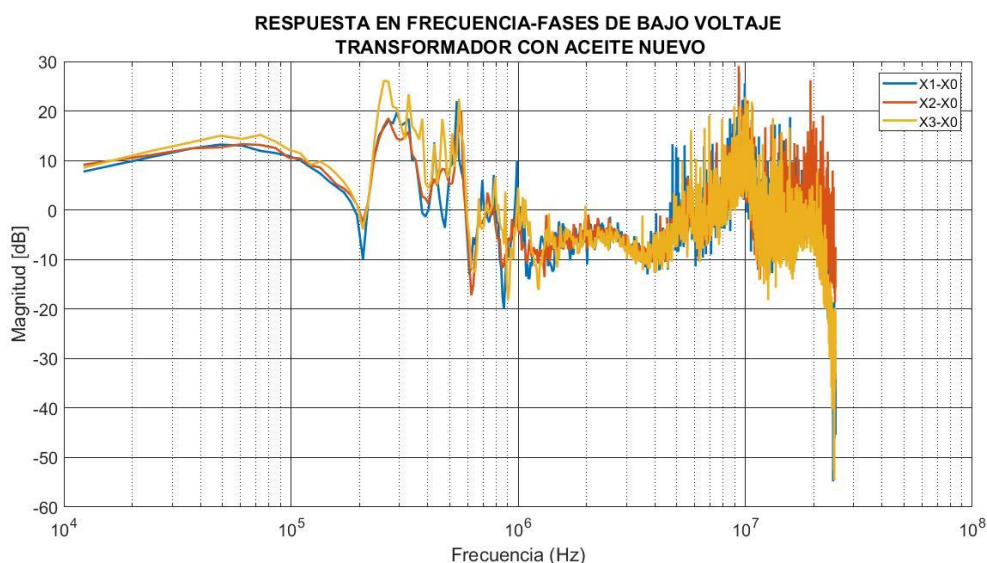


Figura 3.18. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: OC fases de bajo voltaje (X1-X0, X2-X0, X3-X0). Transformador con aceite nuevo.

3.2.3 Tipo de Prueba: Cortocircuito (SC)

Este tipo de prueba se realiza de la misma forma que una prueba de circuito abierto en alto voltaje; la medición se realiza desde un extremo de un devanado de alto voltaje a otro, pero con la diferencia que los devanados de bajo voltaje están cortocircuitados, pero evitando el terminal del neutro.

En la Figura 3.19 se presentan las ondas obtenidas en el dominio del tiempo, se observa que la señal inyectada presenta oscilaciones en la cola, sin embargo, se tienen una respuesta, que puede ser evaluada.

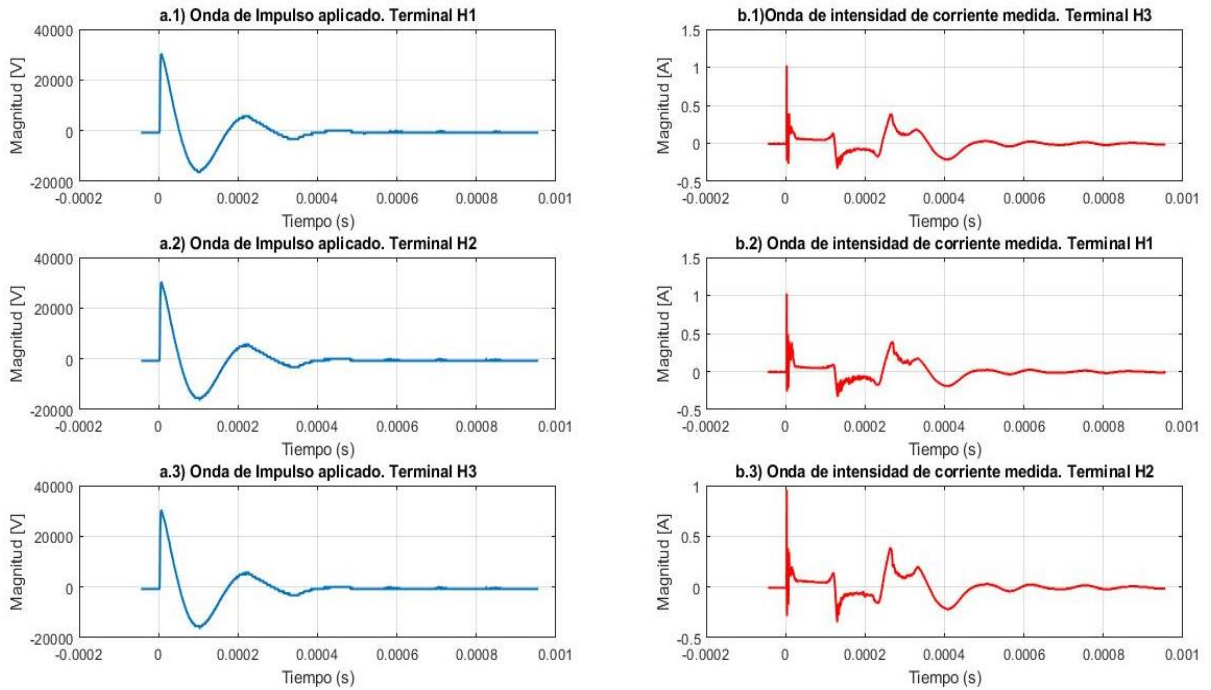


Figura 3.19. Ondas de voltaje de impulso (a.1, a.2, a.3) y corriente medidas (b.1, b.2, b.3) con ORC. Tipo de prueba: SC fases de alto voltaje (H1-H3, H2-H1, H3-H2).

La respuesta obtenida de las ondas muestreadas en la prueba de cortocircuito se muestra en la Figura 3.20, se presenta la respuesta en frecuencia de cada fase, se observan similares formas de trazas, sin embargo, se ve notables diferencias en los picos de las antirresonancias que se generan en las frecuencias menores a 100 kHz.

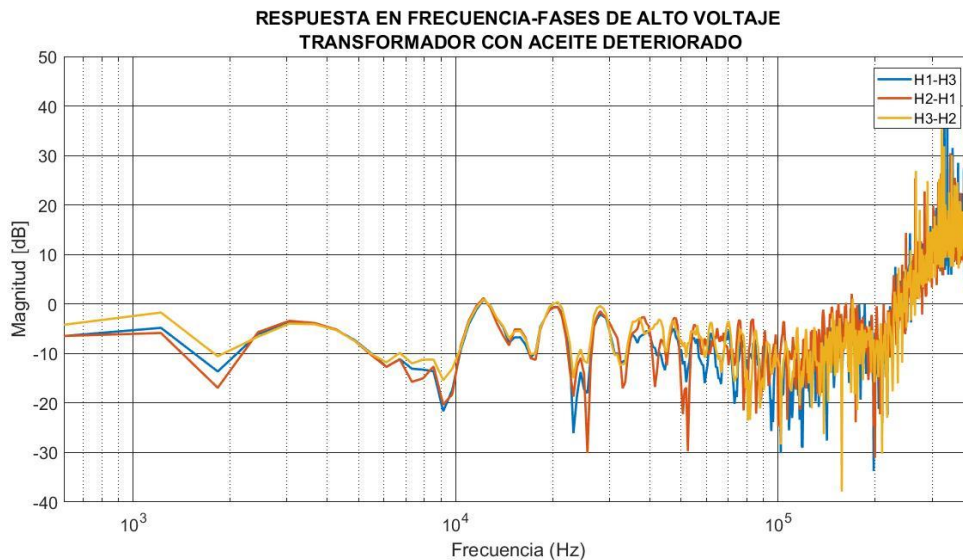


Figura 3.20. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: SC fases de alto voltaje (H1-H3, H2-H1, H3-H2). Transformador con aceite deteriorado.

Al igual que en la prueba de circuito abierto se debe verificar hasta que valor de frecuencia se puede considerar veraz la respuesta, por lo cual se calcula la función coherencia.

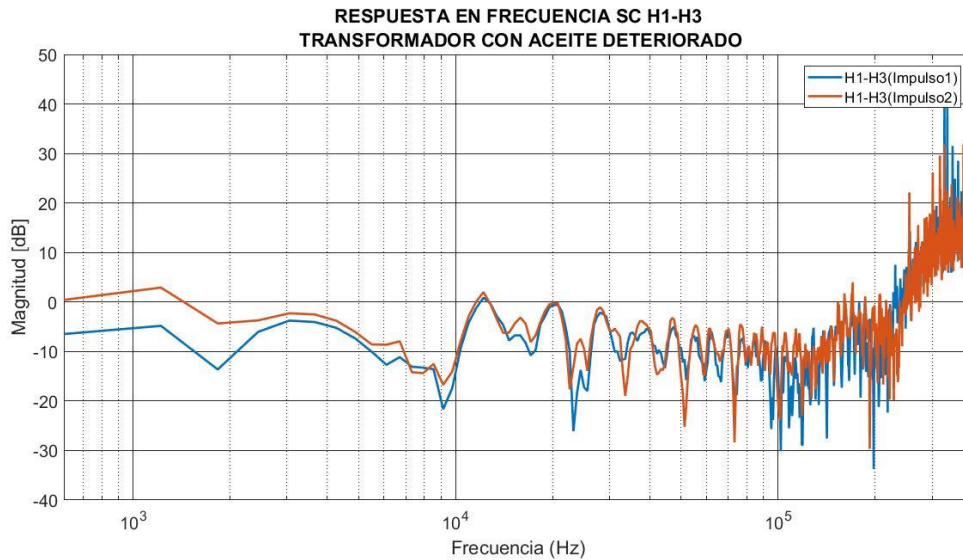


Figura 3.21. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: SC H1-H3. Transformador con aceite deteriorado.

Se presenta en la Figura 3.21 las respuestas en frecuencia de la aplicación de dos impulsos en la misma fase, a simple vista se observa que difieren notablemente en las trazas, lo cual se verá reflejado en la función coherencia.

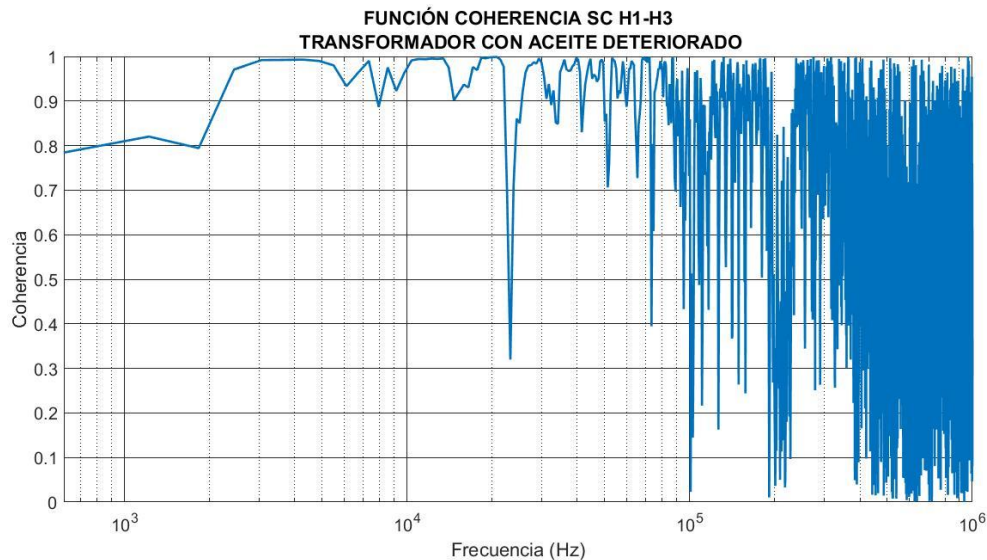


Figura 3.22. Coherencia. Tipo de prueba: SC H1-H3. Transformador con aceite deteriorado.

Como se esperaba, la función coherencia presenta discontinuidades notables en su traza lo cual sugiere que en este estado (transformador con aceite deteriorado) no se puede evaluar en esta conexión (cortocircuito) la respuesta en frecuencia de la fase.

Se obtienen respuestas similares en la función coherencia de las demás fases bajo prueba, como se observa en la Figura 3.23 para la fase H2-H1 y la Figura 3.24 para la fase H3-H2.

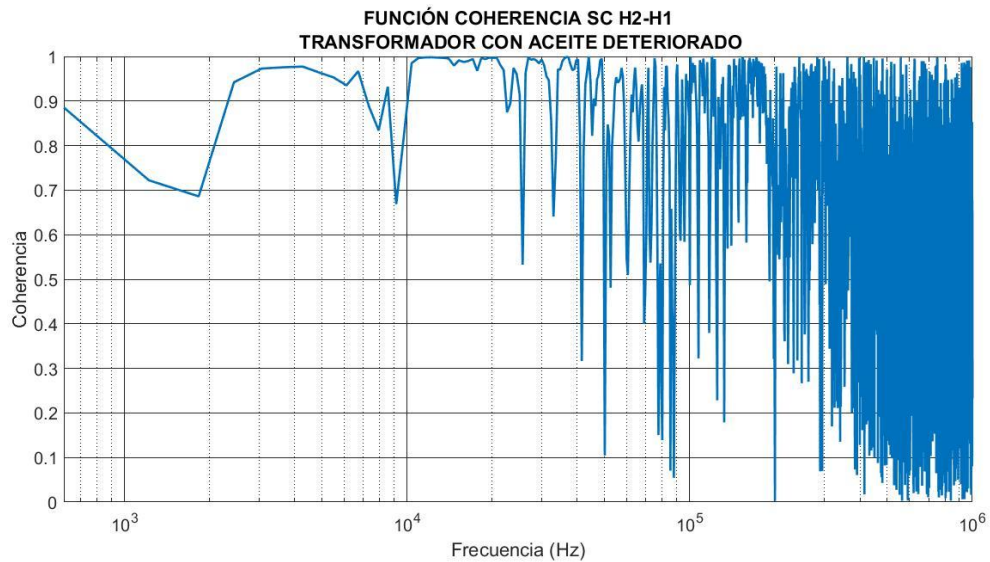


Figura 3.23. Coherencia. Tipo de prueba: SC H2-H1. Transformador con aceite deteriorado.

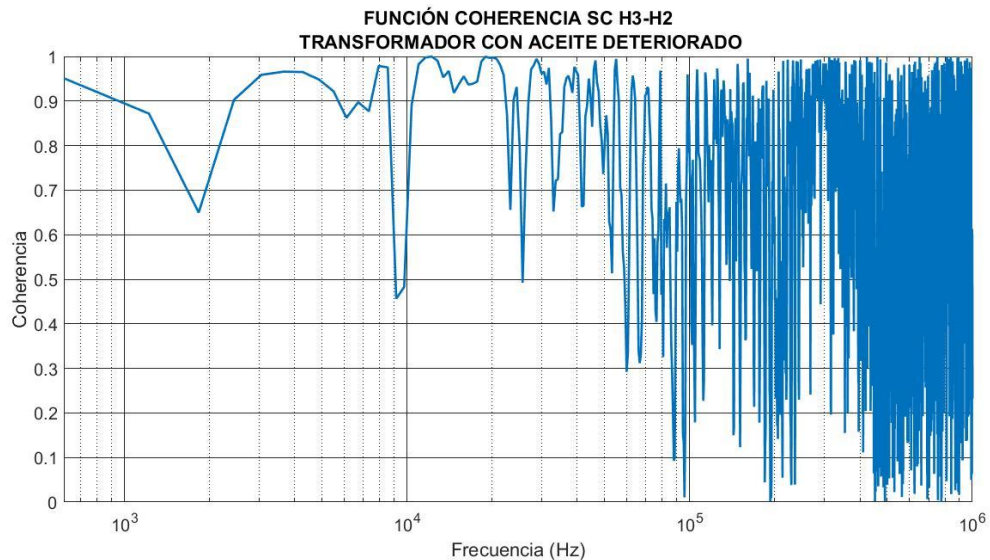


Figura 3.24. Coherencia. Tipo de prueba: SC H3-H2. Transformador con aceite deteriorado.

Las Figuras 3.22, 3.23 y 3.24 indican una función coherencia que varía notablemente en el rango de frecuencias, esto representa una repetitividad baja en este tipo de prueba, ya que al tener cortocircuitado el lado secundario, se tiene la influencia de una impedancia equivalente de gran valor con respecto al bobinado de alto voltaje, que se verá reflejada en la prueba.

Debido a que el aceite tiene un alto grado de humedad e impurezas, esto puede influir bastante en los resultados, por ejemplo, puede producir descargas parciales interiores que cambien la forma de las trazas en una misma fase medida.

Al cambiar el dieléctrico se presenta cambios notorios en las trazas de las respuestas en frecuencia de cada terminal, por ejemplo, la variación que se tenía antes con los picos de las antiresonancias disminuye, por ello las tres respuestas guardan una tendencia similar hasta aproximadamente 100 kHz, esto se puede observar en la Figura 3.25.

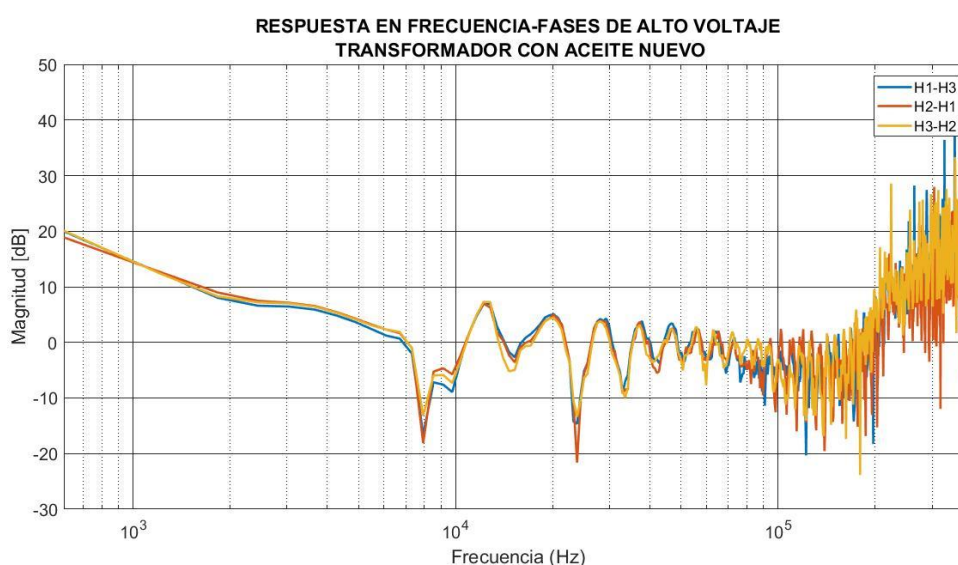


Figura 3.25. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: SC fases de alto voltaje (H1-H3, H2-H1, H3-H2). Transformador con aceite nuevo.

Para tener una mejor idea del efecto del cambio de aceite se calcula la función coherencia para evaluar el límite de frecuencia en el cual se puede realizar comparaciones con resultados veraces en este nuevo estado del transformador.

En la Figura 3.26 se presenta la función coherencia obtenida a partir de dos respuestas obtenidas del mismo terminal, se observa que la función tiene un valor cercano a la unidad hasta un valor de frecuencia aproximado de 7kHz.

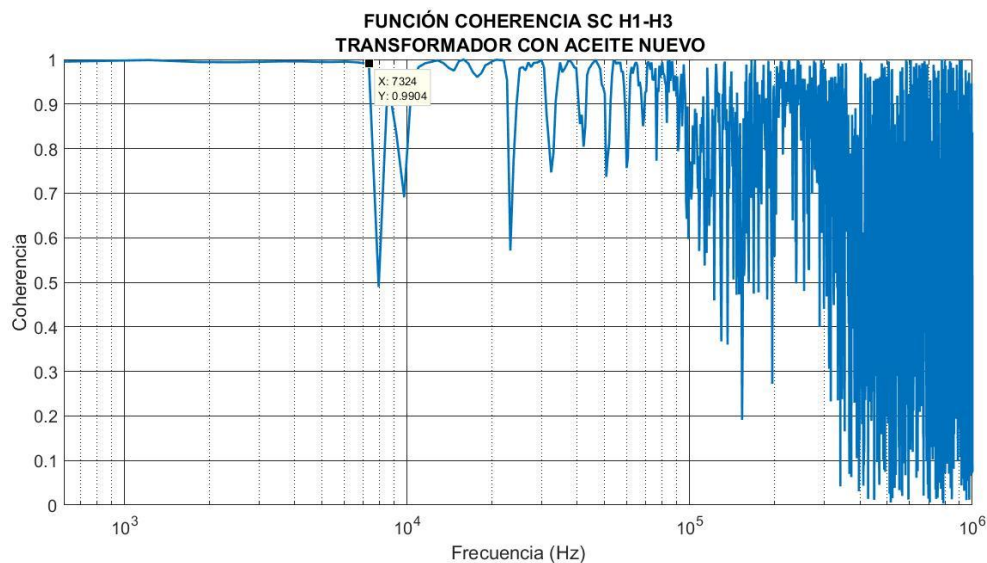


Figura 3.26. Coherencia. Tipo de prueba: SC H1-H3. Transformador con aceite nuevo.

Para las demás fases se obtuvieron resultados similares, en cuanto al valor calculado de la función coherencia obtenida en los demás terminales, esto se puede observar en las Figuras 3.27 y 3.28. La función obtiene un valor cercano a la unidad hasta aproximadamente 7 kHz en ambos terminales.

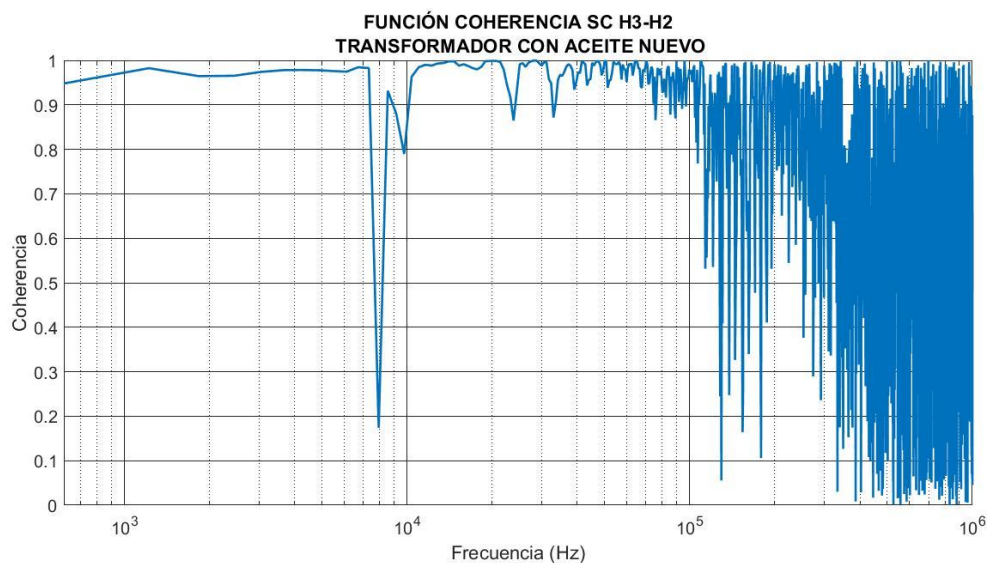


Figura 3.27. Coherencia. Tipo de prueba: SC H2-H1. Transformador con aceite nuevo.

Se observa que el efecto de la impedancia equivalente del cortocircuito en bajo voltaje afecta a la repetitividad de la medida, pues la función coherencia refleja discordancias entre respuestas obtenidas en la misma fase y bajo el mismo estado representativo.

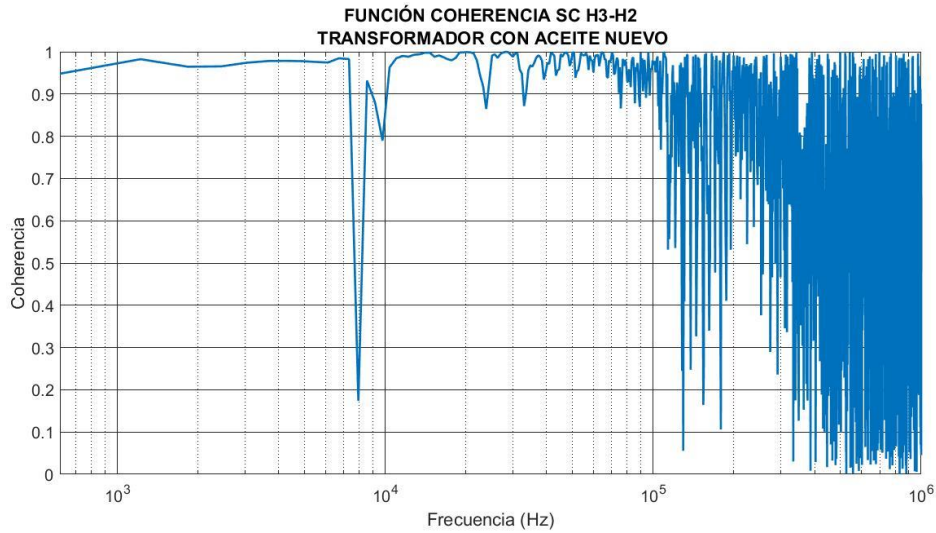


Figura 3.28. Coherencia. Tipo de prueba: SC H2-H1. Transformador con aceite nuevo.

3.2.3.1 Comparación Entre Estados

Al comparar las trazas de cada fase y en cada estado, se observa que la respuesta obtenida una vez cambiado el dieléctrico se desplaza en magnitud, a manera de ejemplo se presenta la Figura 3.29.

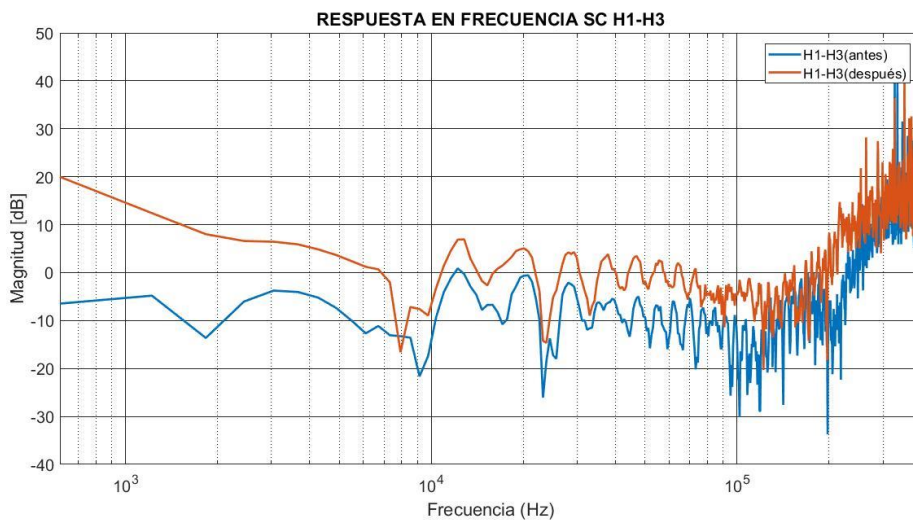


Figura 3.29. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: SC H1-H3.

En la Figura 3.29 se muestra la comparación de las respuestas en frecuencia de cada estado (antes y después) del aceite dieléctrico para el terminal H1-H3, se aprecia que tiene un aumento en la magnitud de la traza de la respuesta en frecuencia una vez cambiado el aceite, sin embargo, esta conclusión sería válida en bajas frecuencias hasta un límite de 7

kHz debido a su bajo nivel de repetitividad como se vio en el cálculo de la función coherencia.

Para las demás fases se obtuvieron resultados similares en los cuales el cambio del aceite refleja un desplazamiento en magnitud de la respuesta en frecuencia.

3.2.4 Tipo de prueba: Entre Devanado o Entrelazado Capacitivo (IC)

Este tipo de prueba se considera como una medición transferida, es decir que los terminales involucrados en la medición no corresponden al mismo nivel de voltaje; se realiza entre dos devanados aislados eléctricamente, se inyecta la señal de origen al terminal en alto voltaje y midiendo su respuesta en el respectivo terminal de bajo voltaje, con todos los demás terminales desconectados, siendo estas mediciones de naturaleza capacitiva en bajas frecuencias [19].

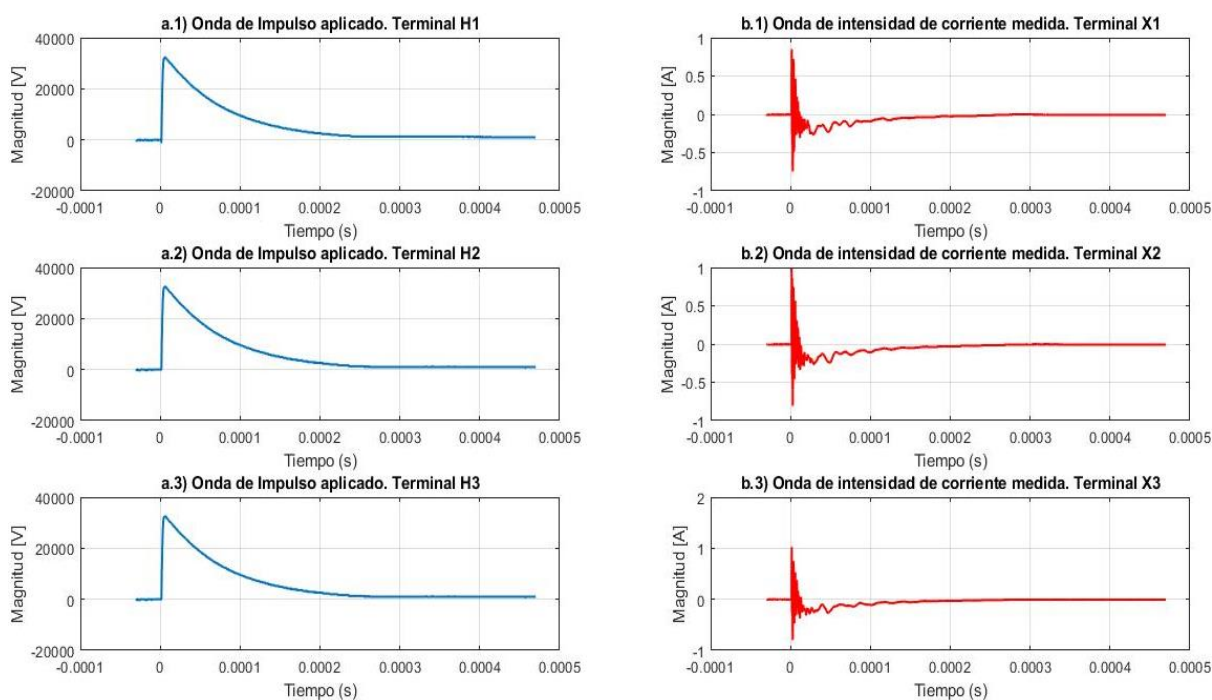


Figura 3.30. Ondas de voltaje de impulso (a.1, a.2, a.3) y corriente medidas (b.1, b.2, b.3) con ORC. Tipo de prueba: IC grupos-terminales (H1-X1, H2-X2, H3-X3).

En la Figura 3.30 se presentan las ondas muestreadas bajo esta configuración, se observa que el impulso conserva la forma estandarizada 1.2/50 μ s. Por otra parte, las señales de corriente medidas en los terminales de bajo voltaje se puede apreciar que guardan similitud, sin embargo, una vez obtenido los espectros en función de la frecuencia se puede observar cierta diferencia.

Se observa en la Figura 3.31 la respuesta en frecuencia de la prueba de entrelazado capacitivo del transformador con aceite deteriorado.

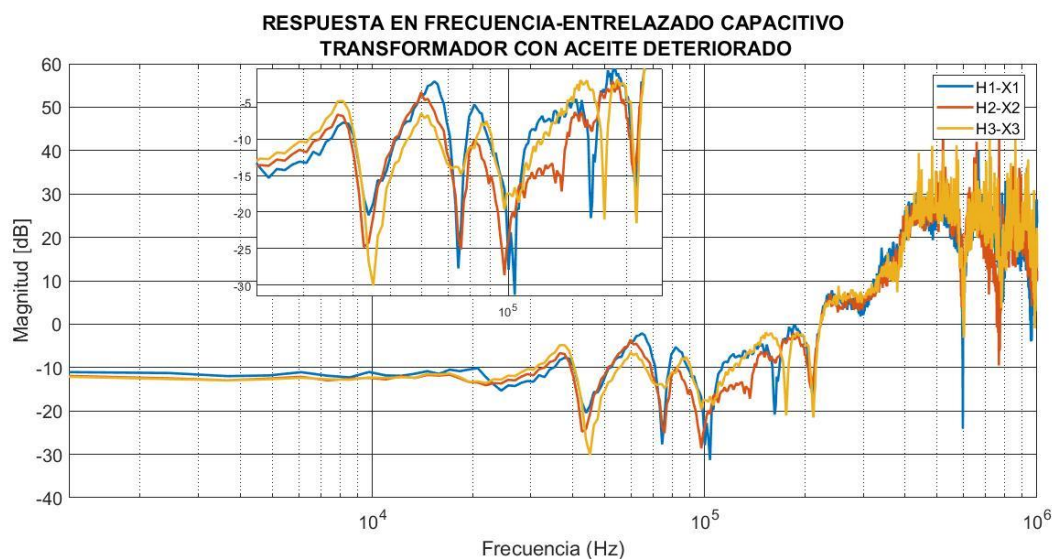


Figura 3.31. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: IC (H1-X1, H2-X2, H3-X3). Transformador con aceite deteriorado.

Se observa que la respuesta en frecuencia obtenida difiere en cada fase, esto en cuanto a la magnitud de los picos de resonancia y antiresonancia de las trazas, sin embargo, conservan una forma similar las tres respuestas. En [16] el autor indica que, normalmente comparando las funciones de transferencias obtenidas de mediciones capacitivas de las fases de un mismo transformador, estas deberían ser idénticas ya que tienen la misma posición y características en el transformador.

Analizando las gráficas obtenidas se puede apreciar que en el rango de 1kHz a 10 kHz, se observa cierta linealidad con una diferencia de magnitud entre las gráficas, como se mencionó anteriormente la influencia de la capacitancia entre devanados está dominada a bajas frecuencias [19], por ello en este rango se puede analizar la misma, ya que en altas frecuencias tenemos resonancias que pueden ser influenciadas por la inductancia y resistencia de los devanados.

Al igual que en las pruebas anteriores se realiza el cálculo de la función coherencia de la respuesta obtenida del transformador con dieléctrico deteriorado, el resultado para cada grupo terminal se presenta en las figuras 3.33, 3.34 y 3.35

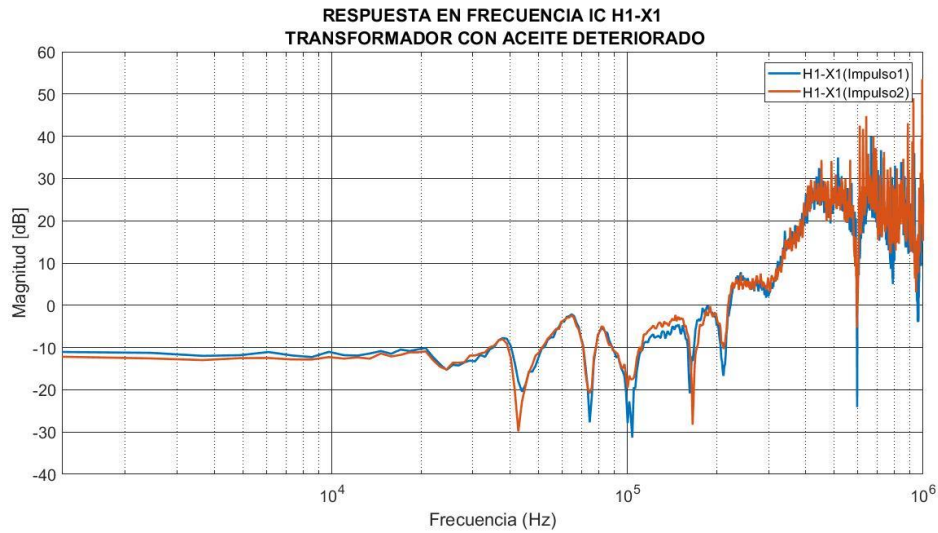


Figura 3.32. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: IC H1-X1. Transformador con aceite deteriorado.

En la Figura 3.32 se presenta las respuestas en frecuencia sobrepuestas de dos impulsos en el mismo grupo terminal, estas se usan para el cálculo de la función coherencia del grupo H1-X1.

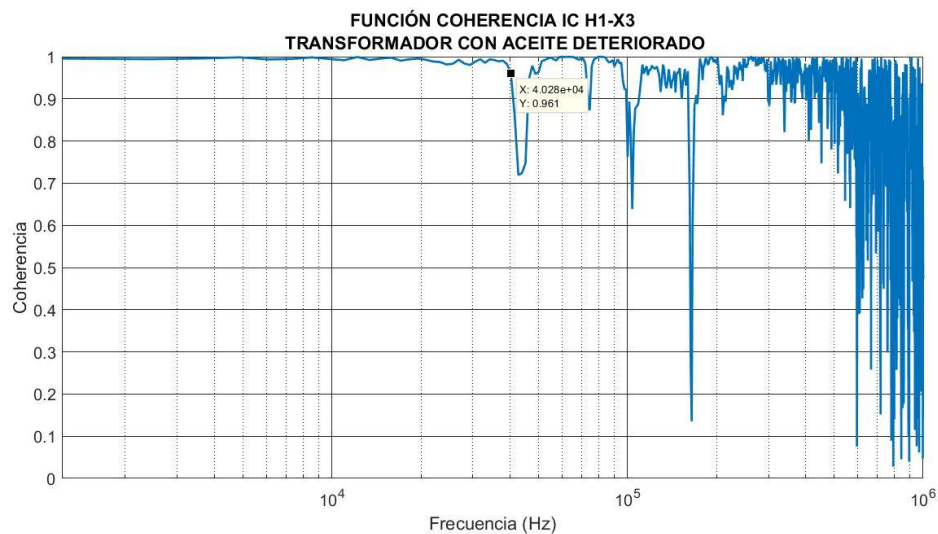


Figura 3.33. Coherencia. Tipo de prueba: IC H1-X1. Transformador con aceite deteriorado.

El cálculo de la coherencia obtenido de los datos del impulso aplicado y corriente medida al grupo H1-X1, se muestra en la Figura 3.33. Se observa que el valor de la función coherencia tienen un valor cercano a la unidad hasta el valor de 40 kHz, un resultado similar se tiene en el siguiente grupo H2-X2, como se observa en la Figura 3.34.

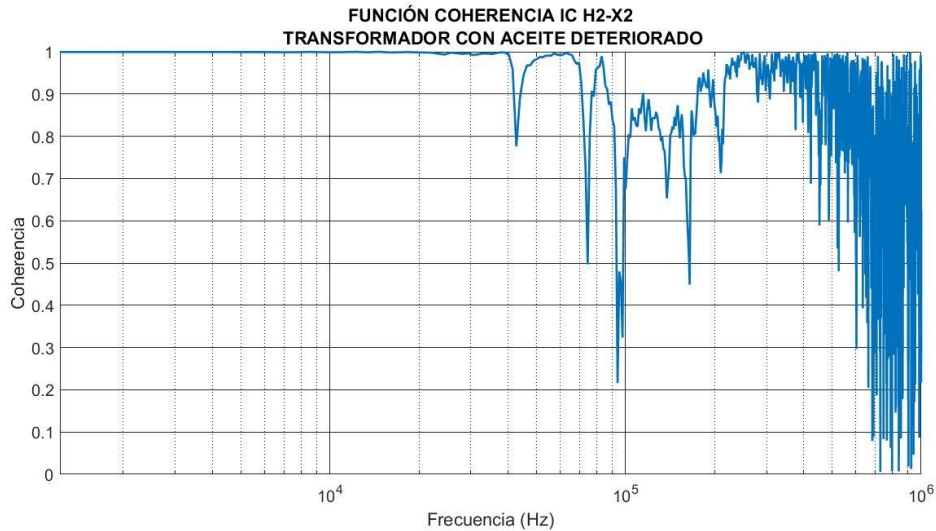


Figura 3.34. Coherencia. Tipo de prueba: IC H2-X2. Transformador con aceite deteriorado.

Para el caso del grupo H3-X3 se tiene que el valor de la función coherencia tiene un valor cercano a la unidad hasta aproximadamente 140 kHz, esto se observa en la Figura 3.35.

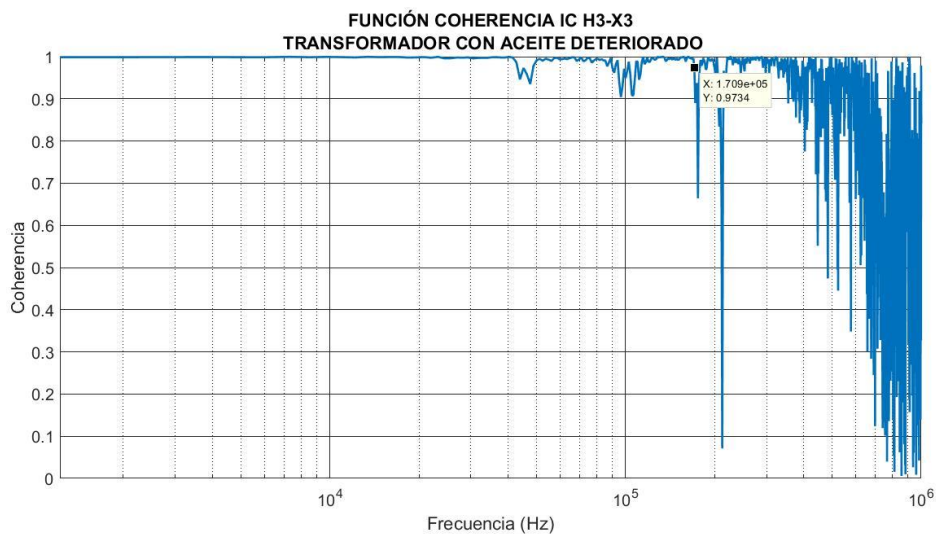


Figura 3.35. Coherencia. Tipo de prueba: IC H3-X3. Transformador con aceite deteriorado.

Como se dijo, en esta prueba predomina la característica capacitiva del aislante, ya que se mide prácticamente el medio que se encuentra entre devanados de alto y bajo voltaje, sin embargo, se debe tomar en cuenta que el medio al ser dieléctrico tiene una rigidez compuesta no solo del aceite dieléctrico sino también del papel y cartón aislante entre bobinados, por lo que la respuesta obtenida no depende solo del aceite sino del conjunto papel-aceite del transformador.

La variación obtenida de la función coherencia entre los grupos puede dar una referencia de que la rigidez dieléctrica del papel impregnado varía entre grupos terminales, es decir, se podría tener un grado de envejecimiento diferente del papel impregnado en cada fase, esto por la presencia de humedad concentrada y otros factores en el aceite que reducen la vida útil del papel.

Por otra parte, al cambiar el dieléctrico deteriorado del transformador, y aplicando la misma metodología para la obtención de la respuesta en frecuencia se obtiene los siguientes resultados.

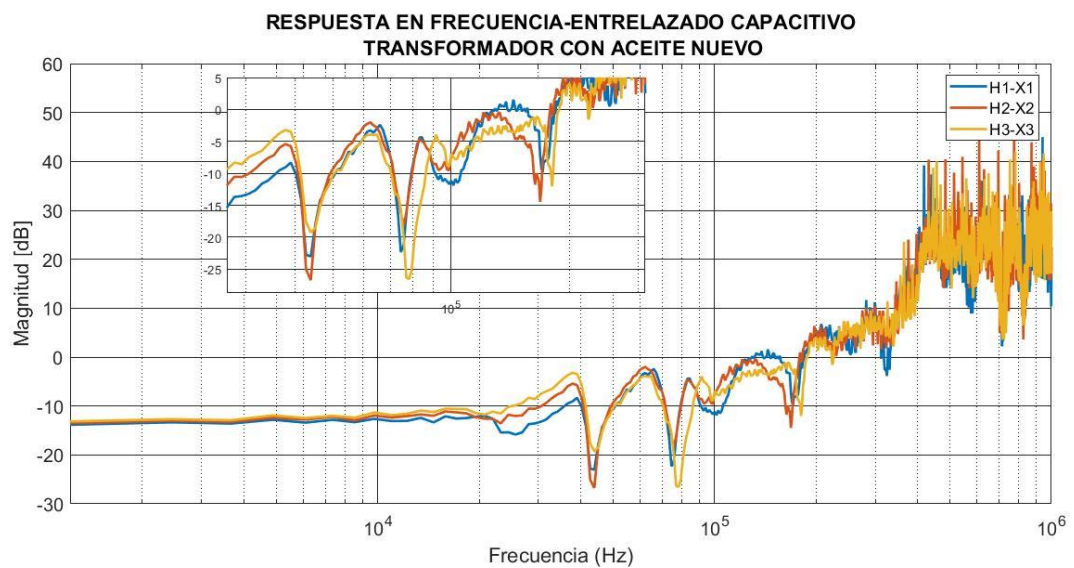


Figura 3.36. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: IC (H1-H3, H2-H1, H3-H2).
Transformador con aceite nuevo.

Se presenta en la Figura 3.36 la respuesta en frecuencia obtenida de los tres grupos (H1-X1, H2-X2, H3-X3) en la prueba de entrelazado capacitivo una vez cambiado el dieléctrico, se observa una notable mejoría en cuanto al solapamiento entre las trazas, es decir tienen una tendencia similar, en un rango más amplio de frecuencias a comparación con la respuesta obtenida con el aceite deteriorado, sin embargo, aún se tiene diferencias en las magnitudes de los picos de resonancia y antirresonancia de las respuestas.

Al igual que en las pruebas anteriores se presenta la función coherencia calculada a partir de dos impulsos inyectados en cada grupo, para ver hasta qué valor de frecuencia se puede tener una respuesta veraz.

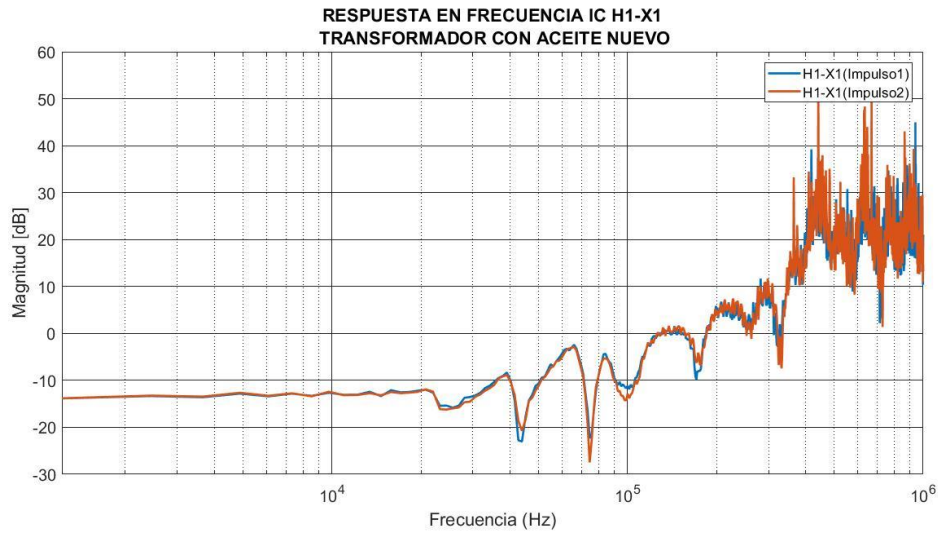


Figura 3.37. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: IC H1-X1. Transformador con aceite nuevo.

En la Figura 3.37 se observan las respuestas obtenidas de dos impulsos, se aprecia que se solapan entre sí en la mayoría de la traza, sin embargo, se tiene que en los puntos de antirresonancia se presenta una pequeña variación, en [24] menciona que debido a la existencia de fuentes de error (digitalizador, ruido ambiental, capacitancias parasitas) en la medición experimental de FRA, esto puede llevar a que dos mediciones consecutivas no presenten respuestas idénticas por lo que propone el uso de bandas de tolerancia como un complemento al uso de la función coherencia, estas bandas no se aplica en este estudio ya que el objetivo no es evaluar la respuesta de dos mediciones consecutivas, sino evaluar los cambios que se presenten al comparar respuestas representativas de diferentes estados.

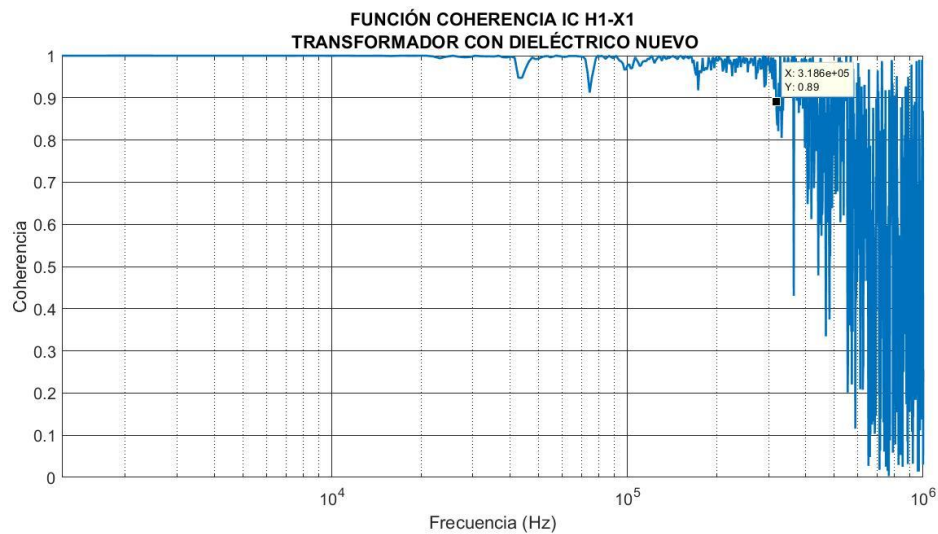


Figura 3.38. Coherencia. Tipo de prueba: IC H1-X1. Transformador con aceite nuevo.

En la Figura 3.38 se presenta la función coherencia del grupo H1-X1 una vez cambiado el aceite, se observa que esta tiene un valor cercano a la unidad hasta un valor de frecuencia de 300 kHz.

Por otra parte, se presenta en las Figuras 3.39 y 3.40 la función coherencia calculada para los demás grupos terminales, se observa que tienen disminuciones puntuales significativas del valor de la coherencia, sin embargo, no se puede concluir que esto sea debido a un cambio interno del transformador medido, sino más bien a un posible error en la medición de las respuestas en frecuencias.

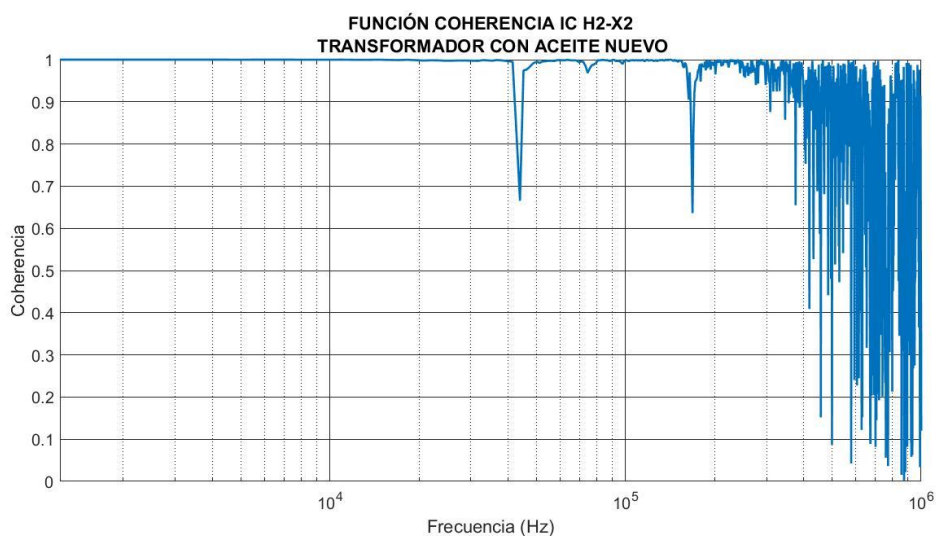


Figura 3.39. Coherencia. Tipo de prueba: IC H2-X2. Transformador con aceite nuevo.

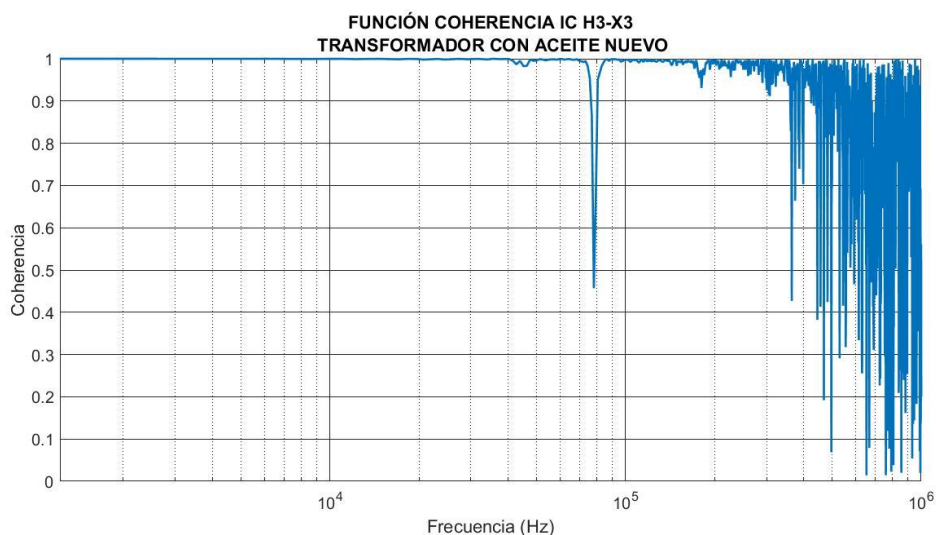


Figura 3.40. Coherencia. Tipo de prueba: IC H3-X3. Transformador con aceite nuevo.

En resumen, al cambiar el aceite dieléctrico la función coherencia mejora notablemente, es decir que el límite de frecuencia en el cual se puede obtener resultados fiables aumenta y por ello también el grado de repetitividad.

No se puede descartar que el papel impregnado tenga diferente grado de envejecimiento por fase, ya que la rigidez dieléctrica del aceite es menor que la de las fibras de papel; por otra parte, la permitividad del aceite es también menor. Por tanto, el aceite es el componente del sistema de aislamiento que se lleva la mayor parte del estrés eléctrico [28].

3.2.4.1 Comparación Entre Estados

Al comparar las gráficas obtenidas en los dos estados del transformador, se observa la influencia del estado del aceite dieléctrico en la respuesta en frecuencia. Los resultados de los grupos terminales del transformador se presentan en las Figuras 3.41, 3.42 y 3.43.

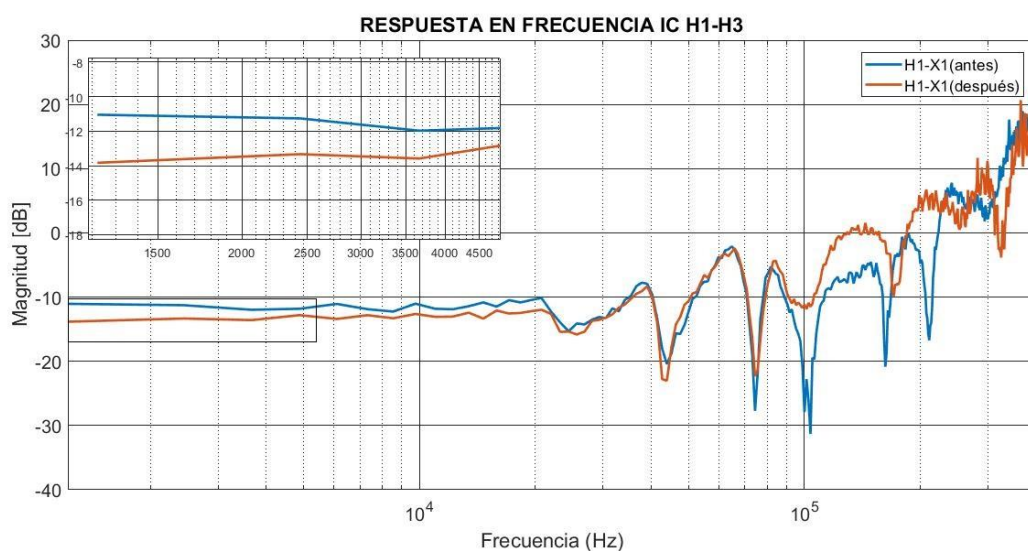


Figura 3.41. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: IC H1-X1.

En la Figura 3.41 se presenta las respuestas de la prueba de entrelazado capacitivo para los terminales H1-X1, antes y después del cambio del dieléctrico. Se observa que la forma de onda se mantiene hasta alrededor de los 100 kHz, sin embargo, la magnitud disminuye a bajas frecuencias, lo cual indicaría un cambio en la capacitancia entre los devanados de alto y bajo voltaje [19] ya que, al cambiar el aceite, cambia la permitividad del aislamiento.

También se tiene presente cambios notables en las gráficas alrededor de 100 kHz, ya que la gráfica aumenta en magnitud al igual que en la prueba de circuito abierto, señal de que hay un cambio en los parámetros del circuito RLC que representa al transformador.

La disminución en magnitud de la respuesta a bajas frecuencias, el aumento y cambio de la forma alrededor de los 100 kHz, indicaría que el aislamiento mejora debido al cambio del aceite deteriorado por uno nuevo.

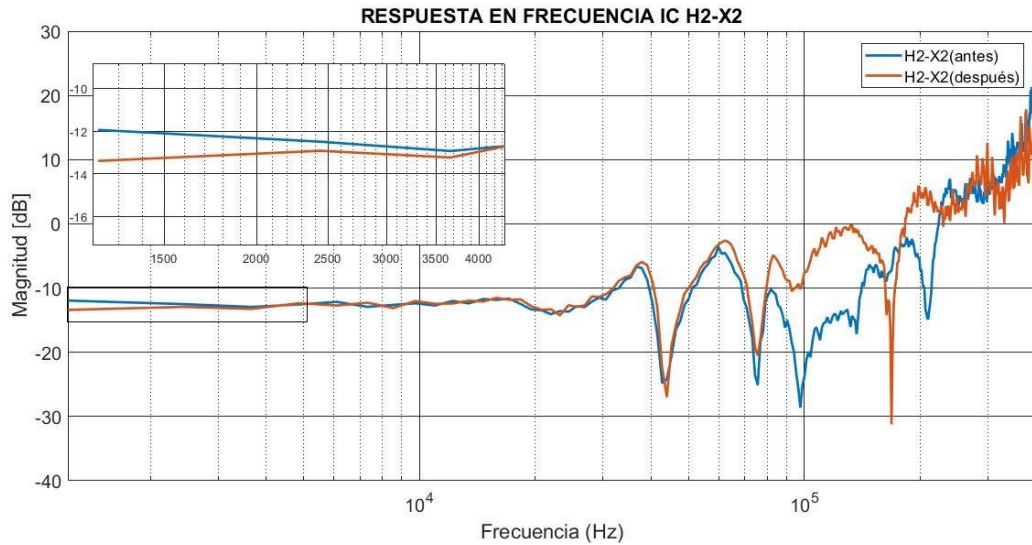


Figura 3.42. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: IC H2-X2.

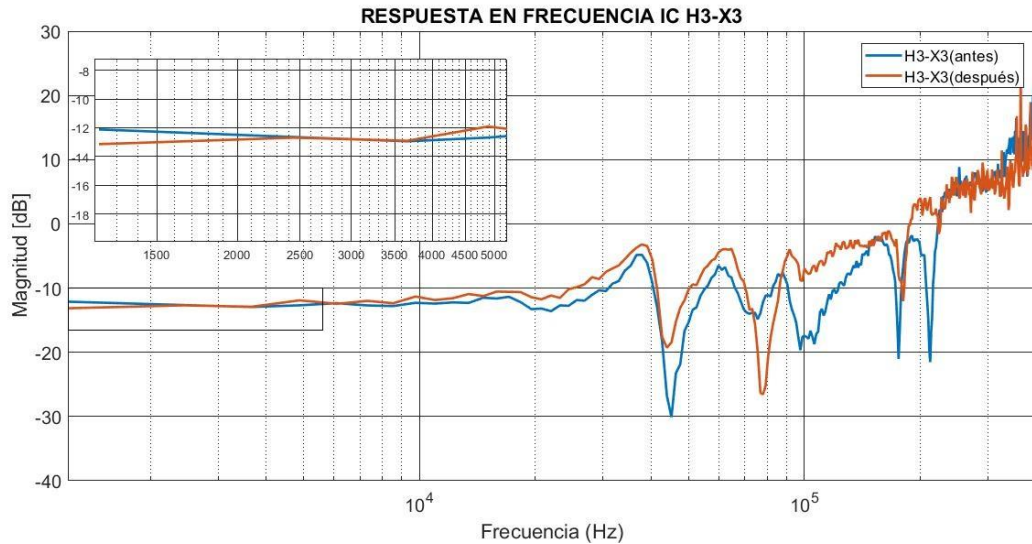


Figura 3.43. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: IC H3-X3.

Se obtuvieron resultados similares en los demás grupos terminales del transformador mediante la medición de entrelazado capacitivo, en las Figuras 3.42 y 3.43 se observan los cambios en magnitud descritos anteriormente. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que antes del cambio del aceite era difícil tener una respuesta igual al aplicar dos impulsos

consecutivos, por lo cual el transformador con aceite deteriorado no podría tener una respuesta única en ese estado al realizar una medición capacitiva, esto se observa también en la función coherencia calculada en ese estado.

3.2.5 Tipo de Prueba: Entre Devanado o Entrelazado Inductivo (EI)

La prueba de entrelazado inductivo es similar a la prueba capacitiva, excepto que los terminales abiertos de los bobinados medidos, primario y secundario están conectados a tierra. Los otros terminales de devanados no medidos se dejan flotando para evitar influencias no deseadas en la respuesta. En esta prueba, la señal de entrada debe ser suministrada en el terminal alto voltaje y medida en el terminal bajo voltaje. Al igual que en la prueba de entrelazado capacitivo, esta prueba tampoco se practica ampliamente [19].

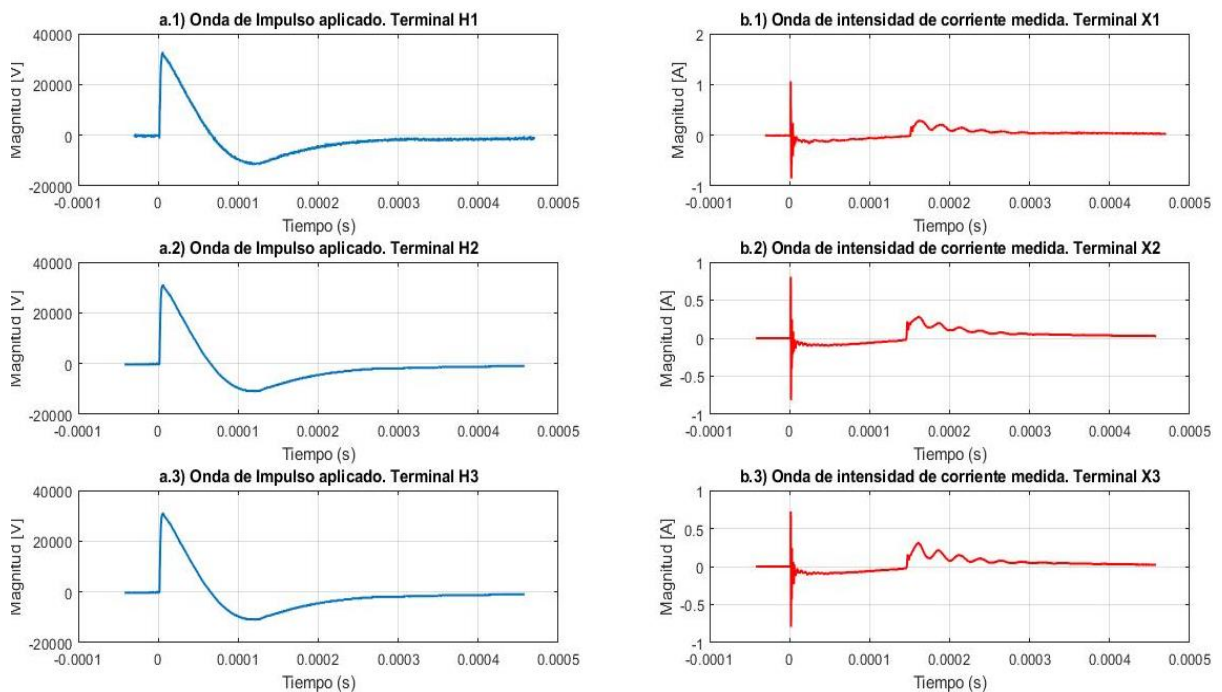


Figura 3.44. Ondas de voltaje de impulso (a.1, a.2, a.3) y corriente medidas (b.1, b.2, b.3) con ORC. Tipo de prueba: EI grupos-terminales (H1-X1, H2-X2, H3-X3).

Al igual que en las pruebas anteriores, en la Figura 3.44 se presenta las ondas muestreadas a través del osciloscopio del laboratorio, se observa que la señal inyectada presenta una oscilación en la cola del impulso, esto puede ser debido a la influencia del bobinado de bajo voltaje, tal y como se vio en la prueba de cortocircuito, sin embargo, aún conserva las características de un impulso estándar.

Una vez digitalizadas las señales de entrada y salida, se aplica la metodología para conseguir la respuesta en el dominio de la frecuencia, la Figura 3.45 muestra la respuesta en frecuencia de los tres grupos terminales del transformador antes del cambio de aceite

dieléctrico, se observa que la graficas mantienen una forma similar, sin embargo, varían notablemente en magnitud.

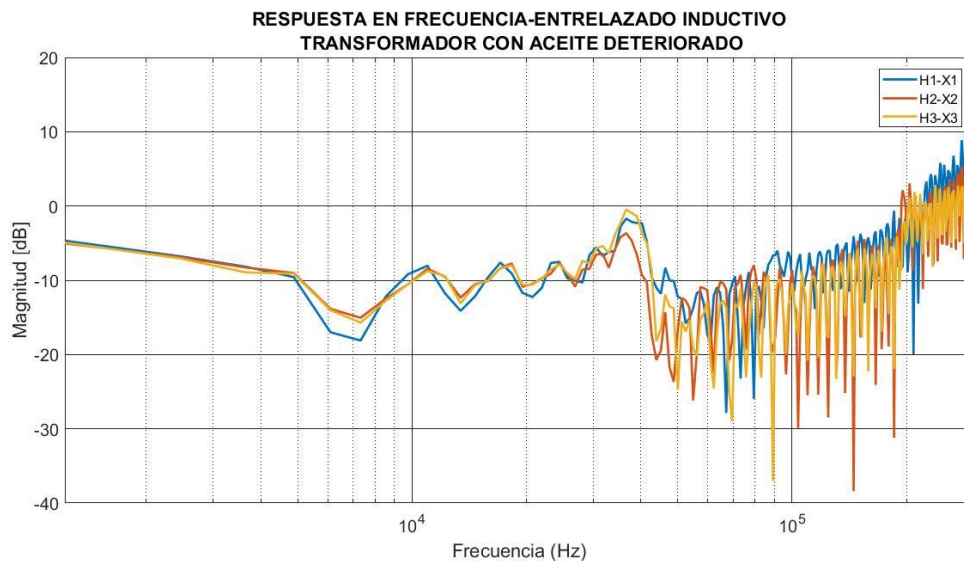


Figura 3.45. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: EI (H1-H3, H2-H1, H3-H2).
Transformador con aceite deteriorado.

Al igual que en las demás pruebas se verificó hasta que valor de frecuencia se puede considerar veraz la respuesta en este estado, por lo cual se calculó la función coherencia para cada grupo terminal.

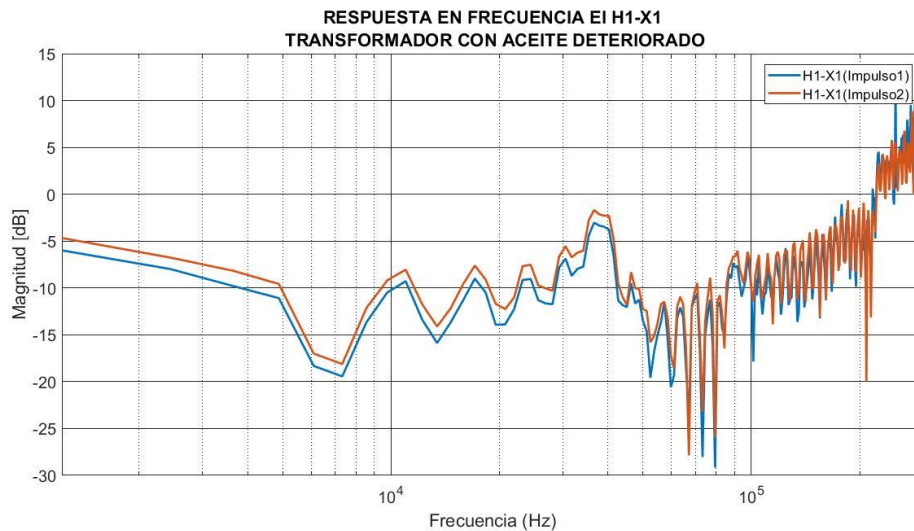


Figura 3.46. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: EI H2-X2. Transformador con aceite nuevo.

La Figura 3.46 presenta las respuestas en frecuencia de la aplicación de dos impulsos estándar en el grupo terminal H2-X2, se observa que tiene una pequeña variación en la

magnitud, esto puede ser debido a errores en la medición ya que no se tienen ningún cambio interno.

El cálculo de la función coherencia para el sistema anterior, se muestra en la Figura 3.47. Se observa que se tiene un valor de coherencia cercano a la unidad hasta aproximadamente 100 kHz con una pequeña disminución, que puede ser debido a errores en la medición.

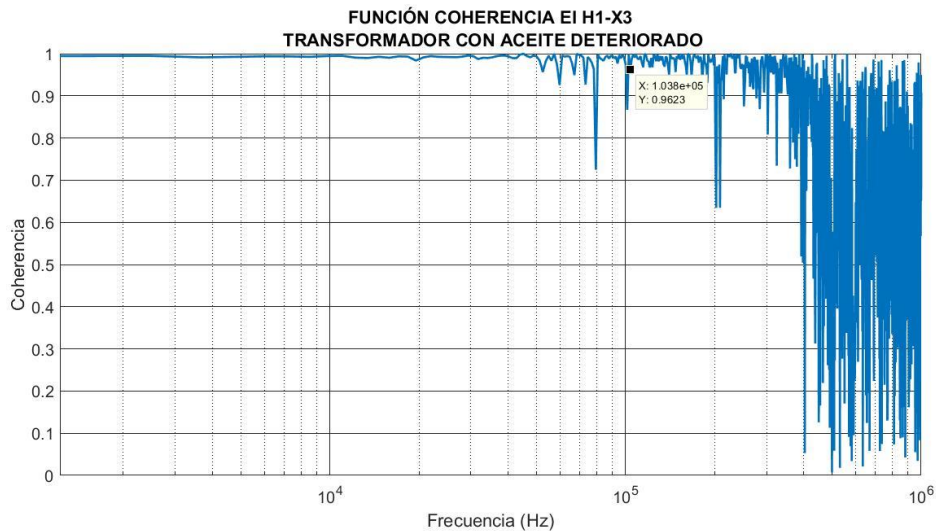


Figura 3.47. Coherencia. Tipo de prueba: EI H1-X1. Transformador con aceite deteriorado.

Para los demás grupos terminales (H2-X2 y H3-X3) se obtuvo un límite de frecuencia de alrededor de 43 kHz, esto se muestra en las Figuras 3.48 y 3.49.

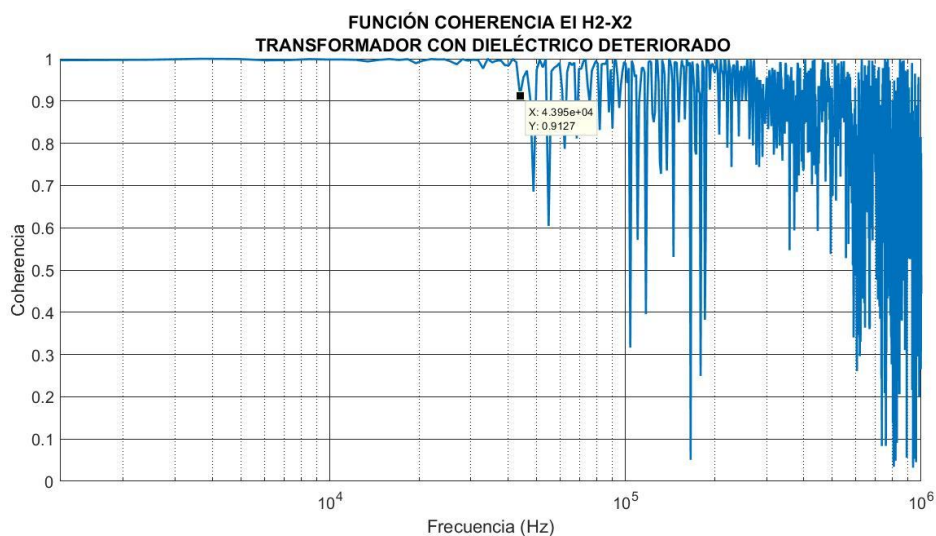


Figura 3.48. Coherencia. Tipo de prueba: EI H1-X1. Transformador con aceite deteriorado.

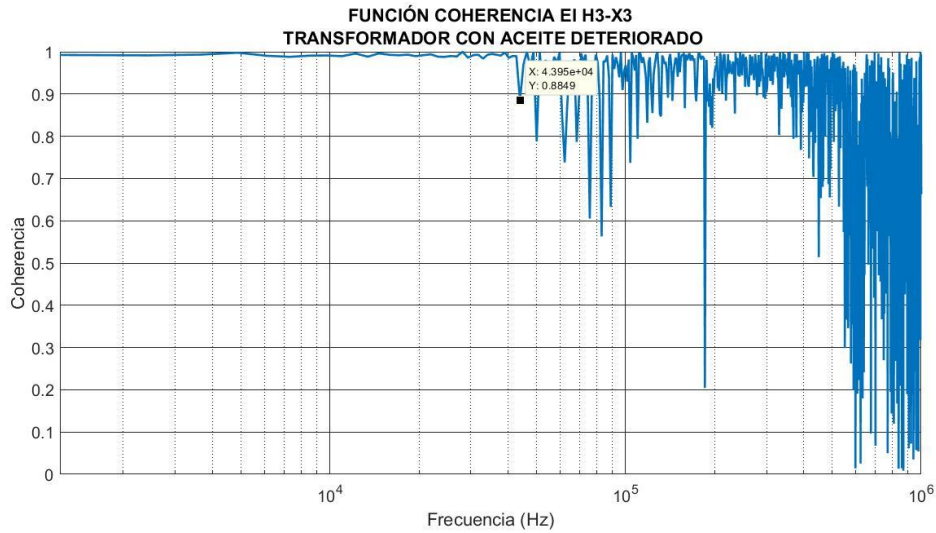


Figura 3.49. Coherencia. Tipo de prueba: EI H2-X2. Transformador con aceite deteriorado.

Los resultados obtenidos de la función coherencia nos indica un bajo grado de repetitividad, ya que no cubre el ancho de banda que se tienen al aplicar un impulso estándar, también a partir de 40 kHz en adelante se tendría la presencia de ruido que afecta la información obtenida.

Por otra parte, al cambiar el aceite dieléctrico contenido en el interior del transformador y aplicando la misma metodología se obtuvo cambios notorios en las respuestas en frecuencia en cada grupo terminal.

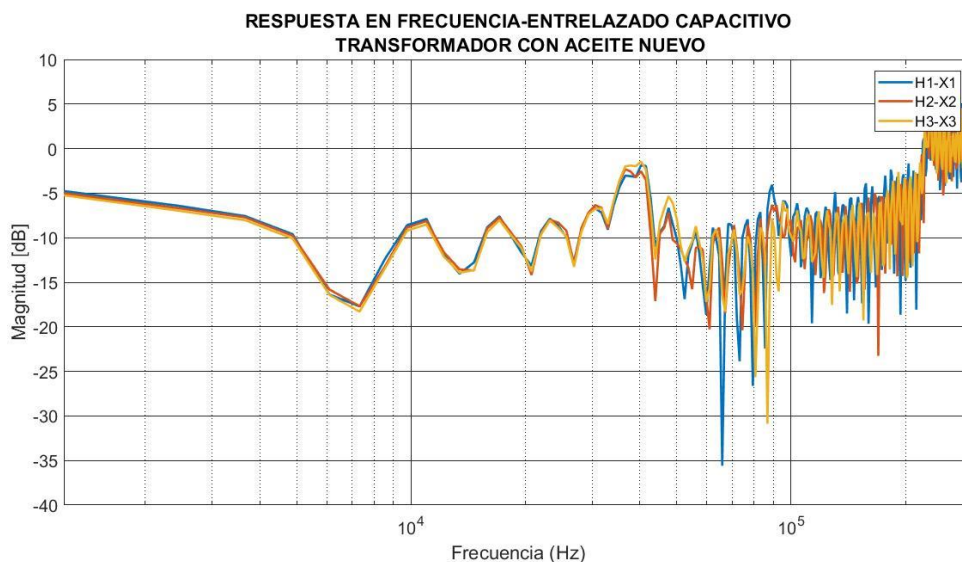


Figura 3.50. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: EI (H1-H3, H2-H1, H3-H2). Transformador con aceite nuevo.

La Figura 3.50 muestra las respuestas en frecuencia de los grupos terminales del transformador medidas una vez que se cambió el aceite, se aprecia que las tres respuestas mantienen la misma forma y magnitud, mejorando sus respuestas notablemente.

Como se calculó la función coherencia para las pruebas anteriores antes y después del cambio del aceite, también se calcula la función coherencia al cambiar el aceite bajo esta configuración, aplicando de igualmente dos impulsos para dicho calculo.

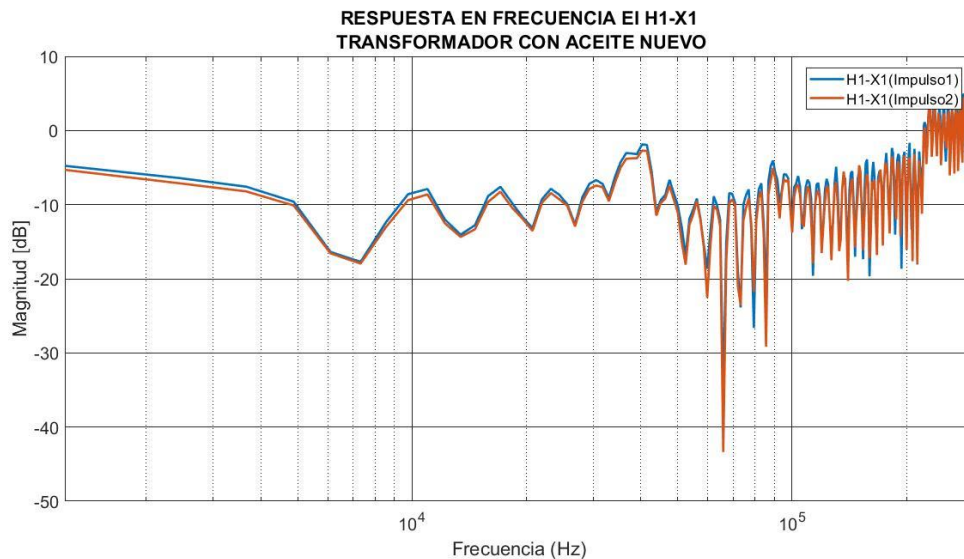


Figura 3.51. Respuesta en frecuencia. Tipo de prueba: EI H1-X1. Transformador con aceite nuevo.

La Figura 3.51 muestra a manera de ejemplo las respuestas en frecuencia de dos impulsos inyectados en el grupo terminal H1-X1 para el cálculo de la función coherencia, se observa que se mantiene la forma y magnitud en ambas respuestas, esto se refleja en la función coherencia mostrada en la Figura 3.52.

Se observa que el valor de la función coherencia mantiene un valor cercano a la unidad hasta aproximadamente 100 kHz, sin embargo, se presenta pequeñas variaciones de la función antes vistas en la Figura 3.47, esto para el grupo terminal H1-X1.

Por otra parte, en las Figuras 3.53 y 3.54 se presenta el valor calculado de la función coherencia para los demás grupos terminales, se aprecia un notable cambio ya que su valor se acerca a la unidad hasta aproximadamente 100 kHz, es decir el límite de frecuencia hasta el cual se puede evaluar las trazas aumenta en comparación a los resultados del anterior estado del transformador.

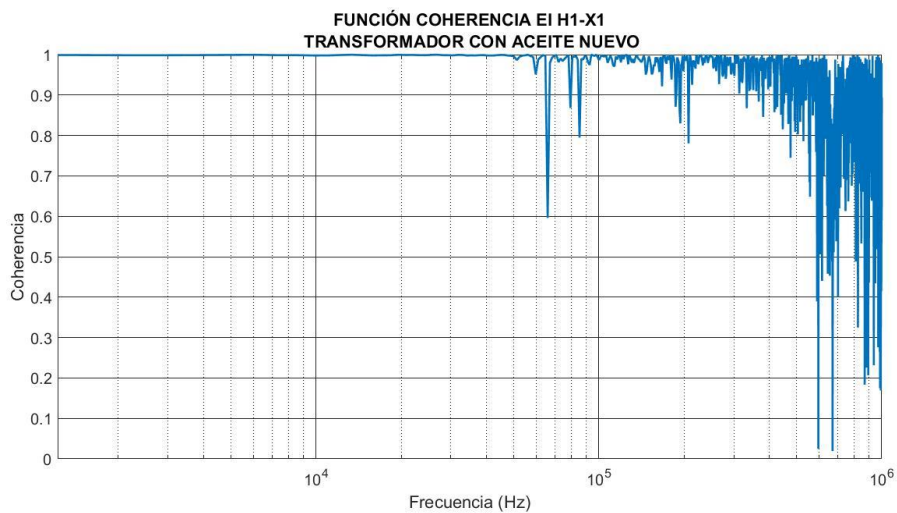


Figura 3.52. Coherencia. Tipo de prueba: EI H1-X1. Transformador con aceite nuevo.

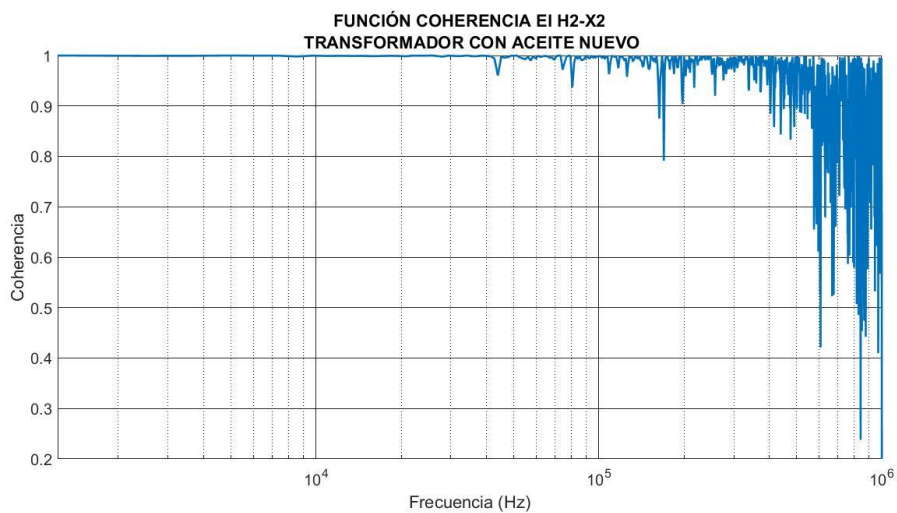


Figura 3.53. Coherencia. Tipo de prueba: EI H2-X2. Transformador con aceite nuevo.

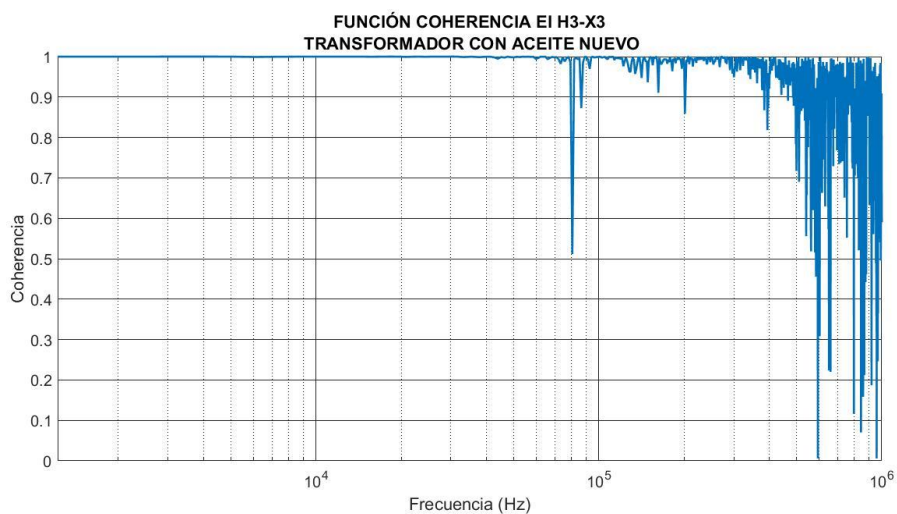


Figura 3.54. Coherencia. Tipo de prueba: EI H3-X3. Transformador con aceite nuevo.

3.2.5.1 Comparación Entre Estados

Al comparar las trazas de cada grupo terminal y en cada estado, se observa la influencia del estado del aislamiento en la medición de entrelazado inductivo en la respuesta en frecuencia de cada grupo terminal. Los resultados se presentan en las Figuras 3.55, 3.56 y 3.57.

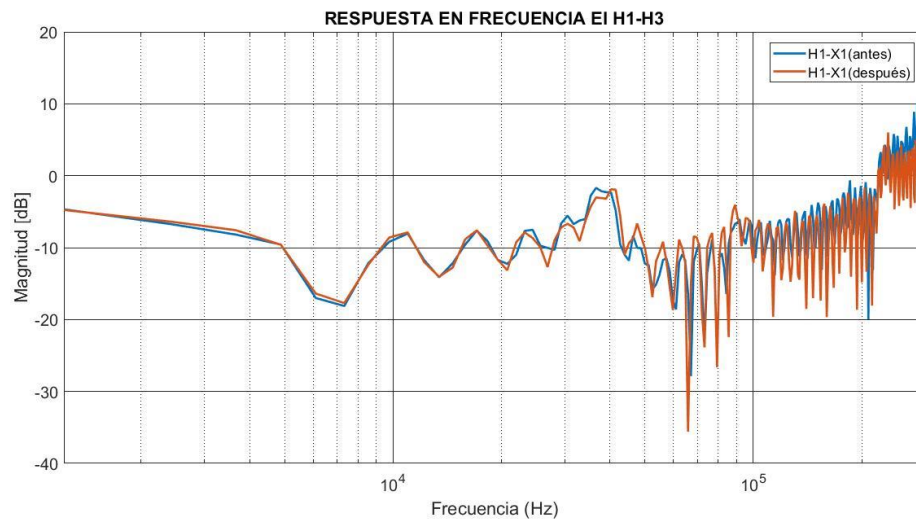


Figura 3.55. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: EI H1-X1.

La Figura 3.55 muestra la comparación entre respuestas del grupo H1-H1 para los dos estados del aislamiento, antes y después del cambio de aceite. Se observa que no tiene una notable variación en su traza.

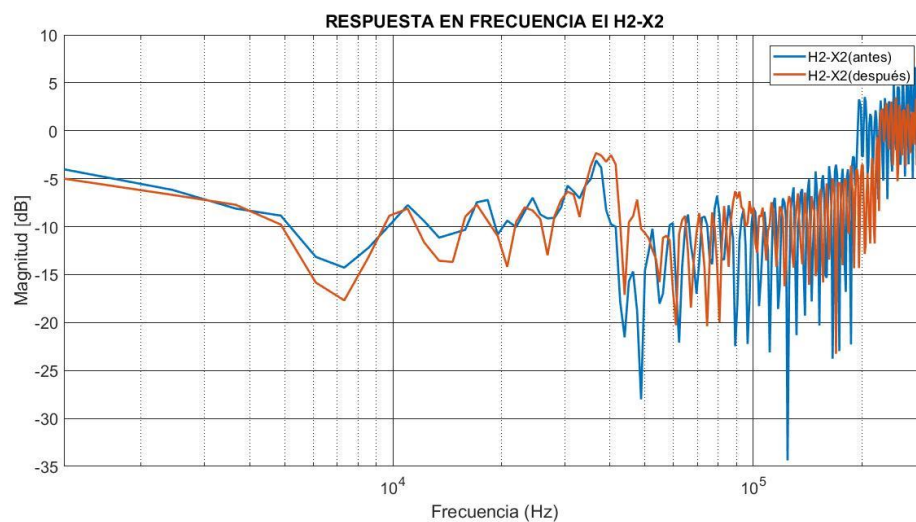


Figura 3.56. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: EI H2-X2.

Por otra parte, la Figura 3.56 muestra una disminución notable en la magnitud de la respuesta en frecuencia del grupo terminal H2-X2 una vez realizado el cambio del aceite.

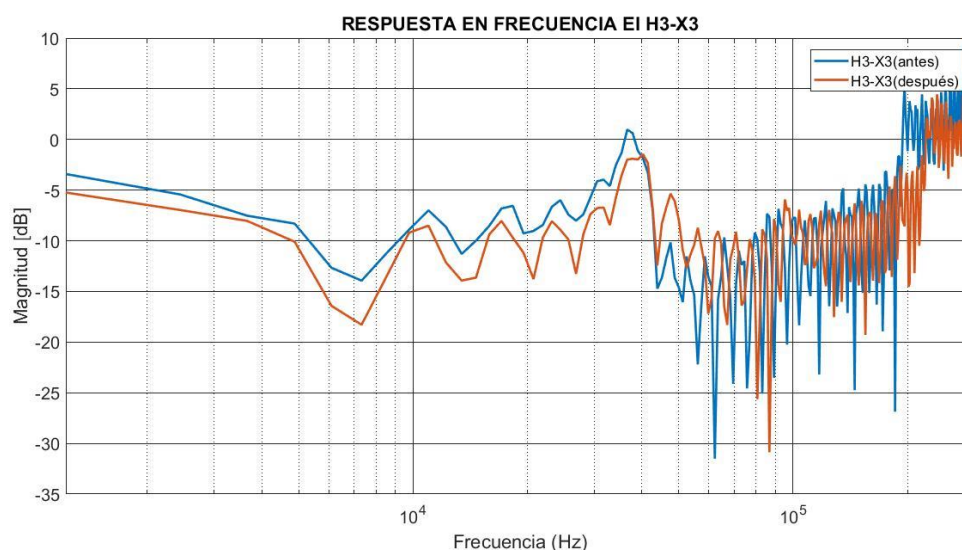


Figura 3.57. Comparación de estados de la respuesta en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: EI H3-X3.

Así también, se observa en la Figura 3.57 que se tiene una disminución en magnitud para la respuesta del grupo terminal H3-X3, por lo cual se puede notar que al mejorar el aislamiento mediante el cambio del aceite se tienen una disminución en magnitud de la respuesta en frecuencia para la medición de entrelazado inductiva.

3.3 Evaluación del Aislamiento a Partir de las Mediciones IFRA

3.3.1 Porcentaje de Cambio de Capacitancia

Los cambios en el aislamiento interno del transformador debido a la humedad y otros residuos presentes en el conjunto aceite-papel impregnado pueden influir en gran medida en las mediciones FRA [18]. Una manera de cuantificar estos cambios debido al envejecimiento del aislamiento interno, es el cálculo del porcentaje de cambio de capacitancia a partir de mediciones de respuesta en frecuencia.

Se calculó el porcentaje de cambio de capacitancia $\Delta C_{21} \%$ en el aislamiento de cada fase de alto voltaje a partir de la respuesta en frecuencia obtenida en la medición de circuito abierto en alto voltaje, antes y después del cambio del aceite dieléctrico.

Se utiliza la repuesta en frecuencia de la medición de circuito abierto para cada estado representativo del aislamiento, deteriorado y aceite nuevo, ya que, de las pruebas

realizadas, esta prueba cubre un rango de análisis para ambos estados de hasta 100 kHz, tal como se calculó en la función coherencia.

Para determinar el porcentaje de cambio de capacitancia, se toman las frecuencias de las resonancias y las antiresonancias seleccionadas para el cálculo mediante la ecuación 2.13. Las frecuencias seleccionadas son las que tienen los máximos picos de resonancia y antiresonancia, esto se observa en la Figura 3.58. El porcentaje de cambio de capacitancia y el valor promedio se proporcionan en la Tabla 3.8.

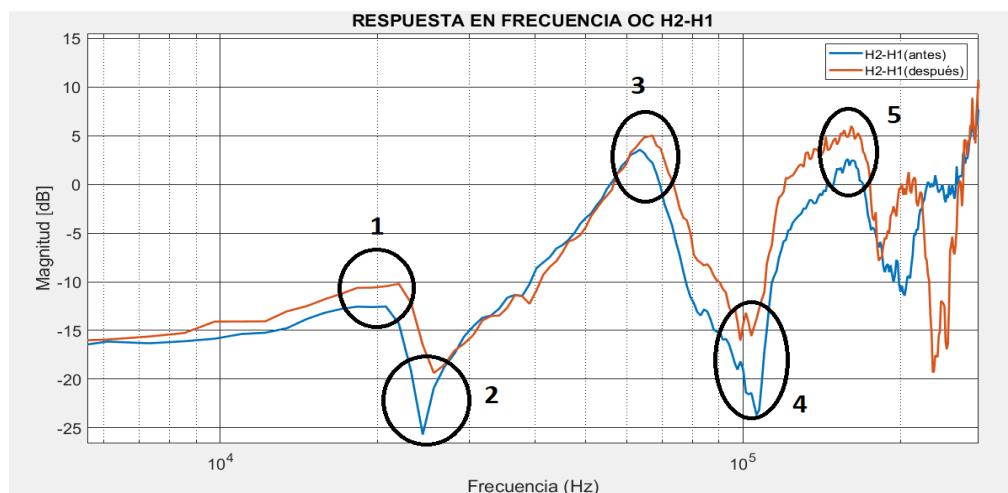


Figura 3.58. Respuestas en frecuencia. Transformador ELIN 50 kVA 230/6000V. Tipo de prueba: OC H2-H1.

Tabla 3.8. Porcentaje de cambio de capacitancia. Prueba de Circuito Abierto A.V.

	H1-H3			H2-H1			H3-H2		
	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	ΔC_{21} (%)	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	ΔC_{21} (%)	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	ΔC_{21} (%)
1	18.310	18.310	0	20.750	21.970	-10.797	17.090	17.090	0
2	24.410	24.410	0	24.410	25.630	-9.29	20.750	21.970	-10.79
3	62.260	64.700	-7.4	64.700	67.140	-7.136	61.040	62.260	-3.88
4	101.300	108.600	-12.99	106.200	103.800	4.677	85.450	93.990	-17.346
5	163.360	174.600	-12.46	158.700	161.100	-2.95	162.400	159.900	3.15
Promedio			-6.57%	Promedio		-5.099%	Promedio		-5.773%

Se observa que el porcentaje de cambio de capacitancia en cada devanado de alto voltaje disminuye en rangos distintos, esto puede ser debido a la forma de construcción del transformador, ya que las capacidades efectivas entre bobinas y capas podrían variar por

diferentes proporciones de papel impregnado, por lo tanto, el cambio de humedad en el aislamiento del papel afecta las respuestas de devanado de las fases de forma diferente.

En [19] se presenta la aplicación de esta metodología para el cálculo del porcentaje de cambio de capacitancia del aislamiento a partir de mediciones FRA de cortocircuito, el autor evalúa el cambio que se produce debido al envejecimiento del aislamiento de un transformador monofásico de 16 kVA sumergido en aceite. En el ejemplo mencionado, el transformador fue sometido a un proceso eléctrico y térmico de envejecimiento acelerado durante un periodo de tiempo igual a 28 días, se examina el cambio utilizando mediciones FRA y FDS cada siete días. Sus resultados fueron que, al exponer el aislamiento del transformador a un proceso de envejecimiento, el porcentaje de cambio de capacitancia aumenta al final de dicho proceso, lo cual comprueba los resultados obtenidos en la Tabla 3.8 ya que al cambiar el aceite dieléctrico se realiza un proceso contrario a “envejecer” o deteriorar el aislamiento conformado por aceite y papel impregnado, ya que se tiene que el porcentaje de cambio de capacitancia del aislamiento de cada fase disminuye notablemente cuando mejora el aislamiento.

En [19] se hace mención que las capacitancias que intervienen en la ecuación 2.13, solo considera la capacitancia real ya que la capacitancia imaginaria solo afecta la magnitud de la resonancia y no la frecuencia, por ello, el cambio de porcentaje de capacitancia es una aproximación del cambio de la parte real de la capacitancia.

3.3.2 Capacitancia Calculada de la Prueba de “Entrelazado Capacitivo”

Se obtuvo un promedio de la parte real de la capacitancia compleja mediante la respuesta en frecuencia de la prueba de entrelazado capacitivo para cada grupo terminal y en cada estado representativo del aislamiento. Los resultados se presentan en la Tabla 3.9.

La ecuación 2.15 se utiliza para calcular la capacitancia entre devanados a partir de las respuestas de frecuencia por debajo de 3 kHz; este límite se escogió debido a que en [19] utiliza la respuesta obtenida por debajo de 1 kHz, pues la influencia de la capacitancia entre devanados está dominada a bajas frecuencias, en dicha referencia toma 75 puntos de datos para el promedio de la capacitancia.

Como se observó en la traza obtenida de la respuesta impulsiva en la prueba capacitiva, el rango de frecuencia parte de un valor alrededor de 10^3 Hz, por lo cual sobrepasa el límite del ejemplo en [19], sin embargo, se calcula tomando los 3 primeros datos correspondientes a un rango de hasta 3 kHz pues según [8] para fenómenos transitorios mayores a 3kHz se utiliza modelos de parámetros más complejos en comparación a los de

parámetros concentrados , es decir hasta ese valor de frecuencia sería válido el circuito que representa la capacitancia entre devanados mostrado en la figura 2.32.

Las Figuras 3.59, 3.60 y 3.61 muestran la capacitancia en función de la frecuencia para cada grupo terminal, se observa que al mejorar el aislamiento con el cambio de aceite deteriorado por uno nuevo se tiene una disminución en el valor de la capacitancia medida, lo cual indica también un cambio en la permitividad del medio aislante.

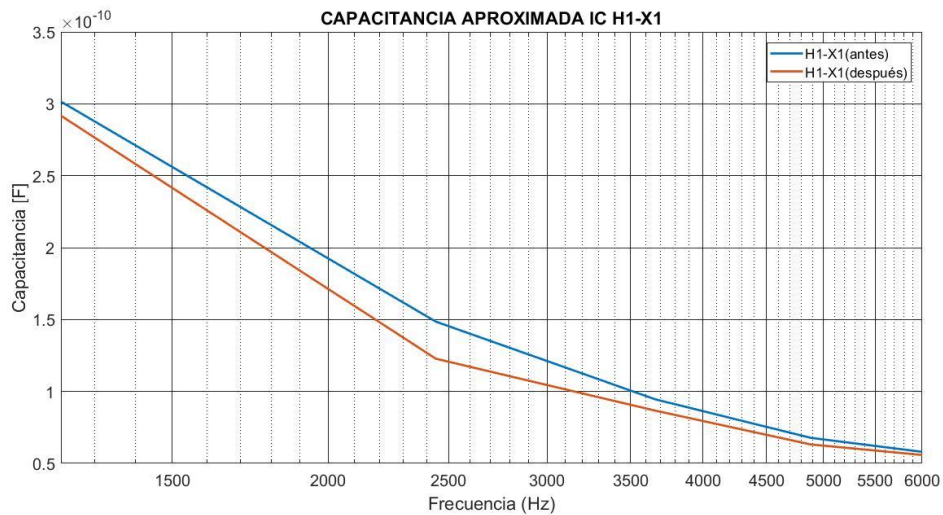


Figura 3.59. Capacitancia aproximada. Tipo de prueba: IC H1-X1.

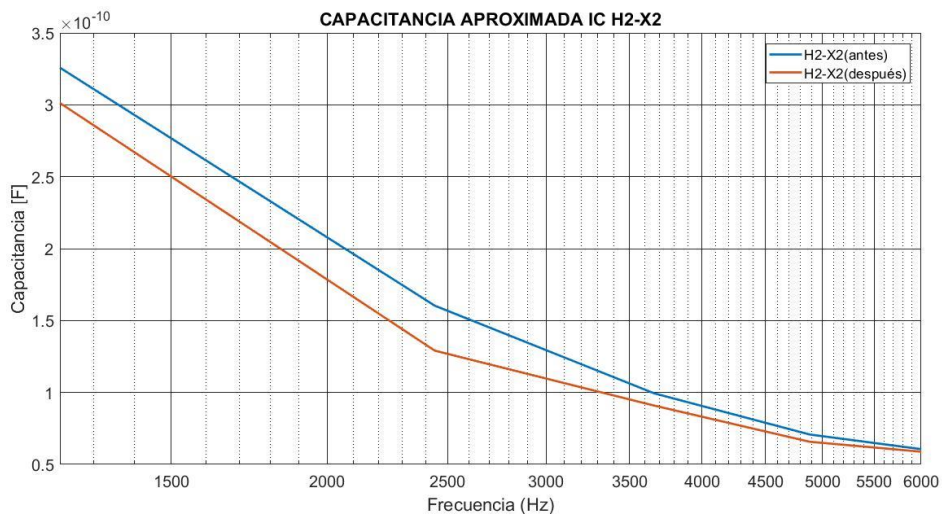


Figura 3.60. Capacitancia aproximada. Tipo de prueba: IC H2-X2.

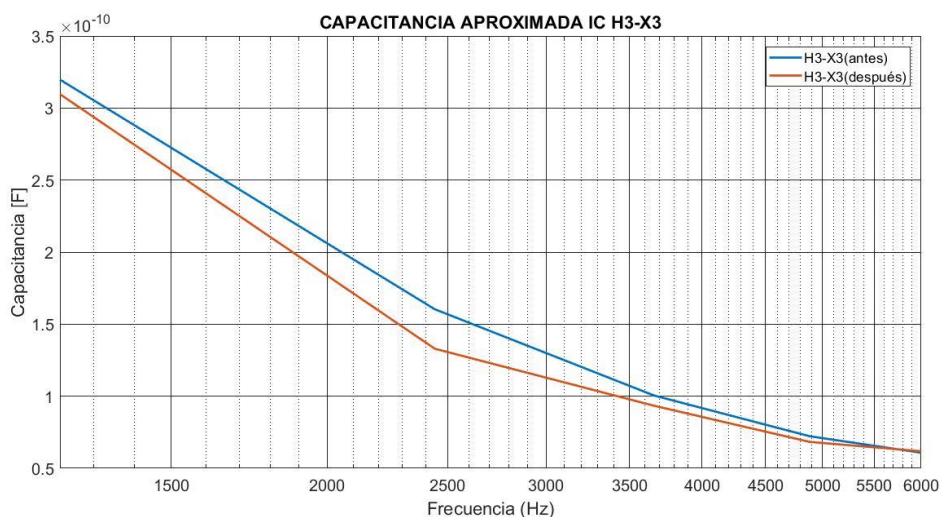


Figura 3.61. Capacitancia aproximada. Tipo de prueba: IC H3-X3.

Como se mencionó anteriormente, se toman de las Figuras presentadas los valores de capacitancia hasta una frecuencia de 3 kHz para el promedio de la capacitancia entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje, ya que la influencia de la capacitancia entre devanados está dominada a bajas frecuencias.

Este cálculo es aproximado ya que la capacitancia tiene una parte real y una parte imaginaria, se desprecia la parte imaginaria debido a que en la práctica al medir esta, se tiene valores considerablemente bajos en el orden de 10^{-12} Faradios con respecto a la parte real que está en el orden 10^{-10} Faradios [19].

Tabla 3.9. Parte real de la capacitancia compleja medida.

	Valor promedio de capacitancia real entre devanados ($\times 10^{-10}$ F)		
	H1-X1	H2-X2	H3-X3
Antes	1.8155	1.9519	1.9351
Después	1.6707	1.7373	1.7866

En los resultados de la Tabla 3.9 se puede apreciar que el valor de capacitancia calculado disminuye una vez que se cambia el aceite dieléctrico, es decir cuando se mejora el aislamiento, esto concuerda con el ejemplo mencionado en [19] ya que, en dicho estudio, el valor de capacitancia calculado aumenta al deteriorar el aislamiento.

3.4 Resultados de la Metodología IFRA

3.4.1 Inspección Visual y Valoración Cualitativa de las Trazas

En resumen, las mediciones FRA se pueden considerar como una “huella única” de las condiciones internas del transformador conformado por la resistencia (R) del devanado, la inductancia (L) de las bobinas, y la capacitancia (C) de las capas de aislamiento entre bobinas, entre devanados, devanado y núcleo, núcleo y tanque, devanado y tanque. Cualquier cambio interno, cambiará esta red RLC. Esto se pudo evidenciar en los resultados de las respuestas en frecuencia de las pruebas realizadas anteriormente, en las cuales se presentan cambios en magnitud y frecuencia debido al cambio del aceite dieléctrico.

Las pruebas con mejores resultados se observan en la prueba de circuito abierto AV, entrelazado capacitivo e inductivo, ya que se tiene un buen grado de repetitividad y atenuación del ruido reflejado en la función coherencia.

La Tabla 3.10 presenta una comparación cualitativa en cuanto a la repetitividad y el valor la función coherencia a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de respuesta en frecuencia mediante la inyección de impulsos.

Tabla 3.10. Comparación cualitativa de las curvas IFRA.

Parámetro analizado	Circuito Abierto A.V		Entrelazado Capacitivo		Entrelazado Inductivo	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Repetitividad (10 kHz- 300kHz)	Pobre	Excelente	Pobre	Aceptable	Pobre	Aceptable
Valor Coherencia (10 kHz- 300kHz)	Pobre	Excelente	Pobre	Aceptable	Pobre	Aceptable
Atenuación del ruido	Pobre	Mejorado	Pobre	Mejorado	Pobre	Mejorado

En la Tabla 3.11 se presentan un resumen de los principales cambios observados en las gráficas de la respuesta en frecuencia para las mediciones de circuito abierto, entrelazado capacitivo e inductivo.

Tabla 3.11. Análisis cualitativo de las curvas IFRA.

Tipo de Prueba	Cambios al mejorar el aislamiento (cambio del aceite dieléctrico)		
	Magnitud de la traza	Picos de resonancias y antiresonancias	Figuras de referencia
Circuito Abierto A.V	Aumento en la magnitud de la traza partir de 10^4 Hz.	Desplazamiento de los picos a frecuencias mayores.	Figura. 3.13 Figura. 3.14 Figura. 3.15 Figura. 3.58
Entrelazado Capacitivo	-Disminución en la magnitud hasta 2×10^4 Hz - Aumento en la magnitud a partir de 10^5 Hz.	Se mantienen los picos en las mismas frecuencias.	Figura. 3.41 Figura. 3.42 Figura. 3.43
Entrelazado Inductivo	Disminución en la magnitud de la traza hasta 4×10^4 Hz.	Se mantienen los picos en las mismas frecuencias.	Figura. 3.55 Figura. 3.56 Figura. 3.57

3.4.2 Valoración Cuantitativa

3.4.2.1 Porcentaje de Cambio de la Capacitancia del Aislamiento de los Bobinados de Alto Voltaje

Según lo presentado en la Tabla 3.8 se tienen un porcentaje de cambio negativo en la capacitancia del aislamiento de los bobinados de alto voltaje al mejorar el aislamiento, es decir, que se tiene una disminución en el valor de la capacitancia del aislamiento formado por el aceite y papel impregnado.

En la Figura 3.62 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la sección 3.3.1, se tiene que el mayor porcentaje de cambio se tiene en el aislamiento del bobinado H1-H3, es decir que el cambio del aceite mejora notablemente el aislamiento en esta fase en comparación a las demás.

La divergencia entre los porcentajes de cambio del aislamiento de las fases de alto voltaje, puede ser debido a la forma constructiva de los devanados.

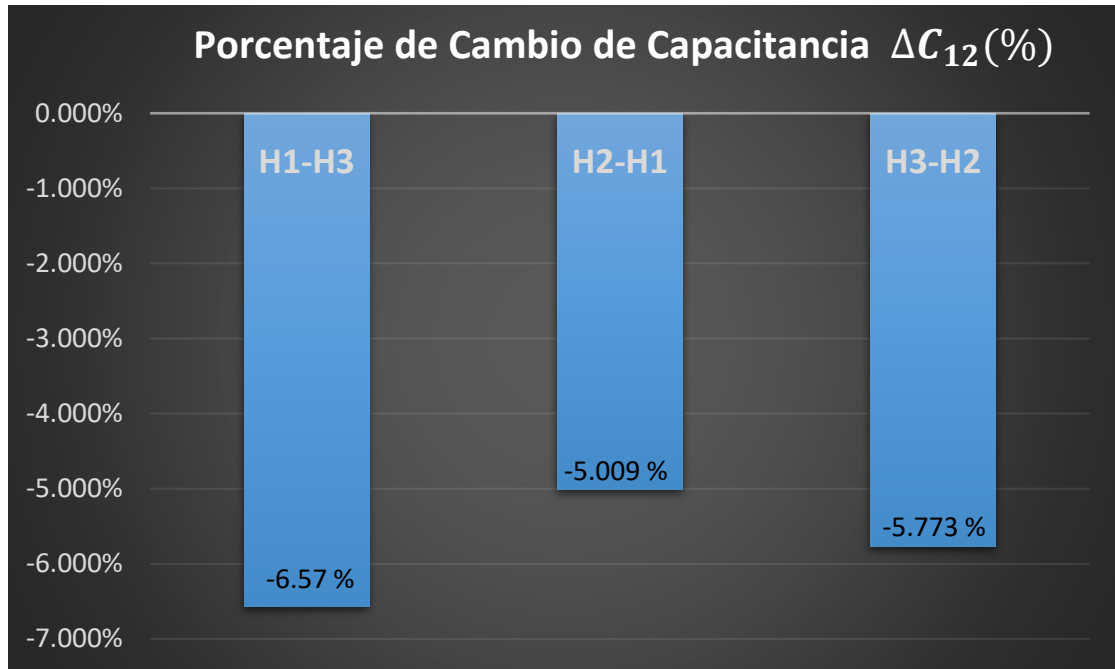


Figura 3.62. Porcentaje de cambio de la capacitancia del aislamiento en las bobinas de alto voltaje.

3.4.2.2 Capacitancia Calculada de la Prueba de “Entrelazado Capacitivo”.

Los resultados presentados en la Tabla 3.9, muestran que para los grupos terminales H2-X2 y H3-X3 se tiene valores similares de capacitancia, en cambio, el grupo H1-X1 varía con respecto a los demás, se tiene que este valor es menor a los demás grupos, es decir que tienen un mejor aislamiento compuesto de papel y aceite entre los devanados de alto y bajo voltaje, en cambio el grupo H2-X2 tendría una mayor degradación en su aislamiento entre bobinados de alto y bajo voltaje, según [19].

A partir de la medición de la capacitancia se puede obtener su porcentaje de cambio, esto mediante la ecuación 2.13, el porcentaje de cambio de la capacitancia entre devanados de alto voltaje y bajo voltaje para cada fase se presenta en la tabla 3.12.

Tabla 4.12. Porcentaje de cambio de capacitancia. Prueba de Entrelazado Capacitivo.

H1-X1			H2-X2			H3-X3		
$C_1(10^{-10}F)$	$C_2(10^{-10}F)$	$\Delta C_{21}(\%)$	$C_1(10^{-10}F)$	$C_2(10^{-10}F)$	$\Delta C_{21}(\%)$	$C_1(10^{-10}F)$	$C_2(10^{-10}F)$	$\Delta C_{21}(\%)$
1.8155	1.6707	-7.9757	1.9519	1.7373	-10.99	1.9351	1.7866	-7.67

Se observa que al cambiar el aceite se mejora notablemente el aislamiento ya que la capacitancia disminuye entre los devanados de cada grupo, sin embargo, para H2-X2 se

tiene una mayor disminución en la capacitancia del aislamiento según su porcentaje de cambio, esto se ve en la Figura 3.63.

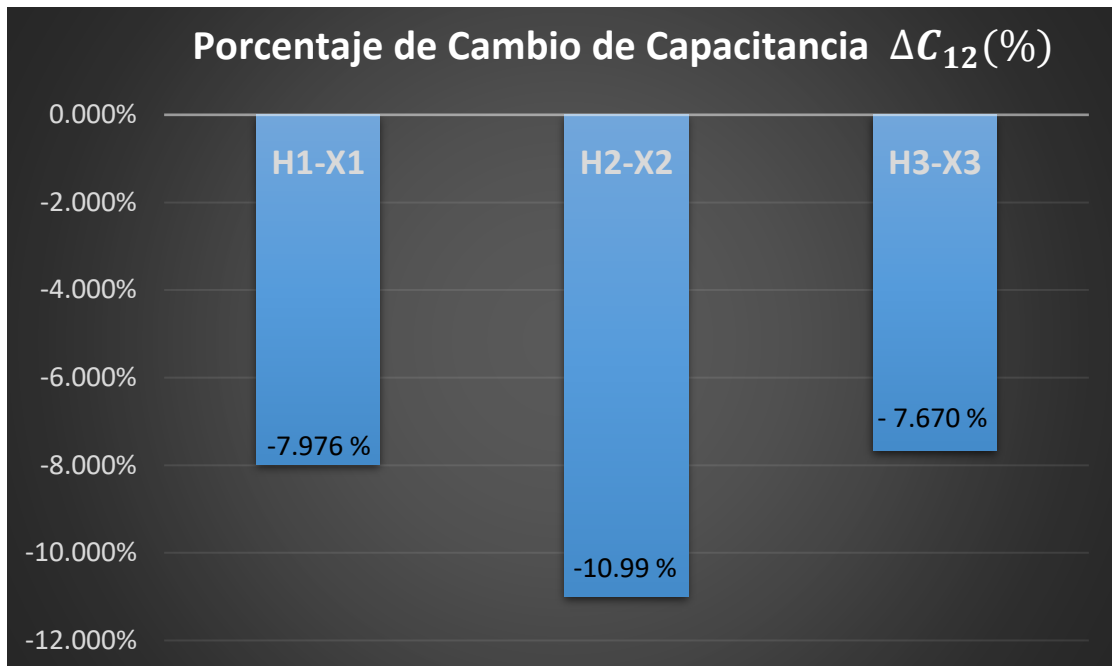


Figura 3.63. Porcentaje de cambio de la capacitancia del aislamiento entre devanados.

Se observa que el porcentaje de cambio en cada grupo disminuye en rangos distintos, esto puede ser debido a la forma de construcción interna del transformado, variando las capacidades efectivas entre bobinas y capas en diferentes proporciones.

Se observa que el mayor cambio en el porcentaje se tiene en el grupo con la mayor capacitancia, es decir, según [19] y los resultados obtenidos, sería el aislamiento entre H2-X2, el que tiene mayor degradación en el aislamiento, pues antes de mejorar el aceite se tendría una mayor concentración de la humedad.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se desarrolló una metodología práctica y experimental para la obtención de la respuesta en frecuencia mediante la aplicación de impulsos atmosféricos estándar de alto voltaje y la utilización de los equipos presentes en el laboratorio de Alto Voltaje de la EPN
- Se aplicaron ensayos o pruebas de rutina, que permiten tener una visión general del estado del transformador pues durante su vida útil este pudo haber sufrido , esto se evidenció en los resultados de la sección 3.1 de este proyecto.
- Se obtuvo la respuesta en frecuencia de cada estado del transformador mediante la aplicación de impulsos atmosféricos estandarizados y bajo las conexiones de medición que normalmente se realizan en una prueba FRA; las pruebas con mejores resultados se observan en la prueba de circuito abierto, entrelazado capacitivo e inductivo, ya que se tiene un buen grado de repetitividad y atenuación del ruido reflejado en la función coherencia una vez cambiado el aceite dieléctrico.
- La prueba de medición de la resistencia de aislamiento revela la calidad de este, pues al cabo de los años y por las exigencias a las que es sometido el transformador, la integridad del aislamiento se ve afectado; el ensayo realizado en la sección 3.1.1 reveló que al cambiar el aceite dieléctrico las partes activas están suficientemente aisladas, es decir presentaron una resistencia considerablemente alta.
- El aceite que originalmente se encontraba presente en el interior del transformador bajo prueba no cumple con el criterio de bondad establecido según norma, debido a su contaminación por impurezas y humedad, teniendo un voltaje promedio de disrupción de 11.54 kV, afectando el aislamiento interno formado por papel, cartón y aceite.
- Se verificó que en la posición del tap nominal, la impedancia porcentual del transformador bajo prueba está en los límites de 3% y 15%, sin embargo, se tiene una poca diferencia con el valor señalado en la placa de datos del transformador.
- Las pérdidas eléctricas presentes en el transformador bajo prueba son aceptables ya que no sobrepasan los valores presentados de pérdidas en transformadores de distribución de la NORMA INEN 2115:2004 en la tabla del ANEXO II.

- Debido a la influencia del devanado de bajo voltaje las pruebas de circuito abierto y cortocircuito no se utilizan para el análisis gráfico de cada estado, ya que se tiene una repetitividad pobre que se ve reflejada en la función coherencia, pues tiene límites bajos de frecuencia que pueden ser analizados.
- El diagnostico empleado en el análisis de respuesta en frecuencia está basado en la comparación de curvas representativas, por lo que al comparar las trazas obtenidas en cada estado del transformador se presentan diferencias notables en cuanto a desplazamiento en magnitud y frecuencia.
- En la prueba FRA de circuito abierto en el lado de alto voltaje se confirma que la humedad e impurezas presente en el aislamiento afecta la respuesta en frecuencia de los devanados, pues la traza mantiene su forma, pero se desplaza hacia frecuencias menores.
- La comparación de respuestas en frecuencia entre fases del mismo nivel y de un mismo estado representativo, puede presentar diferencias notables en sus trazas, esto debido a la estructura propia del transformador y no a cambios internos; también esto puede ser el resultado de errores en la medición de la respuesta.
- Se evaluaron cualitativamente las respuestas en frecuencias obtenidas, por ejemplo, en la prueba de circuito abierto se tiene un aumento en la magnitud de la traza obtenida al cambiar el aceite partir de 10 kHz, esto se observa en las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, por otra parte, en la prueba de entrelazado capacitivo se tiene una disminución de la magnitud de la traza representativa del transformador hasta 20 kHz y un aumento a partir de 100 kHz, Figuras 4.41, 4.42 y 4.43.
- Se evaluaron cuantitativamente el estado del aislamiento mediante el cálculo del porcentaje de cambio de la capacitancia de las respuestas en frecuencia obtenidas en las pruebas FRA de circuito abierto en alto voltaje y de entrelazado capacitivo para cada estado, verificando así que el dieléctrico original presenta cierto nivel de humedad, esto debido a que al realizar el cambio del aceite el porcentaje disminuye, esto se constata con la medición aproximada de la capacitancia obtenida de la medición capacitaba FRA.
- El cálculo de la capacitancia a partir de la medición capacitiva permite tener una aproximación en el valor de la capacitancia del aislamiento entre devanados conformado por aceite y papel impregnado.

- Al mejorar el aislamiento interno del transformador, se tiene una disminución en la capacitancia calculada, esto debido a que se cambia la permitividad del medio dieléctrico, constatando así que el aceite original contenía un alto grado de humedad e impurezas que afecta directamente su capacidad como aislante.
- De la capacitancia calculada a partir de la prueba capacitiva se tiene que la capacitancia entre el devanado H1-X1 presenta un valor menor en comparación a los demás grupos terminales, es decir que posiblemente tendría un mejor aislamiento entre devanados conformado por el aceite y papel impregnado.
- El impulso estándar atmosférico tiene un ancho de banda aproximado de 300 kHz, es decir en esa extensión de frecuencia es donde concentra la mayor potencia de la señal, esta banda se ve afectada debido al ruido presente en la digitalización y el ambiente externo de medida.
- Se verifica que las mediciones FRA pueden ser utilizados para la evaluación del aislamiento del transformador, siendo un complemento a las pruebas de rutina, pues ambos resultados sirven para dicha evaluación.
- La metodología experimental propuesta permite obtener la respuesta del transformador bajo estudio mediante la aplicación de impulsos de alto voltaje, permitiendo así tener una alternativa al uso de equipos especializados y poder aprovechar los elementos y equipos presentes actualmente en el laboratorio de alto voltaje para poder realizar estudios de esta naturaleza.
- El método propuesto para obtener la respuesta en frecuencia puede ser utilizado para un análisis en línea de transformadores, pues al aplicar impulsos estandarizados se simula la forma que se tendría cuando un transitorio natural de este tipo pueda presentarse, aprovechando así un fenómeno que normalmente sería perjudicial para la máquina y poder realizar un análisis del estado del aislamiento en línea.

4.2 Recomendaciones y Futuras Aplicaciones

- Para la medición con el osciloscopio de las señales de onda de impulso e intensidad de corriente medidas en el dominio del tiempo, se recomienda un buen apantallamiento eléctrico para disminuir el efecto del ruido y capacitancias parasitas que se puedan presentar durante la medición.
- Algunos autores [24], [27] recomiendan el uso de ventanas exponenciales al momento de aplicar la Transformada de Fourier, con lo cual se puede ampliar aparentemente el ancho de banda útil de la señal aplicada y aumentar el nivel en frecuencia del análisis de la respuesta obtenida.
- Para la evaluación de mediciones FRA en transformadores se recomienda que los estados representativos a evaluar se realicen bajo las mismas condiciones, pues por ejemplo las temperaturas de los bobinados pueden afectar la respuesta en frecuencia obtenida y producir errores en el análisis de las trazas a comparar, su efecto se observa en [11].
- Si bien se ha desarrollado una metodología experimental en la cual se puede obtener mediciones FRA aproximadas con el equipo presente en el Laboratorio de Alto Voltaje, se recomienda que la institución adquiera equipos destinados a este tipo de mediciones pues actualmente se desarrollan este tipo de pruebas como un complemento en la evaluación de transformadores.
- Las futuras aplicaciones de este proyecto estarán enfocadas en la evaluación del aislamiento en línea de transformadores trifásicos de potencia, pues las protecciones y equipos de medida, ante fallas eléctricas por eventos transitorios para los sistemas eléctricos de potencia como sobrevoltajes por descargas atmosféricas, pueden ser de gran ayuda si su información es utilizada de manera adecuada ante fallas, permitiendo una evaluación en línea del transformador mediante mediciones FRA-Online.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GURU, Bhag. "Máquinas Eléctricas y Transformadores". Tercera Edición. Oxford university press, Inc. New York, 2005.
- [2] HERNÁNDEZ, Andrés. LEDESMA, Rubén. PERERA, Eduardo. "Manual de Pruebas a Transformadores de Distribución". Tesis de Grado. Instituto Politécnico Nacional
- [3] WINDERS, Jhon. "Power Transformers Principles and Applications", Marcel Dekker, Inc. Allentown, Pennsylvania, 2002.
- [4] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers, in ANSI/IEEE Std C57.12.90-1987.
- [5] ALARCÓN, Pedro. "Pruebas Eléctricas de rutina a Transformadores de Distribución" Facultad Tecnológica, Universidad Distrital "Francisco José Caldas", Bogotá, 2003.
- [6] ASTM D877 / D877M-13, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013
- [7] GALVÁN, Verónica. GUTIERREZ, José. ORTIZ, Víctor. SÁNCHEZ, Ricardo. "Modelado del Transformador para eventos de Alta Frecuencia", I Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Guadalajara, México.
- [8] DEL VECCHIO, Robert. PIERRE T, Bertand. RAJENDRA, Dilipkumar M. Shah. "Transformer Design Principles". Segunda edición. CRC Press. New York, 2010.
- [9] E. Gómez-Luna, G. Aponte M. J. Pleite G, "Obtención de la respuesta en frecuencia en transformadores estando en servicio", Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol.25 N°1, 2017.
- [10] Alsuhaibani, Saleh & Khan, Yasin & Beroual, Abderrahmane & Malik, N.H, " A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics", Energies. 9. 879. 2016.
- [11] Picher, P.; Lapworth, J.; Noonan, T.; Christian, J. "Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)". CIGRE WG A2.26, Technical Brochure 342; CIGRE: Toronto, ON, Canada, 2008.

- [12] VALECILLOS, Baudilio. " Análisis de la respuesta en frecuencia como herramienta de evaluación de las pruebas de impulso en transformadores". Tesis. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, septiembre 2005.
- [13] P. T. M. Vaessen and E. Hanique, "A new frequency response analysis method for power transformers," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 384-391, Jan 1992.
- [14] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.149-2012, vol., no., pp.1-72, March 8 2013.
- [15] M. F. M. Yousof, C. Ekanayake and T. K. Saha, "Examining the ageing of transformer insulation using FRA and FDS techniques," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 2, pp. 1258-1265, April 2015.
- [16] ABDALLAH, Jalal. "Using the Frequency Response Analysis (FRA) in Transformers Internal Fault Detection". Tafila technical University, Department of Electrical Engineering, 2009.
- [17] W. S. Zaengl, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, Sept.-Oct. 2003.
- [18] A. A. Reykherdt and V. Davydov, "Case studies of factors influencing frequency response analysis measurements and power transformer diagnostics," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 27, no. 1, pp. 22-30, January-February 2011.
- [19] M. F. M, Yousof "Frequency Response Analysis for Transformer winding Condition Monitoring". Doctoral thesis. University of Queensland, School of Information Technology and Electrical Engineering. 2015.
- [20] RAMÍREZ , Juan David, "Especificación de un laboratorio de Extra Alto Voltaje para la Escuela Politécnica Nacional", Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [21] "High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements", IEC Std. 60060-14, 1989.
- [22] R. Nikjoo, "Dielectric Response and Partial Discharge Diagnostics of Insulation Systems by Utilizing High Voltage Impulses", Doctoral Thesis, Stockholm, 2016.

- [23] J. R. Secue, E. E. Mombello and C. V. Cardoso, "Review of Sweep Frequency Response Analysis -SFRA for Assessment Winding Displacements and Deformation in Power Transformers," in IEEE Latin America Transactions, vol. 5, no. 5, pp. 321-328, Sept. 2007.
- [24] VALECILLOS, Baudilio. "Sistema de Evaluación de Resultados para los Ensayos de impulso a Transformadores". Tesis. Universidad Simón Bolívar, Diciembre 2005.
- [25] MathWorks, *MATLAB-Cathalogue for help*. USA, 2017
- [26] J. Córtes, F. Medina, and J. Chávez, "Del Análisis de Fourier a las Wavelets." [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4807129.pdf>. [Accessed: 27/05/2018]
- [27] D. Donnelle and B. Rust, "The fast Fourier transform for experimentalists. Part I. Concepts," in Computing in Science & Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 80-88, March-April 2005.
- [28] TENAJAS, Pedro. "Análisis del Envejecimiento del Aceite de un Transformador mediante Espectroscopía Dieléctrica medida en Baja Frecuencia". Tesis. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [29] "Analizador de barrido de respuesta de frecuencia FRAX 101" Megger [En línea]. Disponible en: <http://csa.megger.com/analizador-de-barrido-de-respuesta-de-frecuencia-frax101>. [Accedido: 17-jun-2018].
- [30] IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," in IEEE Std C57.12.00-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2010) , vol., no., pp.1-74, 12 May 2016.
- [31] INEN, (2004). NTE INEN 2115:2004. Transformadores de distribucion nuevos trifásicos Valores de corriente sin carga, pérdidas y voltaje de cortocircuito. Primera Edición, Quito, Ecuador.

6 ANEXOS

ANEXO I. Ficha Técnica: Aceite Mineral Tipo II (Inhibido).

PAUL TRADING CORP		COPY	
<i>Progressive As yoU Like since 128</i>			
BAEK-KWANG BD. 10TH FL., 874-9 BONGCHEON-10 DONG, KWANAK-KU, SEOUL, KOREA Tax Register No. : 112-81-35951		TEL : 82-2-878-5090 FAX : 82-2-878-5091 HOME PAGE: www.paul128.co.kr Firm Id. No.: 110111-1013749	
<u>CERTIFICATE OF QUALITY</u>			
TO : ECUATRAN S.A. KM. 7.5 VIA GUARANDA A 600 MTS DE ESTADIO CENTRAL SECTOR DE SANTA ROSA AMBATO TUNGURAHUA ECUADOR TEL: 593 3 3700 100 EXT 316 RUT NO. : 1890061385001		CERTI NO. : PL-CQ161227-1 DATE : 2016-12-27	
PRODUCT : GS TRANS I (IEC60296:2012 INHIBITED) LOT NO. : 10115070 DATE OF PRODUCE : 2016.12.13 DATE TESTED : 2016.12.13			
TEST ITEM	METHOD	SPECIFICATION	TEST RESULT
Appearance		C&B	C&B
Density at 20 °C	ISO 3675	MAX 0.895	0.842
Viscosity, Kinematic			
@40 °C, mm ² /s	ISO 3104	MAX 12	8.20
@-30 °C, mm ² /s	ISO 61868	MAX 1,800	410.00
Pour Point, °C	ISO 3016	MAX -40	-44.00
Flash Point, Closed cup, °C	ISO 2719	MIN 135	144.00
Corrosive Sulphur	DIN 51353	Not corrosive	Not corrosive
Water Content, ppm	IEC 60814	MAX 30	2.4815
Breakdown voltage, KV	IEC 60156	MIN 30	70
Oxidation Stability, 500hr	IEC 61125		
Sludge, %		MAX 0.8	0.01
Total Acidity, mgKOH/g		MAX 1.2	0.07
Volume Resistivity, @90 °C, Ωcm	KS C 2101	MIN 5.0 X 10 ¹³	2 X 10 ¹⁵
DDF @90 °C	IEC 60247	MAX 0.005	0.004
P.C.B Contents, ppm	IEC 61619	Not Detectable	Not detected
Oxidation Inhibitor	IEC 60666	0.08 - 0.40%	Pass
2-Furfural Content, mg/kg	IEC 61198	MAX 0.1	0.001
The product is manufactured in an ISO/TS 16949 certified facility. We guarantee the above test results confirm with specifications.			
 BY PAUL TRADING CORP.			

ANEXO II. Transformadores de Distribución Nuevos Trifásicos. Valores de Corriente sin Carga. Pérdidas y Voltaje de Cortocircuito. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2115:2004.

Tabla A.2.1. Pérdidas en transformadores de distribución [31].

POTENCIA NOMINAL (kVA)	I_o (% de I_n)	P_o (W)	P_c (W)	P_t (W)	U_{zn} (%)
15	4,4	80	313	393	3,0
30	3,6	134	514	648	3,0
45	3,6	182	711	893	3,0
50	3,4	197	776	973	3,0
60	3,2	225	903	1 128	3,5
75	2,6	266	1 094	1 360	3,5
100	2,6	330	1 393	1 723	3,5
112,5	2,6	361	1 539	1 900	3,5
125	2,6	390	1 682	2 072	3,5
150	2,4	447	1 959	2 406	4,0
160	2,5	486	2 211	2 697	4,0
200	2,1	569	2 630	3 199	4,0
225	2,1	618	2 892	3 510	4,0
250	2,1	666	3 153	3 819	4,0
300	2,0	758	3 677	4 435	4,5
350	2,0	846	4 200	5 046	4,5
400	1,9	930	4 730	5 660	4,5
500	1,7	1 090	5 770	6 860	5,0
630	1,6	1 284	7 170	8 454	5,0
750	1,6	1 453	8 386	9 839	5,0
800	1,6	1 521	8 909	10 430	5,0
1 000	1,6	1 782	11 138	12 920	5,0
1 250	1,5	2 088	13 454	15 542	6,0
1 500	1,5	2 395	15 770	18 165	6,0
1 600	1,5	2 518	16 696	19 214	6,0
2 000	1,5	3 009	20 402	23 411	6,0

ANEXO III. Niveles de Aislamiento.

Tabla A.3.1. Niveles de aislamiento para transformadores de distribución [30].

Maximum system voltage (kV rms)	Nominal system voltage (kV rms)	Applied voltage test (kV rms)			Induced voltage test (phase to ground) (kV rms)	Winding line-end BIL (kV crest)			Neutral BIL (kV crest)	
		Delta or fully insulated wye	Grounded wye	Impedance grounded wye		Minimum	Alternates		Grounded wye	Impedance grounded wye
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11
Distribution transformers										
1.5	1.2	10	—	10	1.4	30			30	30
3.5	2.5	15	—	15	2.9	45			45	45
6.9	5	19	—	19	5.8	60			60	60
11	8.7	26	—	26	10	75			75	75
17	15	34	—	34	17	95	110		75	75
26	25	40	—	40	29	125	150		75	95
36	34.5	50	—	50	40	125	150	200	75	125
48	46	95	—	70	53	200	250		95	150
73	69	140	—	95	80	250	350		95	200

ANEXO IV. Código computacional para la obtención de la respuesta en frecuencia. Ejemplo: Prueba de Entrelazado Capacitivo.

```
% PRUEBA DE ENTRELAZADO CAPACITIVO IFRA

clear all
close all
clc

%% IMPORTACION DE DATOS

%H1-X1 ACEITE DETERIORADO MUESTRA 1
t1 = xlsread('H1-X1CH1_1.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin1 = xlsread('H1-X1CH1_1.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout1= xlsread('H1-X1CH2_1.xlsx',1,'E1:E2500');
Vin1=Vin1*407.08;
Iout1=Iout1./265.25;

%H2-X2 ACEITE DETERIORADO MUESTRA 1
t2 = xlsread('H2-X2CH1_1.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin2 = xlsread('H2-X2CH1_1.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout2= xlsread('H2-X2CH2_1.xlsx',1,'E1:E2500');
Vin2=Vin2*407.08;
Iout2=Iout2./265.25;

%H3-X3 ACEITE DETERIORADO MUESTRA 1
t3 = xlsread('H3-X3CH1_1.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin3 = xlsread('H3-X3CH1_1.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout3= xlsread('H3-X3CH2_1.xlsx',1,'E1:E2500');
Vin3=Vin3*407.08;
Iout3=Iout3./265.25;

%%
%H1-X1 ACEITE DETERIORADO MUESTRA 2
t12 = xlsread('H1-X1CH1_2.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin12 = xlsread('H1-X1CH1_2.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout12= xlsread('H1-X1CH2_2.xlsx',1,'E1:E2500');

%H2-X2 ACEITE DETERIORADO MUESTRA 2
t22 = xlsread('H2-X2CH1_2.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin22 = xlsread('H2-X2CH1_2.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout22= xlsread('H2-X2CH2_2.xlsx',1,'E1:E2500');

%H3-X2 ACEITE DETERIORADO MUESTRA 2
t32 = xlsread('H3-X3CH1_2.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin32 = xlsread('H3-X3CH1_2.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout32= xlsread('H3-X3CH2_2.xlsx',1,'E1:E2500');

%%
```

```

%H1-X1 ACEITE NUEVO MUESTRA 1
t14 = xlsread('H1-X1CH1_4.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin14 = xlsread('H1-X1CH1_4.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout14= xlsread('H1-X1CH2_4.xlsx',1,'E1:E2500');

%H2-X2 ACEITE NUEVO MUESTRA 1
t24 = xlsread('H2-X2CH1_4.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin24 = xlsread('H2-X2CH1_4.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout24= xlsread('H2-X2CH2_4.xlsx',1,'E1:E2500');

%H3-X3 ACEITE NUEVO MUESTRA 1
t34 = xlsread('H3-X3CH1_4.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin34 = xlsread('H3-X3CH1_4.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout34= xlsread('H3-X3CH2_4.xlsx',1,'E1:E2500');

%%
%H1-X1 ACEITE NUEVO MUESTRA 2
t15 = xlsread('H1-X1CH1_5.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin15 = xlsread('H1-X1CH1_5.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout15= xlsread('H1-X1CH2_5.xlsx',1,'E1:E2500');

%H2-X2 ACEITE NUEVO MUESTRA 2
t25 = xlsread('H2-X2CH1_5.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin25 = xlsread('H2-X2CH1_5.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout25= xlsread('H2-X2CH2_5.xlsx',1,'E1:E2500');

%H3-X3 ACEITE NUEVO MUESTRA 2
t35 = xlsread('H3-X3CH1_5.xlsx',1,'D1:D2500');
Vin35 = xlsread('H3-X3CH1_5.xlsx',1,'E1:E2500');
Iout35= xlsread('H3-X3CH2_5.xlsx',1,'E1:E2500');

%% ONDAS MUESTRADAS

figure(1);
subplot(3,2,1);
plot(t1,Vin1,'linewidth',1.5)
ax = gca;
ax.YAxis.Exponent = 0;
ax.XAxis.Exponent = 0;
grid on
title('a.1) Onda de Impulso aplicado. Terminal H1')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Magnitud [V]');
subplot(3,2,2);
plot(t1,Iout1,'red','linewidth',1.5)
ax = gca;
ax.XAxis.Exponent = 0;
grid on
title('b.1) Onda de intensidad de corriente medida. Terminal X1')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Magnitud [A]');

```

```

subplot(3,2,3);
plot(t2,Vin2,'linewidth',1.5)
ax = gca;
ax.YAxis.Exponent = 0;
ax.XAxis.Exponent = 0;
grid on
title('a.2) Onda de Impulso aplicado. Terminal H2')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Magnitud [V]');
subplot(3,2,4);
plot(t2,Iout2,'red','linewidth',1.5)
ax = gca;
ax.XAxis.Exponent = 0;
grid on
title('b.2) Onda de intensidad de corriente medida. Terminal X2')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Magnitud [A]');

subplot(3,2,5);
plot(t2,Vin2,'linewidth',1.5)
ax = gca;
ax.YAxis.Exponent = 0;
ax.XAxis.Exponent = 0;
grid on
title('a.3) Onda de Impulso aplicado. Terminal H3')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Magnitud [V]');
subplot(3,2,6);
plot(t3,Iout3,'red','linewidth',1.5)
ax = gca;
ax.XAxis.Exponent = 0;
grid on
title('b.3) Onda de intensidad de corriente medida. Terminal X3')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Magnitud [A]');

%%
Vb1 = max(Vin1);
Ib1 = max(Iout1);
Vin1 = Vin1/Vb1;
Iout1= Iout1/Ib1;

Vb2 = max(Vin2);
Ib2 = max(Iout2);
Vin2 = Vin2/Vb2;
Iout2= Iout2/Ib2;

Vb3 = max(Vin3);
Ib3 = max(Iout3);
Vin3 = Vin3/Vb3;
Iout3= Iout3/Ib3;

Vb12 = max(Vin12);
Ib12 = max(Iout12);
Vin12 = Vin12/Vb12;
Iout12= Iout12/Ib12;

Vb22 = max(Vin22);
Ib22 = max(Iout22);

```

```

Vin22 = Vin22/Vb22;
Iout22= Iout22/Ib22;

Vb32 = max(Vin32);
Ib32 = max(Iout32);
Vin32 = Vin32/Vb32;
Iout32= Iout32/Ib32;

Vb14 = max(Vin14);
Ib14 = max(Iout14);
Vin14 = Vin14/Vb14;
Iout14= Iout14/Ib14;

Vb24 = max(Vin24);
Ib24 = max(Iout24);
Vin24 = Vin24/Vb24;
Iout24= Iout24/Ib24;

Vb34 = max(Vin34);
Ib34 = max(Iout34);
Vin34 = Vin34/Vb34;
Iout34= Iout34/Ib34;

Vb15 = max(Vin15);
Ib15 = max(Iout15);
Vin15 = Vin15/Vb15;
Iout15= Iout15/Ib15;

Vb25 = max(Vin25);
Ib25 = max(Iout25);
Vin25 = Vin25/Vb25;
Iout25= Iout25/Ib25;

Vb35 = max(Vin35);
Ib35 = max(Iout35);
Vin35 = Vin35/Vb35;
Iout35= Iout35/Ib35;
%% TRANSFORMADA DE FOURIER

Fs = 1/(t2(2)-t2(1)); % Hz Frecuencia de muestreo
L =length(Vin1); % numero de puntos (longitud del vector)
nfft=2^nextpow2(L); % nueva longitud potencia de 2

VL1 = fft(Vin1,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H1-H3
IL1 = fft(Iout1,nfft);
VL2 = fft(Vin2,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H2-H1
IL2 = fft(Iout2,nfft);
VL3 = fft(Vin3,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H3-H2
IL3 = fft(Iout3,nfft);

VL12 = fft(Vin12,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H1-H3
IL12 = fft(Iout12,nfft);
VL22 = fft(Vin22,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H2-H1
IL22 = fft(Iout22,nfft);
VL32 = fft(Vin32,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H3-H2
IL32 = fft(Iout32,nfft);

```

```

VL14 = fft(Vin14,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H1-H3
IL14 = fft(Iout14,nfft);
VL24 = fft(Vin24,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H2-H1
IL24 = fft(Iout24,nfft);
VL34 = fft(Vin34,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H3-H2
IL34 = fft(Iout34,nfft);

VL15 = fft(Vin15,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H1-H3
IL15 = fft(Iout15,nfft);
VL25 = fft(Vin25,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H2-H1
IL25 = fft(Iout25,nfft);
VL35 = fft(Vin35,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H3-H2
IL35 = fft(Iout35,nfft);

%% FUNCION DE TRANSFERENCIA
FTL1 = IL1./VL1; % Fucion de transferencia o respuesta impulsiva en el
dominio de w  $Y(w)=H(w)X(w)$ 
FTL1 = FTL1(1:nfft/2);
MGL1 = abs(FTL1);
MGdbL1 = mag2db(MGL1); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL1 = angle(FTL1);
phaseL1 = rad2deg(phaseL1);

FTL2 = IL2./VL2; % Fucion de transferencia o respuesta impulsiva en el
dominio de w  $Y(w)=H(w)X(w)$ 
FTL2 = FTL2(1:nfft/2);
MGL2 = abs(FTL2);
MGdbL2 = mag2db(MGL2); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL2 = angle(FTL2);
phaseL2 = rad2deg(phaseL2);

FTL3 = IL3./VL3; % Fucion de transferencia o respuesta impulsiva en el
dominio de w  $Y(w)=H(w)X(w)$ 
FTL3 = FTL3(1:nfft/2);
MGL3 = abs(FTL3);
MGdbL3 =mag2db(MGL3); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL3 = angle(FTL3);
phaseL3 = rad2deg(phaseL3);

%%
FTL12 = IL12./VL12; % Fucion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w  $Y(w)=H(w)X(w)$ 
FTL12 = FTL12(1:nfft/2);
MGL12 = abs(FTL12);
MGdbL12 = mag2db(MGL12); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL12 = angle(FTL12);
phaseL12 = rad2deg(phaseL12);

FTL22 = IL22./VL22; % Fucion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w  $Y(w)=H(w)X(w)$ 
FTL22 = FTL22(1:nfft/2);
MGL22 = abs(FTL22);
MGdbL22 = mag2db(MGL22); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG

```



```

phaseL22 = angle (FTL22);
phaseL22 = rad2deg (phaseL22);

FTL32 = IL32./VL32; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL32 = FTL32 (1:nfft/2);
MGL32 = abs (FTL32);
MGdbL32 =mag2db (MGL32); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL32 = angle (FTL32);
phaseL32 = rad2deg (phaseL32);

%%
FTL14 = IL14./VL14; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL14 = FTL14 (1:nfft/2);
MGL14 = abs (FTL14);
MGdbL14 = mag2db (MGL14); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL14 = angle (FTL14);
phaseL14 = rad2deg (phaseL14);

FTL24 = IL24./VL24; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL24 = FTL24 (1:nfft/2);
MGL24 = abs (FTL24);
MGdbL24 = mag2db (MGL24); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL24 = angle (FTL24);
phaseL24 = rad2deg (phaseL24);

FTL34 = IL34./VL34; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL34 = FTL34 (1:nfft/2);
MGL34 = abs (FTL34);
MGdbL34 =mag2db (MGL34); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL34 = angle (FTL34);
phaseL34 = rad2deg (phaseL34);

%%
FTL15 = IL15./VL15; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL15 = FTL15 (1:nfft/2);
MGL15 = abs (FTL15);
MGdbL15 = mag2db (MGL15); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL15 = angle (FTL15);
phaseL15 = rad2deg (phaseL15);

FTL25 = IL25./VL25; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL25 = FTL25 (1:nfft/2);
MGL25 = abs (FTL25);
MGdbL25 = mag2db (MGL25); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL25 = angle (FTL25);
phaseL25 = rad2deg (phaseL25);

```

```

FTL35 = IL35./VL35; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL35 = FTL35(1:nfft/2);
MGL35 = abs(FTL35);
MGdbL35 =mag2db(MGL35); %expreses in decibels (dB) the magnitude
measurements specified in MG
phaseL35 = angle(FTL35);
phaseL35 = rad2deg(phaseL35);

```

```

% GRAFICAS RESPUESTA EN FRECUENCIA (ACEITE DETERIORADO)
f=(0:(nfft/2)-1)*(Fs/nfft); %vector de frecuencias

```

```

figure(4);

```

```

semilogx(f,MGdbL1,f,MGdbL2,f,MGdbL3,'linewidth',2)
legend({'H1-X1','H2-X2','H3-X3'},'FontSize',13)
grid on
set(gca,'YGrid','on','GridAlpha',1)
set(gca,'XGrid','on','GridAlpha',1,'MinorGridAlpha',1)
xlim([0 (10^6)])
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA-ENTRELAZADO CAPACITIVO ',' TRANSFORMADOR
CON ACEITE DETERIORADO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',13);
ylabel('Magnitud [dB]','FontSize',13);
a = get(gca,'XTickLabel');
set(gca,'XTickLabel',a,'fontsize',15)

```

```

% GRÁFICAS RESPUESTA EN FRECUENCIA CADA FASE (ACEITE DETERIORADO)
%H1-X1

```

```

figure(5);
semilogx(f,MGdbL1,f,MGdbL12,'linewidth',2)
legend({'H1-X1 (Impulso1)','H1-X1 (Impulso2)'},'FontSize',13)
grid on
set(gca,'YGrid','on','GridAlpha',1)
set(gca,'XGrid','on','GridAlpha',1,'MinorGridAlpha',1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H1-X1 ',' TRANSFORMADOR CON ACEITE
DETERIORADO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',13);
ylabel('Magnitud [dB]','FontSize',13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca,'XTickLabel');
set(gca,'XTickLabel',a,'fontsize',15)

```

```

%H2-X2

```

```

figure(6);
semilogx(f,MGdbL2,f,MGdbL22,'linewidth',2)
legend({'H2-X2 (Impulso1)','H2-X2 (Impulso2)'},'FontSize',13)
grid on
set(gca,'YGrid','on','GridAlpha',1)
set(gca,'XGrid','on','GridAlpha',1,'MinorGridAlpha',1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H2-X2 ',' TRANSFORMADOR CON ACEITE
DETERIORADO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',13);

```

```

ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%H3-X3
figure(7);
semilogx(f, MGdbL3, f, MGdbL32, 'linewidth', 2)
legend({'H3-X3 (Impulso1)', 'H3-X3 (Impulso2)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H3-X3', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
DETERIORADO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)
%% COHERENCIA X=entrada Y = SALIDA (ACEITE DETERIORADO)
%H1-X1
Gxx1=conj(VL1).*VL1;
Gyy1=conj(IL1).*IL1;
Gxy1=conj(VL1).*IL1;

Gxx2=conj(VL12).*VL12;
Gyy2=conj(IL12).*IL12;
Gxy2=conj(VL12).*IL12;

GXX=(Gxx1+Gxx2)./2; % densidad espectral de x(t) promediada
GYY=(Gyy1+Gyy2)./2; % densidad espectral de y(t) promediada
GXY=(Gxy1+Gxy2)./2; % densidad cruzada de potencia espectral promediada

coh1=(abs(GXY).^2)./(GXX.*GYY); % FUNCIÓN COHERENCIA
coh1=coh1(1:nfft/2);

figure(8);
semilogx(f, coh1, 'linewidth', 2)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'FUNCIÓN COHERENCIA IC H1-X1', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
DETERIORADO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Coherencia', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%H2-X2
Gxx1=conj(VL2).*VL2;
Gyy1=conj(IL2).*IL2;
Gxy1=conj(VL2).*IL2;

```

```

Gxx2=conj (VL22) .*VL22;
Gyy2=conj (IL22) .*IL22;
Gxy2=conj (VL22) .*IL22;

GXX=(Gxx1+Gxx2) ./2; % densidad espectral de x(t) promediada
GYY=(Gyy1+Gyy2) ./2; % densidad espectral de y(t) promediada
GXY=(Gxy1+Gxy2) ./2; % densidad cruzada de potencia espectral promediada

coh1=(abs (GXY) .^2) ./ (GXX.*GYY); % FUNCIÓN COHERENCIA
coh1=coh1 (1:nfft/2);

figure (9);
semilogx (f, coh1, 'linewidth', 2)
grid on
set (gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set (gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title ({'FUNCIÓN COHERENCIA IC H2-X2', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
DETERIORADO'});
xlabel ('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel ('Coherencia', 'FontSize', 13);
xlim ([0 (10^6)])
a = get (gca, 'XTickLabel');
set (gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%H3-H2
Gxx1=conj (VL3) .*VL3;
Gyy1=conj (IL3) .*IL3;
Gxy1=conj (VL3) .*IL3;

Gxx2=conj (VL32) .*VL32;
Gyy2=conj (IL32) .*IL32;
Gxy2=conj (VL32) .*IL32;

GXX=(Gxx1+Gxx2) ./2; % densidad espectral de x(t) promediada
GYY=(Gyy1+Gyy2) ./2; % densidad espectral de y(t) promediada
GXY=(Gxy1+Gxy2) ./2; % densidad cruzada de potencia espectral promediada

coh1=(abs (GXY) .^2) ./ (GXX.*GYY); % FUNCIÓN COHERENCIA
coh1=coh1 (1:nfft/2);

figure (10);
semilogx (f, coh1, 'linewidth', 2)
grid on
set (gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set (gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title ({'FUNCIÓN COHERENCIA IC H3-X3', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
DETERIORADO'});
xlabel ('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel ('Coherencia', 'FontSize', 13);
xlim ([0 (10^6)])

```

```

a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%%
%% GRAFICAS RESPUESTA EN FRECUENCIA (ACEITE NUEVO)
f=(0:(nfft/2)-1)*(Fs/nfft); %vector de frecuencias

figure(11);

semilogx(f, MGdbL14, f, MGdbL25, f, MGdbL34, 'linewidth', 2)
legend({'H1-X1', 'H2-X2', 'H3-X3'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
xlim([0 (10^6)])
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA-ENTRELAZADO CAPACITIVO', ' TRANSFORMADOR
CON ACEITE NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%% GRÁFICAS RESPUESTA EN FRECUENCIA CADA FASE (ACEITE NUEVO)
%H1-X1
figure(12);
semilogx(f, MGdbL14, f, MGdbL15, 'linewidth', 2)
legend({'H1-X1 (Impulso1)', 'H1-X1 (Impulso2)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H1-X1', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%H2-X2
figure(13);
semilogx(f, MGdbL24, f, MGdbL25, 'linewidth', 2)
legend({'H2-X2 (Impulso1)', 'H2-X2 (Impulso2)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H2-X2', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%H3-X3
figure(14);

```

```

semilogx(f, MGdbL34, f, MGdbL35, 'linewidth', 2)
legend({'H3-X3 (Impulso1)', 'H3-X3 (Impulso2)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H3-X3', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

% COHERENCIA X=entrada Y = SALIDA (ACEITE DETERIORADO)
%H1-X1
Gxx1=conj(VL14).*VL14;
Gyy1=conj(IL14).*IL14;
Gxy1=conj(VL14).*IL14;

Gxx2=conj(VL15).*VL15;
Gyy2=conj(IL15).*IL15;
Gxy2=conj(VL15).*IL15;

GXX=(Gxx1+Gxx2)./2; % densidad espectral de x(t) promediada
GYY=(Gyy1+Gyy2)./2; % densidad espectral de y(t) promediada
GXY=(Gxy1+Gxy2)./2; % densidad cruzada de potencia espectral promediada

coh1=(abs(GXY).^2)./(GXX.*GYY); % FUNCIÓN COHERENCIA
coh1=coh1(1:nfft/2);

figure(15);
semilogx(f, coh1, 'linewidth', 2)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'FUNCIÓN COHERENCIA IC H1-X1', ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Coherencia', 'FontSize', 13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%H2-X2
Gxx1=conj(VL24).*VL24;
Gyy1=conj(IL24).*IL24;
Gxy1=conj(VL24).*IL24;

Gxx2=conj(VL25).*VL25;
Gyy2=conj(IL25).*IL25;
Gxy2=conj(VL25).*IL25;

```

```

GXX=(Gxx1+Gxx2)./2; % densidad espectral de x(t) promediada
GYY=(Gyy1+Gyy2)./2; % densidad espectral de y(t) promediada
GXY=(Gxy1+Gxy2)./2; % densidad cruzada de potencia espectral promediada

coh1=(abs(GXY).^2)./(GXX.*GYY); % FUNCIÓN COHERENCIA
coh1=coh1(1:nfft/2);

figure(16);
semilogx(f,coh1,'linewidth',2)
grid on
set(gca,'YGrid','on','GridAlpha',1)
set(gca,'XGrid','on','GridAlpha',1,'MinorGridAlpha',1)
title({'FUNCIÓN COHERENCIA IC H2-X2' , ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',13);
ylabel('Coherencia','FontSize',13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca,'XTickLabel');
set(gca,'XTickLabel',a,'fontsize',15)

%H3-X3
Gxx1=conj(VL34).*VL34;
Gyy1=conj(IL34).*IL34;
Gxy1=conj(VL34).*IL34;

Gxx2=conj(VL35).*VL35;
Gyy2=conj(IL35).*IL35;
Gxy2=conj(VL35).*IL35;

GXX=(Gxx1+Gxx2)./2; % densidad espectral de x(t) promediada
GYY=(Gyy1+Gyy2)./2; % densidad espectral de y(t) promediada
GXY=(Gxy1+Gxy2)./2; % densidad cruzada de potencia espectral promediada

coh1=(abs(GXY).^2)./(GXX.*GYY); % FUNCIÓN COHERENCIA
coh1=coh1(1:nfft/2);

figure(17);
semilogx(f,coh1,'linewidth',2)
grid on
set(gca,'YGrid','on','GridAlpha',1)
set(gca,'XGrid','on','GridAlpha',1,'MinorGridAlpha',1)
title({'FUNCIÓN COHERENCIA IC H3-X3' , ' TRANSFORMADOR CON ACEITE
NUEVO'});
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',13);
ylabel('Coherencia','FontSize',13);
xlim([0 (10^6)])
a = get(gca,'XTickLabel');
set(gca,'XTickLabel',a,'fontsize',15)

%%
%% COMPARACION DE RESPUESTAS ANTES Y DESPUES DEL CAMBIO DEL DIELECTRICO

```

```

%H1-X1
figure(18);
semilogx(f, MGdbL1, f, MGdbL14, 'linewidth', 2)
legend({'H1-X1 (antes)', 'H1-X1 (después)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H1-H3'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (4*10^5)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

```

```

%H2-X2
figure(19);
semilogx(f, MGdbL2, f, MGdbL24, 'linewidth', 2)
legend({'H2-X2 (antes)', 'H2-X2 (después)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H2-X2'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (4*10^5)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

```

```

%H3-X3
figure(20);
semilogx(f, MGdbL3, f, MGdbL34, 'linewidth', 2)
legend({'H3-X3 (antes)', 'H3-X3 (después)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'RESPUESTA EN FRECUENCIA IC H3-X3'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Magnitud [dB]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (4*10^5)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

```

```

%% CAPACITANCIA

```

```

Vin12 = Vin12*407.08;
Vin22 = Vin22*407.08;
Vin32 = Vin32*407.08;

```

```

Vin14 = Vin14*407.08;
Vin24 = Vin24*407.08;
Vin34 = Vin34*407.08;

```

```

%% Antes del cambio del dieléctrico

```



```

f=(1:(nfft/2))*(Fs/nfft); %vector de frecuencias
w=2*pi*f';

VL12 = fft(Vin12,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H1-H3
IL12 = fft(Iout12,nfft);
VL22 = fft(Vin22,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H2-H1
IL22 = fft(Iout22,nfft);
VL32 = fft(Vin32,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H3-H2
IL32 = fft(Iout32,nfft);

FTL12 = IL12./VL12; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL12 = FTL12(1:nfft/2);
FTL22 = IL22./VL22; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL22 = FTL22(1:nfft/2);
FTL32 = IL32./VL32; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL32 = FTL32(1:nfft/2);

Ca1=abs(FTL12)./(w*265.25);
Ca2=abs(FTL22)./(w*265.25);
Ca3=abs(FTL32)./(w*265.25);

%% Despues del cambio del dieléctrico

VL14 = fft(Vin14,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H1-H3
IL14 = fft(Iout14,nfft);
VL24 = fft(Vin24,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H2-H1
IL24 = fft(Iout24,nfft);
VL34 = fft(Vin34,nfft); % Transformada Rapida de Fourier H3-H2
IL34 = fft(Iout34,nfft);

FTL14 = IL14./VL14; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL14 = FTL14(1:nfft/2);
FTL24 = IL24./VL24; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL24 = FTL24(1:nfft/2);
FTL34 = IL34./VL34; % Funcion de transferencia o respuesta impulsiva en
el dominio de w Y(w)=H(w)X(w)
FTL34 = FTL34(1:nfft/2);

Ca14=abs(FTL14)./(w*265.25);
Ca24=abs(FTL24)./(w*265.25);
Ca34=abs(FTL34)./(w*265.25);

%% FIGURAS CAPACITANCIA

figure(21)
semilogx(f, (Ca1), f, (Ca14), 'linewidth', 2)
legend({'H1-X1 (antes)', 'H1-X1 (después)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)

```

```

title({'CAPACITANCIA APROXIMADA IC H1-X1'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Capacitancia [F]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (6000)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

figure(22)
semilogx(f, (Ca2), f, (Ca24), 'linewidth', 2)
legend({'H2-X2 (antes)', 'H2-X2 (después)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'CAPACITANCIA APROXIMADA IC H2-X2'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Capacitancia [F]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (6000)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

figure(23)
semilogx(f, (Ca3), f, (Ca34), 'linewidth', 2)
legend({'H3-X3 (antes)', 'H3-X3 (después)'}, 'FontSize', 13)
grid on
set(gca, 'YGrid', 'on', 'GridAlpha', 1)
set(gca, 'XGrid', 'on', 'GridAlpha', 1, 'MinorGridAlpha', 1)
title({'CAPACITANCIA APROXIMADA IC H3-X3'});
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 13);
ylabel('Capacitancia [F]', 'FontSize', 13);
xlim([0 (6000)])
a = get(gca, 'XTickLabel');
set(gca, 'XTickLabel', a, 'fontsize', 15)

%% CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA
Ca1=Ca1(1:3);
Ca2=Ca2(1:3);
Ca3=Ca3(1:3);

C1=sum(Ca1)/(3);
C2=sum(Ca2)/(3);
C3=sum(Ca3)/(3);

Ca14=Ca14(1:3);
Ca24=Ca24(1:3);
Ca34=Ca34(1:3);

C14=sum(Ca14)/(3);
C24=sum(Ca24)/(3);
C34=sum(Ca34)/(3);

disp('CAPACITANCIAS ANTES Y DESPUES H1')
CapH1=[C1 C14]
disp('CAPACITANCIAS ANTES Y DESPUES H2')
CapH2=[C2 C24]
disp('CAPACITANCIAS ANTES Y DESPUES H3')
CapH3=[C3 C34]

```

ORDEN DE EMPASTADO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
"CAMPUS POLITÉCNICO JOSÉ RUBÉN ORELLANA RICAURTE"

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo con lo estipulado en el Art. 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas Vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por Consejo Politécnico en sesión extraordinaria del 29 de abril de 2015 y por delegación del Decano, una vez verificado el cumplimiento de formato de presentación establecido, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por:

VÍCTOR HUGO TIBANLOMBO TIMBILA

Fecha de autorización: 27 de agosto de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Paulo Leica", superpuesta sobre un sello circular azul de la Escuela Politécnica Nacional.

DR. PAULO LEICA
Subdecano Subrogante

Paola P