



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



ANÁLISIS DEL MÉTODO DE BARRIDO DE FRECUENCIA PARA
DIAGNÓSTICO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN
20MVA S.E CHILOTA – MOQUEGUA 2020

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JORGE LUIS TURPO DIAZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi querida madre Leonarda Diaz Llavilla, que siempre hizo todo para hacer posible mis sueños y deseos.

A mi padre Teófilo Turpo Arce, por preocuparse por mi provecho académico. estabas siempre al pendiente de mis notas por no decir que me obligabas a preocuparme por mis estudios.

A mis hermanos, Por el cariño y apoyo cuando tuve que irme para dedicarme a mis estudios, por el tiempo que vivimos y pasamos juntos.

Mi querida novia Maricruz, mis hijos Jairo y Dariel, por su comprensión y cariño que me tuvieron durante estos años.

Jorge Luis Turpo Diaz.



AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento Mi más sincero agradecimiento a mis docentes de la escuela profesional de mecánica eléctrica -UNA Puno, por su esmerada orientación y los conocimientos impartidos, dedicación y aliento durante todos estos años

A la empresa HV ELECTRIC S.A.C. por facilitarme la información requerida para el desarrollo de la presente tesis y su apoyo durante la parte práctica del proyecto.

A todos ellos, muchas gracias.

Jorge Luis Turpo Diaz.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ANEXOS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 12

ABSTRACT..... 13

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 16

1.1.1. Problema general 16

1.1.2. Problemas específicos 17

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... 17

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 18

1.3.1. Objetivos general 18

1.3.2. Objetivos específicos 19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN..... 20

2.2. MARCO CONCEPTUAL 23

2.2.1. Transformadores de potencia..... 23

2.2.2. Fundamentos físicos 27

2.2.3. Fenómenos eléctricos y mecánicos..... 28

2.2.4. Fallas o errores del transformador de potencia..... 30



2.2.5. Conceptos básicos del análisis de respuesta de frecuencia.....	31
2.2.6. Métodos de análisis de respuesta de frecuencia	33
2.2.7. Impedancia vs frecuencia	34
2.2.8. Ejemplo de un cambio de geometría interna transformador.....	35
2.2.8. Subestación Chilota 220/22.9kV	35

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
3.1.1. Tipo de investigación.....	37
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN	37
3.3. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN	37
3.3.1. Características técnicas de la S.E. Chilota.....	39
3.4. MATERIAL EXPERIMENTAL	47
3.4.1. Analizador de respuesta en frecuencia.....	47
3.4.2. Normativa aplicable	48
3.4.3. Documentos de referencia	49
3.4.4. Portal web del coes	50
3.4.5. Técnicas e instrumentos para recolectar información.....	50
3.5. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS.....	51
3.5.1. Procedimiento de conexión equipo Frax 101 Megger	53
3.5.2. Conexión de Bushing de Lado 22.9kv	53
3.5.3. Inicio de pruebas de barrido de frecuencia SFRA	54
3.5.4. Datos generales de transformador de potencia Getra power 20 MVA. .	55
3.5.5. Datos de Placa de los Bushings 220kv	57
3.5.6. Datos de Placa de los Bushing 22.9kv	57
3.5.7. Datos de Placa de los Bushing 10 Kv	57
3.6. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	58
3.6.1. Hipótesis general.....	58



3.6.2. Hipótesis Específicas:	58
3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	58
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. RESULTADOS DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS ELÉCTRICAS	59
4.1.1. Inspección general del transformador	59
4.1.2. Foto del Transformador de Potencia.....	61
4.1.3. Conexión de Cables de Equipo Frax 101 Megger	62
4.1.4. Ingreso de datos al software Powerdb 11.2	63
4.1.5. Conexión primario con secundario y terciario abierto.....	64
4.1.6. Conexión secundario con primario y terciario abierto.....	66
4.1.7. Conexión terciario con primario y secundario abierto.....	69
4.1.8. Conexión primario con secundario en cortocircuito.....	71
4.1.9. Conexión primario con terciario en cortocircuito.....	73
4.1.10. Conexión de secundario con terciario en cortocircuito	75
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	77
4.3. DISCUSIÓN.....	78
V. CONCLUSIONES.....	79
VI. RECOMENDACIONES.....	80
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXOS.....	84

ÁREA: Ingeniería Eléctrica

TEMA: Sistemas de potencia

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de agosto de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transformador de potencia 20MVA	27
Figura 2: Parte interna del transformador de potencia	28
Figura 3: Partes del transformador de potencia trifásico	29
Figura 4: Gráfico de la impedancia vs frecuencia	34
Figura 5: Movimiento axial y radial en bobinas de transformador	35
Figura 6: Fotografía Real S.E. Chilota 220/22.9KV	36
Figura 7: Ubicación de Subestaciones de potencia	38
Figura 8: Diagrama Unifilar de la S.E Chilota	42
Figura 9: Esquema unifilar de la red eléctrica	44
Figura 10: Acoplamiento mutuo entre los circuitos de derivación hacia la S.E Ch.	47
Figura 11: Equipo de medición FRAX 101 MEGGER	47
Figura 12: Regiones de frecuencia según Norma IEEE	49
Figura 13: Conjunto de equipo software y cables de medición	52
Figura 14: Diagrama de transformador $\Delta - Y$	52
Figura 15: Equipo FRAX 101 MEGGER	53
Figura 16: Desconexión de cables de los Bushing 22.9Kv	54
Figura 17: Conexión de cables de prueba del equipo FRANK 101 MEGGER	54
Figura 18: Prueba con equipo FRAX 101 MEGGER	55
Figura 19: Foto de Placa del transformador de potencia	55
Figura 20: Foto de placa del transformador de potencia	56
Figura 21: Transformador de potencia 20 MVA	62
Figura 22: Cables de Prueba de equipo FRAX 10 Megger	62
Figura 23: Posición de los cables de prueba	63
Figura 24: Ingreso de datos al software PowerDB	63
Figura 25: Conexión primario con secundario y terciario abierto	64
Figura 26: Esquema de Conexión primario con secundario y terciario abierto	64



Figura 27: Prueba de SFRA Primario con Secundario y Terciario Abierto	65
Figura 28: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101	65
Figura 29: Conexión secundario con primario y terciario abierto.....	66
Figura 30: Esquema de conexión secundario con primario y terciario abierto	67
Figura 31: Prueba de SFRA Primario con Secundario y Terciario Abierto	67
Figura 32: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101	68
Figura 33: Conexión terciario con primario y secundario abierto.....	69
Figura 34: Esquema de conexión terciario con primario y secundario abierto	69
Figura 35: Prueba de SFRA terciario con primario y secundario abierto	70
Figura 36: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101	70
Figura 37: Conexión primario con secundario en cortocircuito	71
Figura 38: Esquema de conexión primario con secundario en cortocircuito	71
Figura 39: Prueba de SFRA Conexión primario con secundario en cortocircuito	72
Figura 40: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101	72
Figura 41: Conexión primario con terciario en cortocircuito	73
Figura 42: Esquema de conexión primario con terciario en cortocircuito	73
Figura 43: Prueba de SFRA Primario con Terciario en Cortocircuito	74
Figura 44: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101	74
Figura 45: Conexión secundario con terciario en cortocircuito	75
Figura 46: Esquema de conexión secundario con terciario en cortocircuito.....	75
Figura 47: Prueba de SFRA Primario con Terciario en Cortocircuito	76
Figura 48: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101	76
Figura 49: Resultados de mediciones SFRA	77



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Causas típicas de fallas en transformadores de potencia.....	31
Tabla 2: Coordenadas de las Subestaciones	39
Tabla 3: Parámetros del transformador de la S.E Chilota	45
Tabla 4: Parámetros eléctricos por tramos de las líneas de transmisión.....	46
Tabla 5: Datos de placa del transformador	56
Tabla 6: Datos de Placa de los Bushing 220KV	57
Tabla 7: Datos de Placa de los Bushing 22.9KV	57
Tabla 8: Datos de Placa de los Bushing 10 KV	57
Tabla 9: Inspección general del transformador	61



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 01: Diagrama Unifilar Subestación Chilota 220/22.9K	84
ANEXO 02: Diagrama Unifilar de Operación.....	84
ANEXO 03: FRAX 101 Megger Analizador de respuesta de frecuencia de barrido. ...	84
ANEXO 04: Planos de planta y detalles transformador de potencia.	84



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

MINEM	Ministerio de Energía y Minas.
MINAM	Ministerio del Medio Ambiente.
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
REDESUR	Red Eléctrica del Sur.
REA S.A.C	Instituto Nacional de Calidad
INACAL	Unidad Microcontroladora de Nodos
QUELLAVECO	Empresa Minera
CNE	Código Nacional de Electricidad.
NTP	Norma Técnica Peruana.
DGE	Dirección General de Electricidad.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos Electrónicos.
NTCSE	Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.
IEC	International Electrotechnical Commission.
FRAX 10	Modelo de equipo de prueba de la marca Megger.
SFRA	Análisis de Respuesta en Barrido de Frecuencia (en inglés Sweep Frequency Response Analysis)
COES-SINAC	Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional
NTCOTR	Norma Técnica para la Coordinación de la Operación en Tiempo Real de los Sistemas Interconectados.



RESUMEN

En la presente investigación se plantea una solución al problema de diagnóstico y evaluación de los desplazamientos internos del transformador de potencia de 20MVA S.E Chilota – Moquegua, la aplicabilidad y la efectividad del método SFRA y el equipo FRAX 101 de Megger. Por ello se tiene como objetivo es la aplicación del método SFRA para diagnosticar y evaluar las deformaciones internas del transformador de potencia, La presente investigación se llevó acabo en la subestación eléctrica de chilota – Moquegua, como objeto de estudio se tiene el transformador de potencia de 20MVA. Se plantea la aplicación de la metodología del tipo pre experimental al tener un solo grupo de medición. Con las pruebas FAT y pruebas SAT. En conclusión la investigación pre - experimental realizado en este proyecto demuestra En pruebas realizadas en los Terminales Alimentados : 3u1-3u2-3v-3w / Terminales Abiertos : 1U-1V-1W-1N-2u-2v-2w-2n, en el los rangos de frecuencias ($100\text{kHz} < f > 1\text{MHz}$) zona influencia de los Bushings, Las gráficas nos muestran una alteración en la zona de conexiones Esto debido a que en fabrica utilizaron unos bushings de prueba, .en los demás conexiones no se encontraron ningún tipo de deformaciones en el núcleo del transformador ni desplazamientos entre bobinados. Lo cual indica que el transformador de potencia, no sufrió golpes externos ni internos, por lo tanto llegamos a la conclusión de que el equipo FRAX 101 MEGGER es una herramienta de diagnóstico para aplicar en transformadores de potencia. Por tanto el método SFRA es un método para diagnosticar y evaluar la deformación típica de los devanados del transformador en el sitio de manera efectiva y precisa.

Palabras clave: Transformadores de potencia, SFRA, pruebas eléctricas, Megger, calidad de energía



ABSTRACT

In the present investigation, a solution to the problem of diagnosis and evaluation of the internal displacements of the 20MVA S.E Chilota - Moquegua power transformer is proposed, the applicability and effectiveness of the SFRA method and the FRAX 101 Megger equipment. For this reason, the objective is the application of the SFRA method to diagnose and evaluate the internal deformations of the power transformer. The present investigation was carried out in the electrical substation of Chilota - Moquegua, as an object of study, the power transformer of 20MVA. The application of the methodology of the pre-experimental type is proposed by having a single measurement group. With the FAT tests and SAT tests. In conclusion, the pre-experimental investigation carried out in this project demonstrates In tests carried out in the Powered Terminals: 3u1-3u2-3v-3w / Open Terminals: 1U-1V-1W-1N-2u-2v-2w-2n, in the frequency ranges ($100\text{kHz} < f > 1\text{MHz}$) zone of influence of the Bushings, The graphs show us an alteration in the zone of connections. This is due to the fact that the factory possibly used some test bushings. In the other connections, no type of deformations in the core of the transformer or displacements between windings. Which indicates that the power transformer did not suffer external or internal shocks, therefore we conclude that the FRAX 101 MEGGER equipment is a diagnostic tool to apply to power transformers. Therefore the SFRA method is a method to effectively and accurately diagnose and evaluate the typical deformation of transformer windings on site.

Keywords: Power transformers, SFRA, electrical tests, Megger, power quality



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis propone un estudio y evaluación de la metodología de diagnóstico de devanados de transformadores de potencia denominada Análisis de barrido de Frecuencia (SFRA), y de herramientas que ayuden al diagnóstico con la misma, dado que los devanados de los equipos presentan fallas en los transformadores. Por lo tanto, el estudio de herramientas para el monitoreo y diagnóstico del estado de los devanados de los transformadores de potencia es una necesidad y se convierte en una alternativa viable para la reducción de costos por paradas no planificadas para las empresas del sector eléctrico.

Se propone un estudio y evaluación de diagnóstico de devanados de transformadores de potencia, denominada análisis de barrido de frecuencia;(SFRA) y el uso del equipo FRAX 101 MEGGER. Y ver la aplicabilidad de este método. El diagnóstico del estado de los devanados de los transformadores se realiza mediante la comparación de diagramas obtenidos con la prueba de respuesta en frecuencia, que indican o no, la presencia de fallas en el devanado en estudio. Los diagramas SFRA comparados se refieren a mediciones realizadas en el transformador antes y/o después de que ocurra algún evento que se sospeche haya dañado el transformador, ya que en la actualidad se tiene poco conocimiento de este método de medición y/o prueba en transformadores de potencia.

Los transformadores de potencia en pleno siglo XXI son importantes en los sistemas de potencia, transmisión y distribución de energía eléctrica, ya que son responsables de la conversión de grandes bloques de energía (Muhammad, 1999; Ras, 1994; Stevenson, 1979). Son los elementos centrales de las subestaciones eléctricas y en



general son también los elementos más caros. Fallas en transformadores de potencia con su retiro de operación representan un gran problema, ya que pueden causar importantes paradas, eventualmente de larga duración. Además, los costos asociados a su mantenimiento correctivo son generalmente elevados (Álvarez, 2014; Bhag y Huseyin, 2003; Solis, 2013; Wildi, 2007).

Los aspectos constructivos de los transformadores de potencia son dimensionados para garantizar la protección en relación con las condiciones de funcionamiento en subestación, y con ello su parte activa (núcleo y devanados) está protegida por un depósito metálico de alta resistencia, lo que dificulta su proceso de mantenimiento. En este contexto, las técnicas de mantenimiento la predicción basada en mediciones indirectas es de gran interés (Hart, 2005; Pandya y Parekh, 2013; Quispe y Bolívar, 2017)

Las técnicas tradicionales han demostrado ser insuficientes para detectar fallas internas y movimientos de bobinado, Sin embargo, el método de barrido de frecuencia ha demostrado ser una técnica eficiente para detectar las deformaciones del devanado del transformador de 20MVA (Alcorta et al., 2006).

Por lo tanto, es muy importante detectar y diagnosticar fallas en los devanados de los transformadores antes de ponerlos en operación (Castaño, 2011). El método de análisis de respuesta de frecuencia (FRA) es una poderosa herramienta para detectar la integridad mecánica interna del devanado, sin necesidad de desmontar la unidad. Ha resultado ser un método preciso y eficaz a través de numerosas pruebas realizadas (Duncan y Mulukutla, 2003; Román, 2020)

La prueba de frecuencia de barrido (SFRA) en cuanto a el análisis de respuesta del sistema es principalmente inyectar una señal en un extremo de un devanado y medir la respuesta de esta. Se obtienen respuestas con grandes variaciones en la atenuación



sobre el rango de frecuencia medido como resultado de variaciones en la impedancia de las distribuciones LCR complejas de los devanados (Arteaga, 2018). Dado que las capacitancias y las inductancias dependen de la geometría detallada del devanado, cualquier movimiento genera cambios en las frecuencias en las que se producen las resonancias. La identificación de cambios en la respuesta de frecuencia es la esencia del análisis y diagnóstico de la integridad mecánica (Álvarez, 2014; Sáenz et al., 2010; Villalobos, 2014).

En pruebas realizadas en el lado Primario, Secundario y Terciario en vacío, no evidenciaron ningún tipo de deformaciones en el núcleo del transformador, así como tampoco en el desplazamiento entre bobinados. Lo cual indica que el transformador de potencia, no sufrió deformaciones en su geometría interna.

De los resultados sobre las pruebas de SFRA y el análisis de barrido de frecuencias del transformador de Potencia de 20MV, que las curvas características se encuentran dentro de los valores aceptables y también se afirma que las gráficas de pruebas de fábrica FAT, son similares a las pruebas realizadas en campo SAT.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Problema general

¿Se puede considerar al método de barrido de frecuencia como herramienta de diagnóstico y evaluación en los desplazamientos para el transformador de potencia de 20MVA de la SE Chilota – Moquegua 2020?



1.1.2. Problemas específicos

¿Cuál es el nivel de aplicabilidad y efectividad del método del análisis de barrido de frecuencia para el diagnóstico de transformadores de potencia de 20MVA de la SE Chilota – Moquegua 2020?

¿El equipo FRAX 101 MEGGER puede ser una herramienta de diagnóstico, que se pueda aplicar en transformadores de potencia de 20MVA en la SE Chilota – Moquegua 2020?

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

De manera general, este trabajo de tesis propone un estudio y evaluación de la metodología de diagnóstico de devanados de transformadores de potencia denominada Análisis de barrido de Frecuencia (SFRA), y de herramientas que ayuden al diagnóstico con la misma, dado que los devanados de los equipos presentan fallas en los transformadores. Por lo tanto, el estudio de herramientas para el monitoreo y diagnóstico del estado de los devanados de los transformadores de potencia es una necesidad y se convierte en una alternativa viable para la reducción de costos por paradas no planificadas para las empresas del sector eléctrico.

La investigación pretende ampliar conocimientos en el campo de sistemas de potencia y la aplicación de métodos más confiables de diagnósticos de transformadores de potencia sin la necesidad de desmontarlas, entendiendo que las normas IEEE C57.149, IEC 60076-18, CIGRE 342_2008 avala el uso de este método, quienes proporcionan información suficiente para realizar las mediciones y así como también para los equipos.

La justificación metodológica de este trabajo de tesis es que se propone un estudio y evaluación de diagnóstico de devanados de transformadores de potencia, denominada análisis de barrido de frecuencia;(SFRA) y el uso del equipo FRAX 101 MEGGER. Y ver la aplicabilidad de este método. El diagnóstico del estado de los devanados de los



transformadores se realiza mediante la comparación de diagramas obtenidos con la prueba de respuesta en frecuencia, que indican o no, la presencia de fallas en el devanado en estudio. Los diagramas SFRA comparados se refieren a mediciones realizadas en el transformador antes y/o después de que ocurra algún evento que se sospeche haya dañado el transformador, ya que en la actualidad se tiene poco conocimiento de este método de medición y/o prueba en transformadores de potencia.

La justificación práctica de la presente tesis, se indagará el uso de esta herramienta para el diagnóstico mediante el uso de barrido de frecuencia y evaluación de los desplazamientos internos de un transformador de potencia, porque estas pruebas pueden producir imágenes del interior de un transformador y evidenciar cambios imperceptibles en la estructura mecánica ya sea en los núcleos, devanados, temperatura, humedad correspondientes a el sistema de aislamiento, electricidad junto con otros factores que no implican operaciones complicadas y costos adicionales. Las técnicas tradicionales han demostrado ser insuficientes para detectar fallas internas y movimientos de bobinado. en transformadores. Sin embargo, el método de frecuencia ha demostrado ser un diagnóstico eficiente para detectar las deformaciones del devanado del transformador.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivos general

Analizar la aplicación de la prueba del método de barrido de frecuencia como herramienta de diagnóstico y evaluación de desplazamientos para el transformador de potencia 20MVA de la S.E Chilota – Moquegua 2020.



1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la gran aplicabilidad y efectividad del método del análisis de barrido de frecuencia para el diagnóstico de transformadores de potencia de 20 MVA de la S.E Chilota – Moquegua 2020.
- Determinar si el equipo FRAX 101 MEGGER puede ser una herramienta de diagnóstico que se pueda aplicar en transformadores de potencia 20MVA en la S.E Chilota – Moquegua 2020.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

A nivel internacional Arteaga (2018), en su de investigación tuvo como objetivo principal determinar la utilidad de la prueba de Análisis de la Respuesta en Frecuencia – FRA; los resultados evidenciaron después que el autor elaboró un patrón de modelo de circuito RLC, donde se realizó el manejo de la prueba como un método predictivo y demostró como el FRA ayuda a la prevención y localización de fallas internas de los transformadores de potencia, el autor menciona que en Colombia la aplicación de la técnica de barrido de frecuencia es bajo por la falta de ejecución del tipo de pruebas.

Guillén (2015), en su investigación que tuvo como objetivo principal desarrollar un método para localizar y detectar descargas parciales en los devanados de transformadores de potencia, utilizando la información de alta frecuencia a fin de cuantificar la degradación de los sistemas de aislamiento, se utilizó como instrumento el algoritmo de localización basado en la transformación de WAVELET, con el cual se obtiene la envolvente instantánea de una señal o EWT (Envelope Wavelet Transform), se utilizó la entropía en la propagación de señales de DP; los resultados evidenciaron que del análisis del tiempo de propagación de las descargas parciales y la inyección de señales de DP empleando mediciones en ambos extremos del devanado.

Castaño (2011), en su investigación tuvo como objetivo definir los factores que afectan la respuesta de la frecuencia de los transformadores; así como determinar los transformadores piloto, la variación de la respuesta en transformadores; los resultados evidenciaron que la herramienta de análisis de frecuencia del FRA, es sensible a cualquier



variación del transformador, así como en la ejecución de la prueba, el autor recomienda la preparación y prueba del SFRA.

En artículo científico Román (2020), que tuvo objetivo analizar el tipo de fallas en los transformadores y explicar la aplicación de los bucles o lazos inductivos en estudios de protección contra rayos directos en pararrayos tipo Franklin, resistividad del terreno, cambios fuertes en la impedancia del sitio de instalación de los conductores de bajada, variaciones rápidas asociadas con ataques de rayos negativos y voltajes causados por descargas indirectas, creando el sobreimpulso, los resultados han evidenciado que la magnitud no se vio afectada en los convertidores de distribución, entendiéndose que más de 83% de transformadores quemados tienen pararrayos y más de 95% están puestos a tierra, es decir, las máquinas están protegidas contra sobretensiones por rayo de alta tasa. Además, se encontró que los transformadores con mayor falla fueron los de 75 y 112.5 kVA (28% y 22% respectivamente), con una fracción del primero y todos los transformadores de este tipo, el segundo está montado sobre la estructura H, así como también el transformador de 5 kVA (15%) instalado en el poste.

Mientras que Solis (2013), en su investigación que tuvo como objetivo como conocer las instrucciones necesarias y procedimientos a seguir para el montaje y energización de transformadores de potencia que se instalan por primera vez, los resultados demostraron que los medidores manuales analógicos en caso de la aguja del amperímetro deflexiona, y el voltímetro es diferente a ella, lo que determina que el transformador bajo prueba no determina el balance relativo de un corto circuito abierto en uno de los derivados, por lo que concluye que la medición aplica solo a transformadores de potencia inductivo.



Zorrilla et al. (2020), en su investigación que tuvo como objetivo conocer los sistemas de transmisión de energía eléctrica y su exportación de energía en alta tensión a grandes distancias, los resultados demuestran que la evolución de las técnicas de monitoreo de los transformadores tienen métodos no invasivos, utilizando software y hardware avanzados que obtienen datos de análisis de más confiabilidad en el caso de FDS, concluyendo que las técnicas de FRA y FDS reducen los costos de mantenimiento y son de mayor confiabilidad operativa en los transformadores de potencia.

A nivel nacional, la investigación de Álvarez (2014), que tuvo como objetivo analizar el método como una proposición a ser confirmada experimentalmente por pruebas en transformadores reales, al comparar la distribución de tensiones calculadas a partir de varios puntos de medición con las de valor empírico, se demuestra que el modelo también es validado por Cigré JWGA2/ C.39 Grupo de Trabajo Conjunto, comparando los resultados obtenidos con 11 herramientas computacionales transitorias miembros de JWGA2./C.39, la investigación buscó desarrollar un modelo de transformador de potencia que sea capaz de reproducir la respuesta transitoria a lo largo de los devanados debido a transitorios de muy alta frecuencia, concluyendo que el modelo propuesto logra predecir la predicción de la respuesta transitoria interna a lo largo de los devanados tanto en el núcleo y en el caso del transformador de tensión es bastante flexible y lo suficientemente preciso utilizando un solo disco como unidad base en la personalización de los devanados. Las técnicas de análisis modal y las transformadas numéricas de Laplace descritas en detalle y aplicadas en el modelo propuesto han demostrado tener ventajas inherentes a la hora de obtener soluciones de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo.

Aquino (2017), en su investigación que tuvo como objetivo evaluar la actividad del transformador a través del análisis y respuesta del barrido de frecuencia



electromecánico en territorio peruano, los resultados demostraron que la actividad que tuvo el transformador mediante el ensayo de análisis de respuesta de barrido de frecuencia por fase demostrando efectividad en la parte activa, concluyendo que este tipo de análisis proporciona resultados fiables, que mantienen consistencia en las mediciones en pruebas y de fábrica.

Villalobos (2014), en su investigación que tuvo como objetivo facilitar la comprensión de la interpretación de los resultados gráficos de la respuesta de frecuencia, desde una forma ideal para realizar pruebas SFRA, y propuso una metodología para interpretar las medidas de respuesta de las frecuencias generadas para identificar deficiencias mecánicas por desplazamiento del núcleo del transformador y devanados y para tomar decisiones adecuadas en el diagnóstico del desarrollo de operación de transformadores de tensión, concluyendo que la prueba del método de barrido de frecuencia es una técnica que ha mostrado un avance significativo en la detección rápida de fallas en transformadores de presión. consiste básicamente en el desplazamiento o movimiento mecánico de las bobinas y/o núcleos que modifican su geometría interna.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Transformadores de potencia

Según Ras (1994), es considerado un dispositivo estático eléctrico utilizado para convertir un cierto valor de voltaje AC (corriente) en otro o varios valores diferentes de voltaje (corriente) con la misma frecuencia. Equipo estacionario con dos o más devanados, con el fin de transmitir energía eléctrica, a la misma frecuencia, por medio de inducción electromagnética para convertirla en un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema, generalmente los valores de estas corrientes y voltajes son diferentes.



Bhag y Huseyin (2003), mencionan que un transformador de potencia es considerado una máquina que permite cambiar ciertas funciones de la corriente alterna, siendo estas el voltaje o el amperaje, manteniendo la frecuencia y la potencia.

Wildi (2007), menciona que un transformador consta de dos devanados aislados entre sí pero enlazados en el mismo núcleo magnético, la corriente variable establece el flujo magnético y el tiempo en el núcleo; la alta filtración del núcleo, la mayor parte del flujo se une al otro generando un voltaje que varía con el tiempo; la bobina se puede conectar a la fuente o a la carga convirtiéndose en segunda siendo proporcional al número de vueltas que tiene (Bhag y Huseyin, 2003; Solis, 2013).

Un transformador escalonado, presenta un voltaje mayor secundario al voltaje primario, se utiliza a la vez para conectar una línea de transmisión de voltaje relativamente alto a un generador de voltaje relativamente bajo, donde un transformador reductor tiene un voltaje más bajo en el lado secundario (Sáenz et al., 2010).

El principio de funcionamiento es la inducción electromagnética, cuando el voltaje del lado primario del transformador fluye a través de la bobina primaria produciendo un flujo alterno en el núcleo, de modo que las bobinas primaria y secundaria se enrollarán electromagnéticamente. Según el principio de inducción electromagnética, el flujo magnético alterno producirá una fuerza electromotriz a través de los dos extremos de la bobina y su magnitud (Álvarez, 2014; Wildi, 2007; Zorrilla et al., 2020). El voltaje está en el lado de voltaje más bajo; cuando el lado secundario del transformador está abierto, es decir, cuando el transformador está descargado, el voltaje entre los terminales primario y secundario es decir, la frecuencia primaria y secundaria permanecen constantes, por lo que se pueden lograr cambios de voltaje.



Stevenson (1979), menciona que un transformador consta de un magnético y un alambre de bobinado, pudiendo llegar a ser más de dos, la primera que es conectada a la fuente de alimentación se denomina bobina primaria, y el resto de las bobinas se denominan bobina secundaria o terciaria.

Los componentes de un transformador tienen varios elementos, el núcleo está compuesto por chapas de acero al silicio que son aisladas entre sí, mientras que los devanadores son un hilo de cobre enrollado a través del núcleo en sus extremos y tiene una capa aislante. Para su correcto funcionamiento como menciona Muhammad (1999), la corriente tiene que ser alterna y realizar diferentes variaciones de flujo ya que un transformador no puede ser utilizado por una corriente continua según la Ley de Lenz,

Los transformadores de potencia se clasifican según los devanados:

- Doble devanado, es cuando cada fase se instala en el mismo núcleo, estos pueden ser primario y secundario y pueden estar devanados por separado y aislados entre sí.
- Tridevanado, son los tres devanados por fase, el primario y el secundario, se caracterizan por ser devanados que se enrollan por separado y se aíslan entre sí.
- Autotransformador, es un conjunto de derivaciones del centro del devanado como salida primaria o secundaria.

Un transformador de tres devanados requiere que la capacidad del devanado primario sea mayor o igual a la capacitancia de los devanados secundario y tercero. Los porcentajes de potencia de los tres devanados en orden de alta tensión, media tensión y baja tensión son: 100/100/100, 100/50/100, 100/100/50 y lo que se necesita es la bobina secundaria y la bobina pequeña. El nivel no puede funcionar a plena carga (Álvarez, 2014).



En general, el voltaje del tercer devanado es más bajo y se usa principalmente para suministro de energía o equipos de compensación en el área cercana, y se usa para conectar tres niveles de voltaje. Transformadores automáticos: Existen dos tipos de arriostramientos o arriostramientos. Debido a su baja pérdida, peso ligero y uso económico, es ampliamente utilizado en la red eléctrica de súper alto voltaje. El modelo de transformador automático pequeño comúnmente utilizado es 400V/36V (2V), que se utiliza para suministrar energía para el sistema de iluminación de seguridad y otros equipos (Arteaga, 2018; Solis, 2013).

Los transformadores de potencia se clasifican según el medio aislante:

- Transformadores sumergidos en aceite (retardantes de llama, no retardantes de llama)
- Transformadores de tipo seco y transformadores aislados con gas 110kvsf6.

Para efectos de nuestra investigación nos enfocaremos en los transformadores de potencia de tres devanados, debido a que su robustez, tecnología, inversión y costos de pérdida por falla los hacen dignos de especialización.



Figura 1: Transformador de potencia 20MVA
Elaboración propia

2.2.2. Fundamentos físicos

Los transformadores primarios y secundarios están juntas o enrolladas una sobre la otra; el transformador de menor voltaje está situada en la parte interna y está más cerca del núcleo, sus dos objetivos principales son:

- Resolver el problema del aislamiento del devanado de alta tensión desde el núcleo.
- Disponer de los dos devanados en el núcleo cuando el flujo dispersión es menor y separarlos.

En este sentido el campo magnético como variable hará que la inducción electromagnética aparezca como fuerza electromotriz en los dos extremos de la bobina secundaria.



Figura 2: Parte interna del transformador de potencia

Fuente: HV Electric

Hart (2005), menciona que el transformador trabaja en base de la inducción electromagnética, ya que al aplicar una fuerza electromotriz a la bobina primaria genera una diferencia de potencia creando un flujo magnético en el núcleo y con el movimiento primario y secundario crea una fuerza electromagnética.

Abellan et al. (2000), menciona que una de las leyes de la física es que la inducción ocurre solo cuando el conductor se mueve perpendicularmente a la dirección del campo magnético. Este movimiento es necesario para que ocurra la inducción, pero es un movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético.

2.2.3. Fenómenos eléctricos y mecánicos

El estado estacionario del transformador depende de los siguientes fenómenos eléctricos y mecánicos, donde la capacidad del transformador representa el almacenamiento de campo eléctrico y los valores son idénticos cuando el transformador se diseña y opera dentro de su capacidad nominal, los valores de capacitancia varían a medida que ocurren o pueden ocurrir desplazamientos en la trayectoria de los conductores

de la bobina. El efecto capacitivo en transformadores es parte del modelo eléctrico del circuito RLC (Duncan y Mulukutla, 2003).

Al escanear señales a diferentes frecuencias, se grafica el comportamiento de onda en base a los valores de capacitancia en paralelo que se encuentran en la construcción de la bobina o bobina sobre la cual se realiza la prueba. Se pueden encontrar diferencias por la curva de condición inicial en el transformador o por normas de diseño y construcción en cuanto a los posibles errores o desplazamientos en su construcción (Wildi, 2007).

El comportamiento de la inducción en los transformadores juega principalmente un papel y la razón de la variación del nivel de tensión entre los devanados primario y secundario intermedio, el intercambio magnético del núcleo y la aplicación de la inducción liberada por el líquido eléctrico. En su estado nominal de funcionamiento, el núcleo está sometido a esfuerzos mecánicos y dinámicos que pueden provocar desplazamientos (Stevenson, 1979).

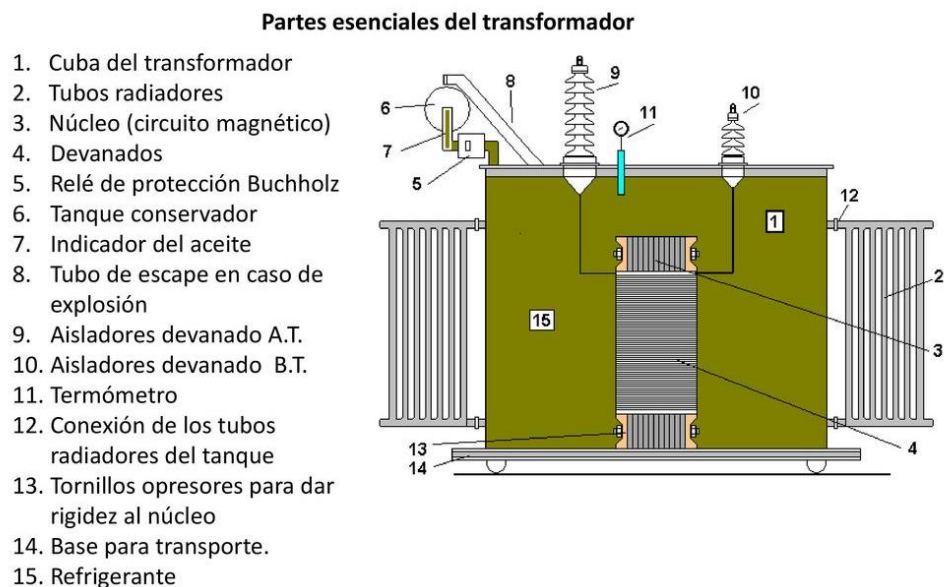


Figura 3: Partes del transformador de potencia trifásico

Fuente: Vargas (2022)



2.2.4. Fallas o errores del transformador de potencia

La falla o falla ocurre porque un transformador de tensión es un conjunto formado por varios elementos fijos, la mayoría de las fallas se deben al sobrecalentamiento de sus partes vivas. La falla mecánica se caracteriza principalmente por fuerzas que deforman los elementos internos del transformador provocando cambios (Bhag y Huseyin, 2003; Quispe y Bolívar, 2017).

Los tipos de fallas que se pueden detectar mediante la técnica FRA son mediante el movimiento del núcleo, falla de puesta a tierra del núcleo, distorsión de la bobina, desplazamiento del devanado, colapso parcial de la bobina, devanado de la bobina y cortocircuito o rotura de hilo (Zorrilla et al., 2020).

La naturaleza de estos errores está relacionada con el pico de corriente, que en algunos casos puede llegar a 20 veces el valor nominal.

Pueden ser generados por una anomalía síncrona o por un cortocircuito de fase a tierra. La corriente transitoria de gran amplitud provoca los fenómenos anteriores y cambia la condición interna de los elementos operativos dentro del transformador (Duncan y Mulukutla, 2003).

La capacidad del equipo para transportar estas corrientes depende de la resistencia de cortocircuito especificada por el fabricante del transformador, que está determinada por la reactancia de fuga en el núcleo del dispositivo y el flujo que excede el flujo generado en el núcleo cuando hay un pico. entonces podemos decir que la tecnología SFRA es importante porque puede ver que estas anomalías se reflejan en la curva de exploración de la señal en diferentes frecuencias. Vale la pena señalar que el nuevo transformador también puede detectar fallas mecánicas que pueden aparecer durante el transporte desde la fábrica hasta el sitio de servicio, que pueden ser el resultado de

vibraciones, generación de fallas eléctricas y complicaciones que amenazan la vida (Abellan et al., 2000; Wildi, 2007).

En 1995, Bak-Jensen estudió experimentalmente la detección de fallas y Envejecimiento del transformador a través de la respuesta de frecuencia. en los ensayos utilizó un generador sinusoidal de frecuencia variable, donde las señales de entrada y salida se midieron discretamente, los cambios comprobados en la función de transferencia cuando el devanado estaba deformado o con algún desplazamiento, cortocircuitos y cambios en la permitividad del petróleo (Alcorta et al., 2006). Las fallas de los transformadores de potencia se pueden caracterizar como eléctricas, mecánicas o térmicas. Las causas de las fallas pueden ser internas o externas (Vallés et al., 2011)

Tabla 1: Causas típicas de fallas en transformadores de potencia

CAUSAS INTERNAS	CAUSAS EXTERNAS
Deterioro del aislamiento	Daños por rayos
Pérdida estrecha de liquidación	Transitorios por conmutación en el sistema
calentamiento excesivo	Sistema sobrecargado
Oxígeno en papel/aceite	Corto circuitos
Humedad	
Contaminación por objetos sólidos en aceite aislante	
Descargas parciales	
defecto de manufactura	
Resonancia en bobinado	

Elaboración propia

2.2.5. Conceptos básicos del análisis de respuesta de frecuencia

Varias técnicas como monitoreo térmico, mediciones de descargas parciales, análisis de gas disuelto (DGA) y mediciones de $\tan \delta$ y capacitancia, etc., están disponibles para la evaluación de la condición del transformador. Sin embargo, cada uno de estos métodos se aplica para la identificación de un tipo específico de problema y ninguno de estos métodos es adecuado para detectar el desplazamiento o la deformación de los devanados (Pandya y Parekh, 2013).



Además, las deformaciones de los devanados en los transformadores son difíciles de detectar mediante pruebas de diagnóstico convencionales, como las mediciones de la relación de espiras, la impedancia/inductancia de los devanados o la corriente de magnetización, etc. método de impulso de voltaje (LVI) y método de análisis de respuesta de frecuencia (FRA) (Ras, 1994).

Debido a la resistencia de la bobina, la inductancia de la bobina y la capacitancia de la capa aislante entre bobinas, bobinas, bobinas y núcleos, núcleos y tanques, tanques y bobinas, etc. Una red compleja de componentes RLC. El daño físico al transformador interrumpe esta red RLC. El método SFRA se usa para determinar estos pequeños cambios en los parámetros de la red RLC dentro del transformador y a la vez determinar su respuesta, donde esta respuesta de frecuencia a menudo proporciona transmisión de red a diferentes frecuencias (Zorrilla et al., 2020).

En general, los cambios introducidos por el desplazamiento o la deformación de los devanados pueden detectarse externamente mediante el método de respuesta de frecuencia aplicado en las terminales de los devanados del transformador. En el método SFRA, se aplica una señal de bajo voltaje de frecuencias variables al devanado del transformador, registrándose en las entradas y salidas de las firmas SFRA.

La interacción de estas 2 señales se llama funcionalidad de transferencia, desde la cual tienen la posibilidad de obtener tanto la amplitud como las variaciones del ángulo de etapa a la frecuencia. La capacidad de transferencia de cada frecuencia positiva permite que la red RLC del transformador. Por consiguiente, el procedimiento FRA se puede usar para medir la capacidad de transmisión, examinar las propiedades de contestación de frecuencia y diagnosticar el estado de la bobina en un extenso rango de frecuencias (Álvarez, 2014).



2.2.6. Métodos de análisis de respuesta de frecuencia

El principio del método SFRA consiste en medir la respuesta del transformador en un amplio ancho de banda de frecuencia. Actualmente, las pruebas generalmente se ejecutan en transformadores descargados y sin energía. Se pueden considerar diferentes tipos de señales de entrada y diferentes niveles. Existen dos métodos de medición principales, según el tipo de señal de entrada. La observación y la respuesta de frecuencia de pulso (IFRA) mediante el análisis de respuesta de frecuencia de barrido (SFRA), el esquema IFRA que utiliza una única señal aperiódica inyectada en uno de los terminales del transformador disponibles como excitación o entrada; la forma de onda del pulso de entrada garantiza adecuadamente un componente de frecuencia amplio en su valor máximo, teniendo como resultado la creación de un voltaje inducido en el otro extremo del mismo transformador (Wildi, 2007).

El espectro de frecuencia de la señal suministrada (entrada) y la señal medida (salida) se obtiene mediante los siguientes métodos matemáticos, como la transformada rápida de tasa de Fourier (FFT). El espectro de frecuencias de la señal suministrada (entrada) y de la señal medida (salida) se obtiene mediante métodos matemáticos como la Transformada Rápida de Fourier (FFT). En el método de medición SFRA, la señal de entrada es una señal sinusoidal con amplitud LV (generalmente en el rango de 1 a 20 V) aplicada a través de los terminales del transformador en una frecuencia de barrido (rango de 1 a 20 V) (Alcorta et al., 2006).

La función de transferencia (TF) surge de las relaciones de salida/entrada de varias frecuencias [esto se aplica a las conexiones del transformador a través del barrido de frecuencia (rango de hercios a milihercios)]. La función de transferencia (TF) surge de las relaciones de salida/entrada de varias frecuencias [esto se aplica a las conexiones del transformador a través del barrido de frecuencia (rango de hercios a milihercios)] (Hart,

2005). Nuevamente, la función de transferencia (TF) se obtiene a partir de las relaciones de salida/entrada de varias frecuencias [12, 13]. El método IFRA es muy rápido (solo toma unos minutos), mientras que el método SFRA es muy lento (alrededor de 2 horas).

2.2.7. Impedancia vs frecuencia

- **Resistencia R:** Comportamiento constante y plano en cualquier frecuencia.
- **Reactancia inductiva X_L :** Incremento de impedancia con la frecuencia. En baja frecuencia simula un corto circuito.
- **Reactancia capacitiva X_C :** Incremento de impedancia con la frecuencia. En baja frecuencia simula un corto circuito.

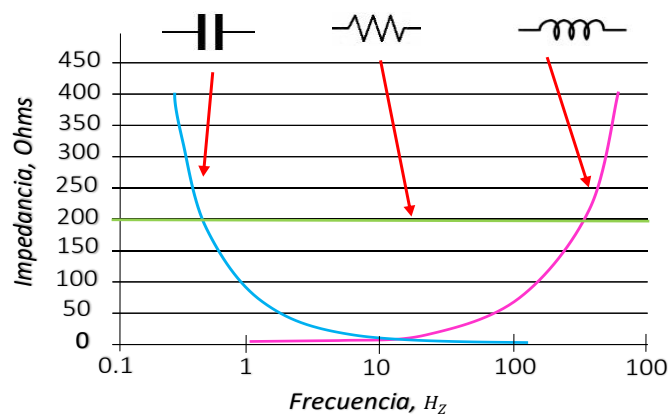


Figura 4: Gráfico de la impedancia vs frecuencia
Elaboración propia

Rangos de frecuencia que activan o excitan los diferentes tipos de fallas al interior del transformador de potencia.

La prueba de SFRA permite detectar los distintos tipos de fallas que se puedan presentar en el transformador en tres rangos de frecuencia. Se evidencia los cambios en la geometría de devanados y/o núcleo

Estas variaciones en la respuesta para los diferentes rangos de frecuencia son:

- **20Hz-2KHz:** Deformación en el núcleo, espiras en corto y magnetismo residual, circuitos abiertos. Fallas que están presentes en el núcleo.
- **2KHz-400KHz:** Movimientos de devanados en relación a cada uno, pérdida en la sujeción de devanados.
- **400KHz-2MHz:** en esta zona ya entra a problemas en las conexiones internas del transformador malas conexiones entre los devanados como en la sujeción a las boquillas. movimiento de los cables de conexión (devanados y cambiadores de tap).

2.2.8. Ejemplo de un cambio de geometría interna transformador

En la figura se evidencia, la presencia de movimientos radiales y axiales del devanado.



Figura 5: Movimiento axial y radial en bobinas de transformador

Fuente: Robalino (2011.)

2.2.8. Subestación Chilota 220/22.9kV

Esta instalación tiene dos niveles de tensión (220 kV y 22,9 kV). Esta subestación será construida con una configuración de doble barra con seccionador de transferencia en el nivel de 220 kV, y de simple barra en el nivel de 22,9 kV.



Figura 6: Fotografía Real S.E. Chilota 220/22.9KV

Fuente: Redesur S.A.C.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

La metodología que se planteó para el desarrollo de la presente investigación es de tipo aplicada ya que la investigación deriva de acciones; el diseño de investigación fue pre-experimental, este diseño consiste en dar tratamiento o administrador un solo grupo y realizar la medición, en este tipo de diseño de investigación no hay manipulación de la variable independiente, tampoco una evaluación previa del nivel que tenía el grupo o las variables dependientes antes del estímulo (Hernández et al., 2014), el diseño permitió a que los datos e información sean obtenidos de manera teórica, práctica, para ello se recurrió la información proporcionada por el equipo y a bibliografías establecidas en tesis de investigación, artículos, manuales, catálogos, publicaciones electrónicas, etc. Así mismo, se utilizó el equipo FRAX 101 DE MEGGER.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN

La población para el presente estudio será la subestación eléctrica de Chilota 220/22.9kV y la muestra será el transformador de potencia de 20MVA de la marca GETRA POWERS.

3.3. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN

La subestación Chilota 220/22,9 kV se ubica en la sierra de la región Moquegua, en la localidad de Chilota, esta a una altitud de 4.500 m.s.n.m, cerca de las carreteras Puno – Moquegua está ubicado entre las torres entre las 225 y 226 de la línea de transmisión 220 kV Puno – Moquegua (L-2030).

En la siguiente figura se muestra una vista satelital indicando la ubicación de las subestaciones.



Figura 7: Ubicación de Subestaciones de potencia

Fuente: Red eléctrica del sur

Las coordenadas UTM que delimitan la zona de actuación en la subestación Chilota, a una cota promedio de 4.579,36 m. sobre el nivel del mar, son las que se indican en el cuadro inferior. Las coordenadas del 1-5 son los ejes de replanteo y las coordenadas A-K son las coordenadas de los vértices de la plataforma.



Tabla 2: Coordenadas de las Subestaciones

COORDENADAS UTM PLATAFORMA		
PUNTOS	X	Y
1	352649.8586	8164535.153
2	352642.7672	8164493.756
3	352685.8014	8164537.654
4	352748.8818	8164526.844
5	352672.2884	8164458.804
A	352660.1487	8164559.653
B	352655.6388	8164533.337
C	352659.5813	8164532.661
D	352649.4465	8164473.523
E	352660.298	8164447.162
F	352749.4992	8164431.874
G	352755.5968	8164467.455
H	352793.8886	8164460.893
I	352806.0335	8164431.706
J	352670.0164	8164431.071
K	352666.2596	8164558.606

Fuente: Red Eléctrica del Sur

3.3.1. Características técnicas de la S.E. Chilota

- **Configuración de Barras 220kv**

La configuración es de barra doble con seccionador de transferencia.

- **Equipamiento 220kv**

Esta subestación está equipada de las siguientes bahías en 220kV

- 1 bahía para la conexión al transformador a 220/22.9/10 Kv
- 2 bahías para las líneas, una hacia la SE Puno y otra hacia la SE Moquegua
- 1 bahía para acoplamiento de barras
- 1 transformador de potencia de 20/20/3 MVA (ONAN), 26/26/4 MVA (ONAF), 220/22.9/10 kV.

El patio de llaves de 220 kV de la nueva subestación cuenta con el siguiente equipamiento del tipo convencional, instalado al exterior:



A. Bahía de línea (para cada una de las posiciones):

- 1 Interruptor de operación 220 kV.
- 3 Seccionadores de barras (uno de ellos tipo pantógrafo)
- 1 Seccionador de línea.
- 3 Trafos de corriente de cuatro núcleos (tres núcleos de protección 5P20 y un núcleo de medición clase 0.2s).
- 3 Transformadores de tensión de tipo capacitivo de tres núcleos (dos núcleos de protección 30 VA clase de protección 3P y un núcleo de medición 30 VA clase de precisión 0.2).
- 1 Grupo de Pararrayos.
- 1 Grupo de Trampas de onda.

B. Bahía de conexión al transformador

- Interruptor de operación 220 kV.
- 2 Seccionadores de barras
- 3 Tranfos de corriente de cuatro núcleos (tres núcleos de protección 5P20 y un núcleo de medición clase 0.2s).
- 3 Transformadores de tensión de tipo capacitivo de tres núcleos (dos núcleos de protección 30 VA clase de protección 3P y un núcleo de medición 30 VA clase de precisión 0.2).
- 1 grupo de Pararrayos
- 1 transformador trifásico de potencia de 20/20/3 MVA (ONAN), 26/26/4 MVA (ONAF), 220/22.9/10 Kv

C. Bahía de Acoplamiento

- 1 Interruptor de operación 220 kV.
- 2 Seccionadores de barras con puesta a tierra



- 3 Trafos de corriente de cuatro núcleos (tres núcleos de protección 5P20 y un núcleo de medición clase 0.2s).

D. Barras 1:

- 3 Transformadores de tensión de tipo capacitivo de tres núcleos (dos núcleos de protección 30 VA clase de protección 3P y un núcleo de medición 30 VA clase de precisión 0.2).

E. Barras 2.

- 1 Transformadores de tensión de tipo capacitivo de tres núcleos (dos núcleos de protección 30 VA clase de protección 3P y un núcleo de medición 30 VA clase de precisión 0.2).

• Configuración de Barras 22.9kv

La configuración es de barra simple

• Equipamiento

Esta subestación está preparada para contener las siguientes bahías en 22.9 kV:

- 1 bahía para la conexión al transformador de potencia 220/22.9/10 kV
- 1 bahía para un transformador de servicios auxiliares.
- 2 bahías reservadas para las salidas de líneas Titire y Vizcacha.
- 2 reservas.
- 1 reserva para bahía la salida a Chincune.

El equipamiento para las bahías de conexión de 22,9 kV es del tipo convencional, instalado al exterior.

F. Bahía del Transformador

- 1 Interruptor de operación 22,9 kV.
- 1 Seccionador de barras
- 1 Seccionador de línea.

- 3 Transformadores de corriente de tres núcleos (dos núcleos de protección 5P20 y un núcleo de medición clase 0.2s).
- 1 conjunto de pararrayos.

G. Bahía de transformador de servicios auxiliares

- 1 Seccionador fusible tipo cut-out
- 1 Conjunto de Pararrayos
- 1 transformador de servicios auxiliares 22,9/0,380-0,220 kV, 250 kVA, Dyn11

El esquema para el patio de llaves de 220Kv y 22.9kV de la subestación Chilota se muestra en la siguiente figura.

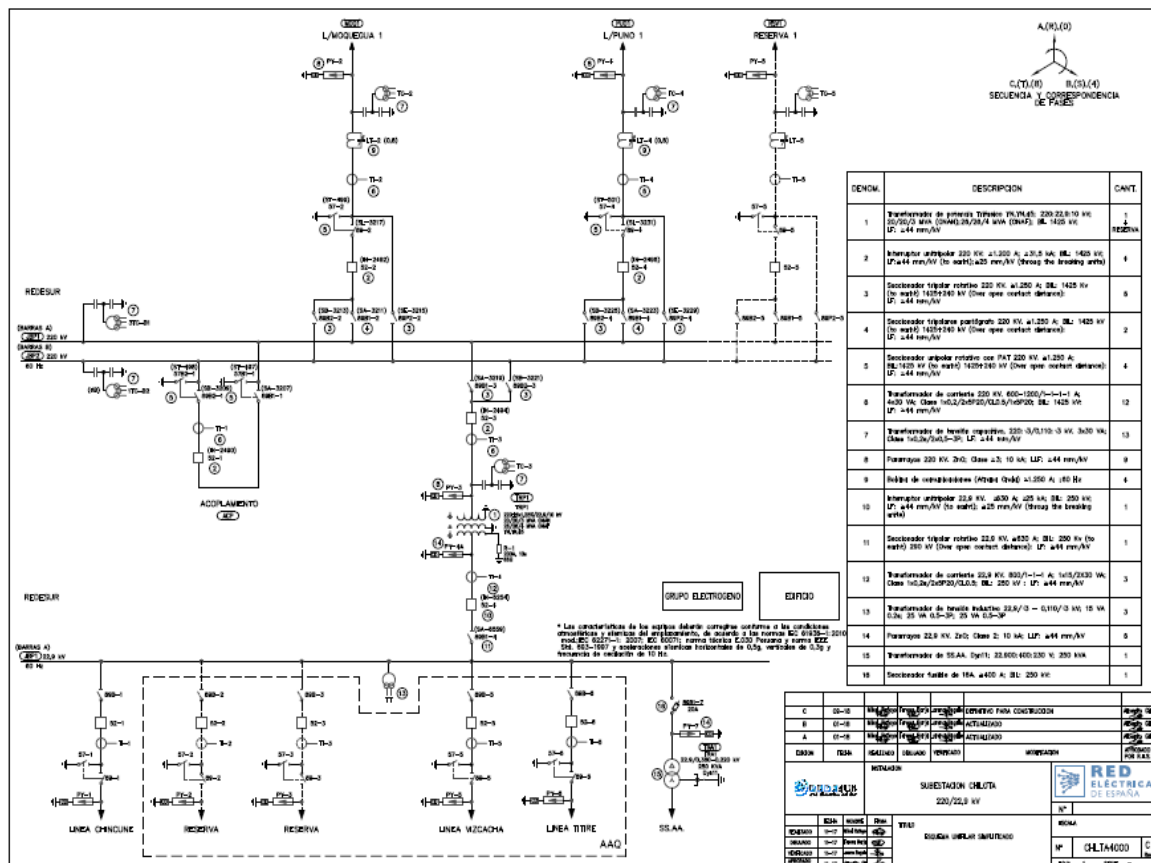


Figura 8: Diagrama Unifilar de la S.E Chilota
Fuente: Red Eléctrica del Sur (VER ANEXO 01)



Subestación Puno Y Moquegua 220kv

La línea Moquegua – Chilota, en el extremo Moquegua, está conectada en la bahía existente de la línea Moquegua – Puno, asimismo, la línea Chilota – Puno, en el extremo Puno, está conectada en la bahía existente de la línea Moquegua – Puno. Los equipos de protección existentes en las bahías de las subestaciones Moquegua y Puno son compatibles con los que cuenta instalado en la subestación Chilota.

Derivación de Línea Hacia la S.E. Chilota 220kv

Se realizó el seccionamiento de la línea Moquegua – Puno, dando origen a las nuevas líneas de 220 kV Moquegua – Chilota y Chilota – Puno. La conexión de la subestación se efectuó mediante una derivación de línea de 70 m. en 220 kV, las características se describen a continuación.

- Longitud aproximada: :70 metros
- Tensión nominal de operación: :220 kV
- Tensión máxima del sistema :245 kV
- Número de circuitos :Dos (02)
- Número de conductores por fase :Uno (01)
- Configuración de conductores :Tipo vertical.
- Tipo de conductor :ACSR Pheasant
- Altitud media del trazado :4580 msnm
- Número de cables de guarda :Dos (02)
- Cables de guarda :OPGW, de 48 fibras, de :109,33 mm² de sección.
- Apoyos :Torres metálicas de celosía

Zona de Influencia de la Subestación Chilota

Por las características eléctricas del transformador, se considera como zona de influencia el área sur del SEIN, limitada por las barras de la SE Moquegua 220kV y Puno 220 kV, así como sus respectivos transformadores de potencia. En la figura 7, se presenta el esquema unifilar de la zona de influencia del proyecto de investigación, resaltándose las bahías a considerarse.

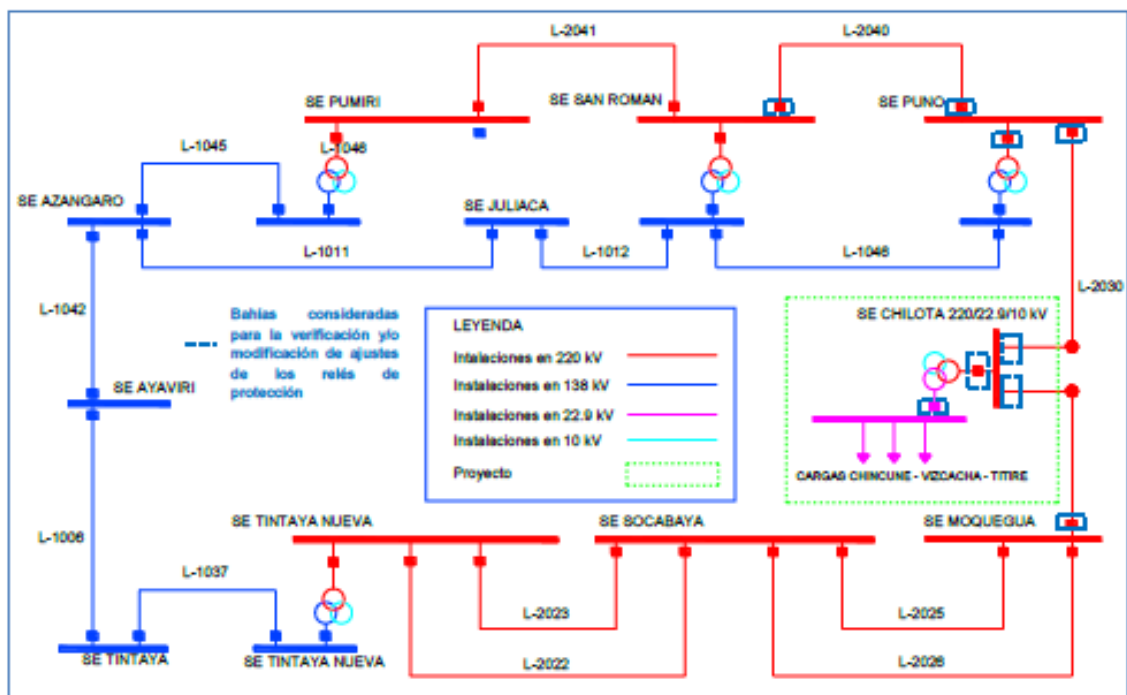


Figura 9: Esquema unifilar de la red eléctrica

Fuente: Red Eléctrica del Sur

Parámetros Eléctricos de las Instalaciones

A continuación, se detallan los parámetros eléctricos más importantes de los equipos asociados al proyecto.

Transformador De Potencia

El parámetro eléctrico del transformador de potencia de la subestación Chilota se detalla a continuación.

El resumen de los principales parámetros eléctricos del transformador se muestra en la siguiente.

Tabla 3: Parámetros del transformador de la S.E Chilota

Parametros	Nuevo Transformador de Chilota	Unidad
Potencia [ONAN]	20/20/3	MVA
Potencia [ONAF]	26/26/4	MVA
Tension	220/22.9/10	kV
Grupo de Conexión	YNynd5	-
Regulacion	220± 8x1.25%	-
Tensiones de cortocucuito		
Impedancia de secuencia positiva (+)		
HM-MV	9.99 (26 MVA)	%
MV-LV	4.61 (26MVA)	%
LV-HV	6.45 (4 MVA)	%
Impedancia de secuencia homopolar (0)		
HM-MV	8.95 (26 MVA)	%
MV-LV	3.71 (26MVA)	%
LV-HV	4.48 (4 MVA)	%

Elaboración Propia

Protecciones de Transformador de Potencia

Para la protección de los transformadores se instalaron dos equipos de protección numéricos independientes: protección primaria (PA) diferencial de transformador (87) y protección secundaria (PB) también diferencial (87).

Las funciones de protección son las siguientes:

- Diferencial de transformador (87T; PDIF)
- Sobrecorriente (50, 51, 51N; PTOC) en lados primario y secundario, instantáneas, de tiempo definido e inverso y direccionales
- Distancia (21; PDIS) para la protección de la máquina y como apoyo para faltas externas al transformador, tanto en el lado primario como en el secundario.

- Protección de Volts/Hz (59/81)
- Protección de sobrepresión
- Supervisión de circuitos de disparo de bobina (3-1; SCBR.ColAlm)
- Fallo interruptor (50BF; RBRF)
- Cierre con sincronismo (25; RSYN)
- Cierre con acoplador de redes (25AR; RSYN)
- Discordancia de polos de interruptor (2; XCBR.Dsc)
- Oscilografía
- Las protecciones propias de la máquina son las siguientes:
- Imagen térmica (49-1, 49-2; PTTR)
- Bucholz: Sobreflujo y sobrepresión (63; SIML)
- Temperatura del aceite (49-3; PTTR)
- Nivel de aceite deficiente (63-N; SIML)

Línea de Transmisión

En la siguiente tabla se detallan los parámetros eléctricos de cada uno de los tramos de líneas de transmisión en 220kV.

Tabla 4: Parámetros eléctricos por tramos de las líneas de transmisión.

Línea de Transmisión	Tramo	Long.	secuencia (+)			secuencia (0)		
		Km	Resistencia	Reactancia	Capacitancia	Resistencia	Reactancia	Capacitancia
			Ω/Km	Ω/Km	$\mu\text{F}/\text{Km}$	Ω/Km	Ω/Km	$\mu\text{F}/\text{Km}$
Ln 220 kV Moquegua - Chilota L2030	Aéreo 1	97.141	0.049	0.499	0.009	0.331	1.42	0.006
	Aéreo 2	0.0705	0.049	0.415	0.011	0.319	1.097	0.005
Ln 220 kV Puno - Chilota L2039	Aéreo 1	99.488	0.049	0.499	0.009	0.331	1.42	0.006
	Aéreo 2	0.0702	0.049	0.415	0.011	0.319	1.097	0.005

Fuente: Red Eléctrica del Sur

En la figura 10 se detalla la longitud de cada tramo de las líneas y se presentan los tramos de línea con acoplamiento.

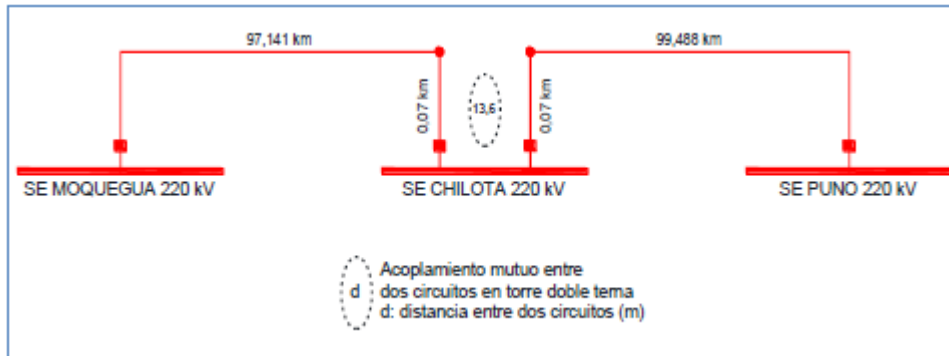


Figura 10: Acoplamiento mutuo entre los circuitos de derivación hacia la S.E Ch.
Elaboración Propia

3.4. MATERIAL EXPERIMENTAL

3.4.1. Analizador de respuesta en frecuencia

- **Fabricante:** MEGGER
- **Modelo:** FRAX 101
- **Número de Serie:** 1197



Figura 11: Equipo de medición FRAX 101 MEGGER

Fuente: Catálogo de Megger

El equipo de barrido de frecuencia (SFRA) FRAX 101 detecta posibles problemas eléctricos y problemas mecánicos que no se pueden detectar con otros métodos. La medición es fácil de realizar y capturará una "huella digital" única del transformador. La medida se compara con la referencia "Fingerprint o huella digital" y proporciona una respuesta directa sobre si las partes mecánicas del transformador han cambiado. La



polarización indica cambios geométricos y/o eléctricos en el transformador (Sáenz et al., 2010).

El equipo FRAX 101 detecta problemas tales como:

- Deformaciones y desplazamientos de arrollamientos.
- Vueltas cortocircuitadas y arrollamientos abiertos.
- Estructura de unión con grapas flojas
- Estructura de unión con grapas rotas
- Problemas de conexión de núcleo

3.4.2. Normativa aplicable

Estas normas son las que regulan las pruebas de barrido de frecuencia

- IEEE C57.149
- IEC 60076-18,
- CIGRE 342_2008.

IEEE ha emitido directrices para las aplicaciones del método FRA en transformadores llenos de aceite. El propósito de la guía IEEE es proporcionar al usuario información suficiente que lo ayudará a realizar mediciones de respuesta de frecuencia e interpretar los resultados de estas mediciones. Proporciona orientación para todos los métodos actuales empleados para tomar estas medidas, así como el equipo de prueba y las configuraciones de prueba que se utilizarán. La guía también ilustra la relación con otros diagnósticos de transformadores (Nirgude et al., 2008).

Los rangos de frecuencia están determinados por las normas que detallan el tipo de transformador y su falla.

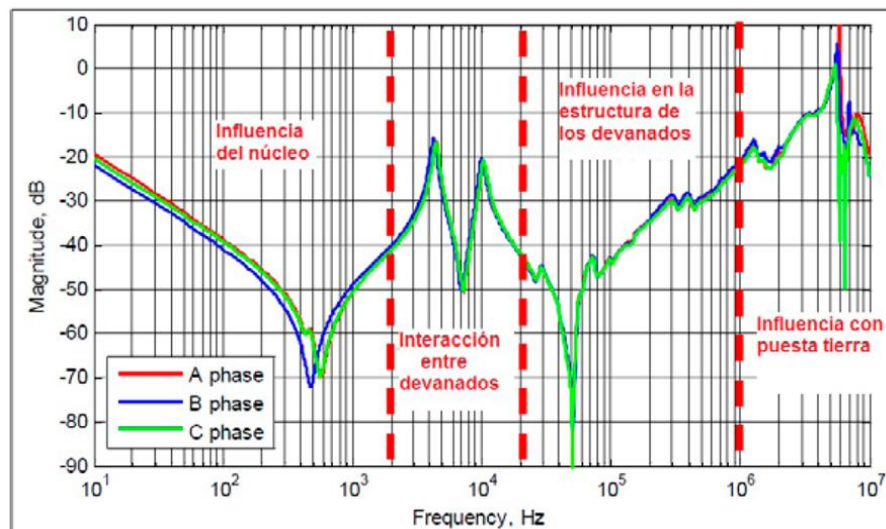


Figura 12: Regiones de frecuencia según Norma IEEE

Fuente: CIGRE 324-2008

Usualmente en un transformador las fallas que se originan según la frecuencia aplicada son:

Bajas frecuencias:

- Deficiencias en el núcleo
- Devanados abiertos / cortocircuitados.
- Conexiones deficientes

Frecuencias medias:

- Deformaciones en los devanados
- Desplazamiento de los devanados.

Altas frecuencias

- Movimiento de los devanados y conexionado de conmutador.

3.4.3. Documentos de referencia

La documentación utilizada en la investigación fue:

- Memoria Técnica Descriptiva – Subestaciones “Proyecto Eléctrico Subestación Chilota 220/22.9 kV – REDESUR (Estudio de Operatividad aprobado por el COES)



- Especificaciones técnicas de los equipos de patio y transformador de potencia- REDESUR (Estudio de Operatividad aprobado por el COES)
- Diagramas Unifilares de protección de la subestación Chilota 220/22,9 Kv- REDESUR (Estudio de Operatividad aprobada por el COES)
- Diagrama Unifilar de protección de la subestación Moquegua (salida a Chilota)- REDESUR. (Estudio de Operatividad aprobada por el COES)
- Diagrama Unifilar de protección de la subestación Puno (salida a Chilota). (Estudio de Operatividad aprobada por el COES)

3.4.4. Portal web del coes

- Procedimiento PR20 “Ingreso, Modificación y retiro de Instalaciones del SEIN”
- Actualización del plan de transmisión 2017 – 2026 COES – SEIN.
- Modelo eléctrico del SEIN para la elaboración de estudio de operatividad.
- Conclusión de operación comercial y retiro de instalaciones del SEIN.

3.4.5. Técnicas e instrumentos para recolectar información

Los datos adquiridos fueron procesadas y analizadas con el equipo FRAX 101 de megerr para luego exportar los datos adquiridos al software PowerDB 11.2 con el uso de las gráficas adquiridas se analiza y se interpreta los resultados.

Se realizaron ensayos de respuesta en frecuencia con el equipo FRAX 101, Este dispositivo inyecta un voltaje sinusoidal de frecuencia variable en el objeto bajo prueba y mide la magnitud de la corriente resultante. La relación entre dicha tensión y esta corriente en función de cada frecuencia aplicada, expresada en decibelios, se denomina respuesta en frecuencia. Este método se llama el método de exploración. Como parte de este estudio, se determinaron las configuraciones de prueba necesarias para realizar



pruebas con dispositivos de impedancia, así mismo los ensayos se llevaron a cabo sobre un transformador de 20MVA.

3.5. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS

- Antes de ejecutar esta prueba se debe considerar todas las medidas de seguridad.
- En un transformador con OLTC se recomienda ejecutar la medición en el tap extremo.
- En un transformador con DETC es recomendable realizar la prueba en el tap de servicio. Es muy importante mencionar que no es recomendable mover el conmutador para esta prueba.

Una conexión deficiente puede afectar los resultados de la prueba y, por lo tanto, las abrazaderas de prueba deben apretarse para garantizar una buena conexión con el casquillo y una conexión firme con el dispositivo.

La malla FRAX se extiende desde la abrazadera de conexión al lado del disco aislante hasta tierra en la base del aislador. Esto crea condiciones casi idénticas cada vez que lo conecta al concentrador, grande o pequeño, y se recomienda como método de conexión.

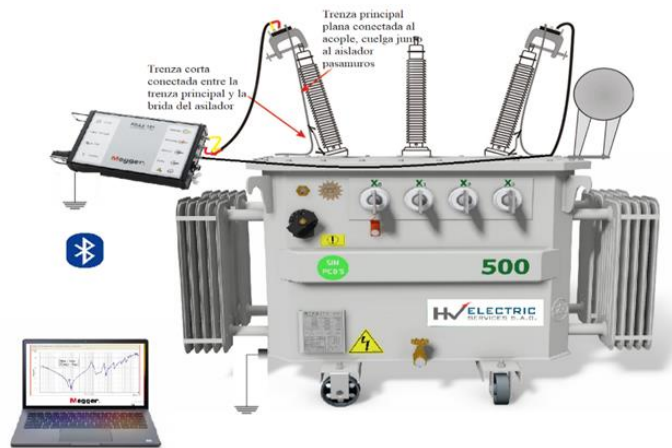


Figura 13: Conjunto de equipo software y cables de medición
Elaboración propia

Antes de pasar al análisis de las gráficas de respuestas de los transformadores, se pone como ejemplo las conexiones de la prueba SFRA. Esta es la forma en cómo la prueba identifica cada una de las fases del transformador tanto para el lado primario como para el lado del secundario, el diagrama de un transformador $\Delta - Y$. Esta es conexión más común que se encontró al hacer pruebas a transformadores de potencia de potencia. El diagrama indica que las fases son representadas como H1, H2, H3 para el lado primario y X0, X1, X2, X3 para el lado secundario.

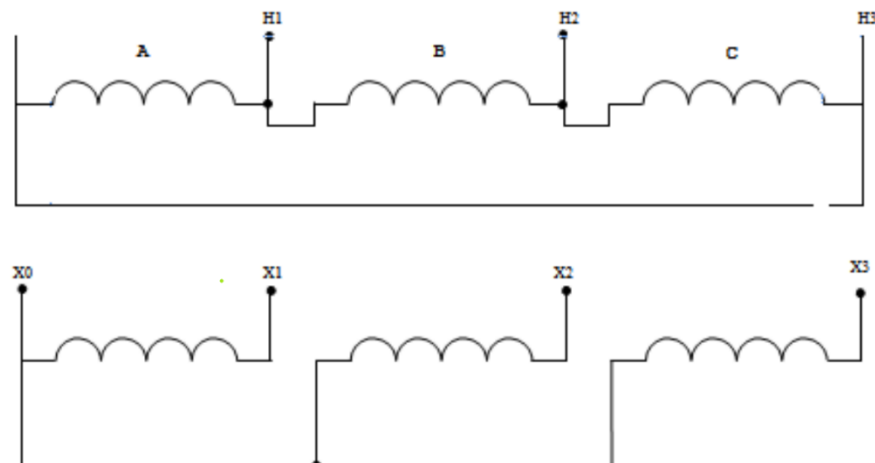


Figura 14. Diagrama de transformador $\Delta - Y$
Fuente: (Doble Engineering, 2009.)

3.5.1. Procedimiento de conexión equipo Frax 101 Megger

En la siguiente figura se observa el conexionado de los cables, que fueron conectados en los bushing del Transformador.

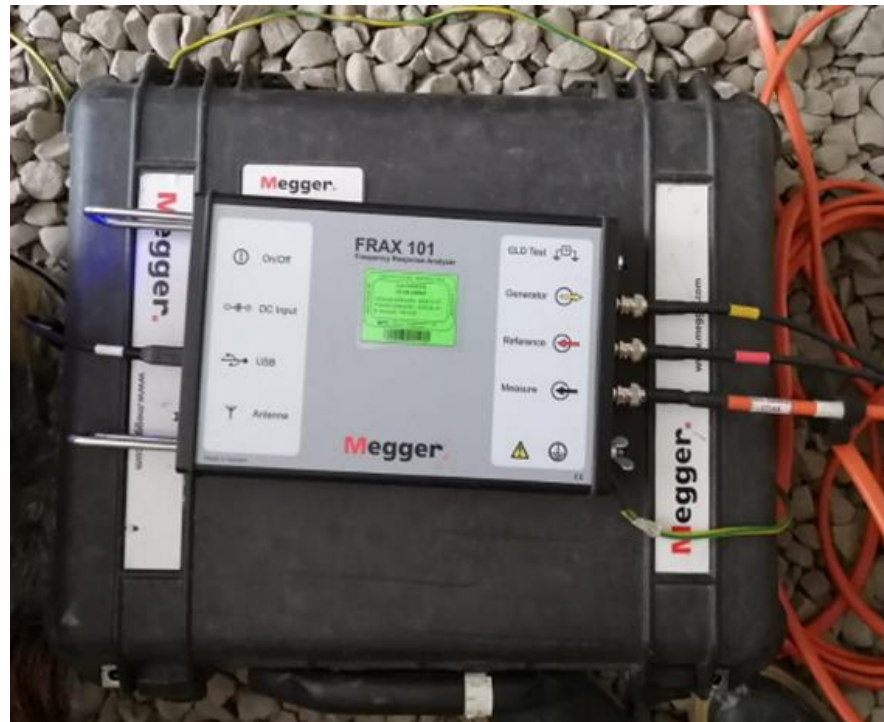


Figura 15: Equipo FRAX 101 MEGGER

Elaboración propia

3.5.2. Conexionado de Bushing de Lado 22.9kv

En la siguiente figura se aprecia la desconexión de los cables en el lado de 22.9KV, para la realización de las pruebas de SFRA.



Figura 16: Desconexión de cables de los Bushing 22.9Kv
Elaboración propia



Figura 17: Conexión de cables de prueba del equipo FRANK 101
MEGGER
Elaboración propia

3.5.3. Inicio de pruebas de barrido de frecuencia SFRA

La figura muestra el inicio de las pruebas al transformador de potencia de la marca GETRA POWER de una potencia de 25MVA y que se encuentra a la intemperie de la subestación Chilota 220/22.9KV.



Figura 18: Prueba con equipo FRAX 101 MEGGER

Elaboración propia

3.5.4. Datos generales de transformador de potencia Getra power 20 MVA

A continuación de detalla las características técnicas de la placa del transformador de potencia.

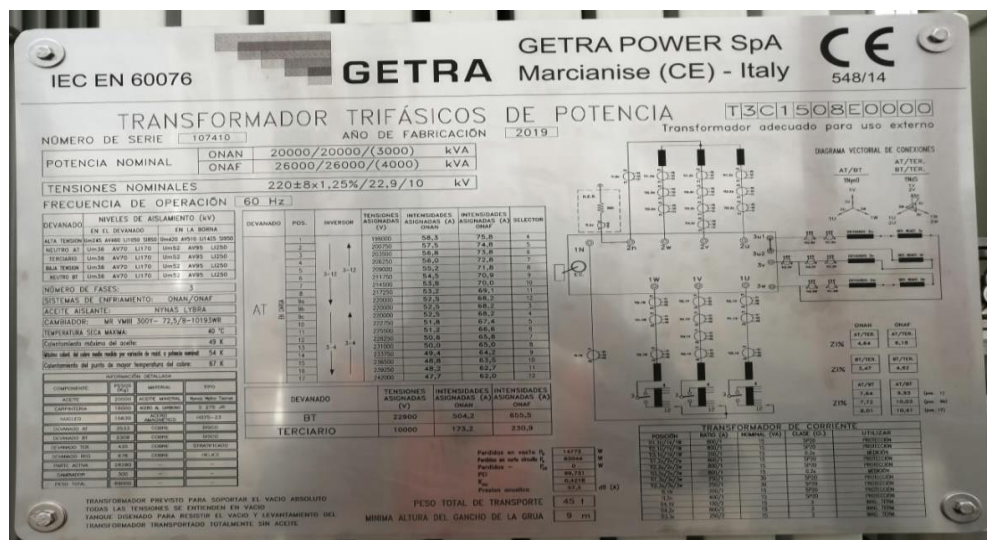


Figura 19: Foto de Placa del transformador de potencia

Elaboración propia

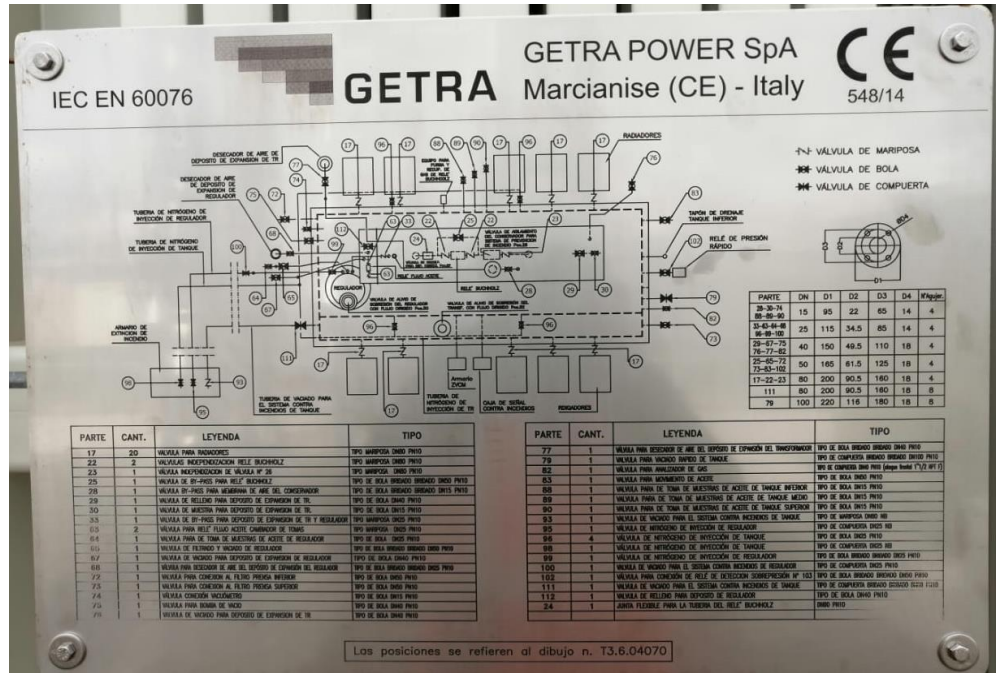


Figura 20: Foto de placa del transformador de potencia
Elaboración propia

Tabla 5: Datos de placa del transformador

DATOS DE LA PLACA DEL TRANSFORMADOR	
Fabricante	GETRA POWER
N° de Serie	60
Frecuencia (Hz)	107409
Potencia (MVA) - ONAN / ONAF	20/26
Relación de Tensión (kV)	220/22.9/10
Grupo de Conexión	YNyn0d5
Corriente (A)	52.5/504.2/173.2
Tipo de Aislante	NYNASNYTRO TAURUS
Peso del Aislante (Kg)	20000
Peso del Transformador (Kg)	45000
Año de Fabricación	2019
Fabricado en	Italia

Elaboración propia

3.5.5. Datos de Placa de los Bushings 220kv

Tabla 6: Datos de Placa de los Bushing 220KV

DATOS DE PLACA DE LOS BUSHING 220KV				
Identificación	Fase 1U	Fase 1V	Fase 1W	Fase 1N
Fabricante	ABB	ABB	ABB	ABB
N° de Serie	1ZSCD18002837/03	1ZSCD18002837/01	1ZSCD18002837/02	1ZCD12529179
Tensión Nominal (KV)	550	550	550	52
Factor de Potencia C1 (%)	0.34	0.39	0.38	0.337
Capacitancia (pF) C1	540	539	540	726
Año de Fabricación	2019	2019	2019	2019

Elaboración propia

3.5.6. Datos de Placa de los Bushing 22.9kv

Tabla 7: Datos de Placa de los Bushing 22.9KV

DATOS DE PLACA DE LOS BUSHING 22.9KV				
Identificación	Fase 2u	Fase 2v	Fase 2w	Fase 2n
Fabricante	ABB	ABB	ABB	ABB
N° de Serie	1ZSCT21007671/02	1ZSCT21007671/01	1ZSCT21007671/04	1ZSCT21007671/03
Tensión Nominal (KV)	73	73	73	73
Factor de Potencia C1 (%)	0.33	0.32	0.33	0.33
Capacitancia (pF) C1	517	521	515	524
Año de Fabricación	2019	2019	2019	2019

Elaboración propia

3.5.7. Datos de Placa de los Bushing 10 Kv

Tabla 8: Datos de Placa de los Bushing 10 KV

DATOS DE PLACA DE LOS BUSHING 10 KV				
Identificación	Fase 3u1	Fase 3u2	Fase 3v	Fase 3w
Fabricante	ABB	ABB	ABB	ABB
N° de Serie	1ZCD12529182	1ZCD12529181	1ZCD12529177	1ZCD12529178
Tensión Nominal (KV)	52	52	52	52
Factor de Potencia C1 (%)	0.345	0.336	0.333	0.345
Capacitancia (pF) C1	618	616	719	722
Año de Fabricación	2019	2019	2019	2019

Elaboración propia



3.6. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

3.6.1. Hipótesis general

La aplicación de la prueba del método de barrido de frecuencia es una influencia positiva para el mantenimiento preventivo del transformador de potencia 20MVA de la S.E Chilota – Moquegua 2020.

3.6.2. Hipótesis Específicas:

- El nivel de aplicabilidad y efectividad es alto en el método del análisis de barrido de frecuencia para el diagnóstico de transformadores de potencia 20MVA de la S.E Chilota – Moquegua 2020.
- El equipo FRAX 101 MEGGER es una herramienta de diagnóstico confiable que se pueda aplicar en transformadores de potencia 20MVA en la S.E Chilota – Moquegua 2020.

3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

<i>VARIABLES</i>	<i>INDICADORES</i>	<i>NIVEL DE MEDICIÓN</i>
<i>VARIABLES INDEPENDIENTES</i> <i>INDUCTANCIA</i> <i>CAPACITANCIA</i>	Estos valores serán únicos al inyectar voltaje al transformador	<i>Henry (H)</i> <i>Faradio (F)</i>
<i>VARIABLES DEPENDIENTES</i> <i>TENSIÓN APLICADA PARA LA RESPUESTA EN FRECUENCIA</i>	Este valor depende de la tensión que vamos aplicar por lo tanto estos valores de capacitancia e inductancia serán diferentes para el nuestro análisis del barrido en frecuencia.	<i>Voltios (V)</i>



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan en función al diagnóstico de la importancia de los transformadores de potencia en un sistema eléctrico interconectado y sus respectivos indicadores de la demanda y oferta de energía a nivel nacional.

De los resultados sobre las pruebas de SFRA (Análisis de Barrido de frecuencia) del transformador de Potencia de 20MV, que las curvas características se encuentran dentro de los valores aceptables y también se afirma que las gráficas de pruebas de fábrica FAT, son similares a las pruebas realizadas en campo SAT.

En pruebas realizadas en el lado Primario, Secundario y Terciario en vacío, no se encontraron deformaciones en el núcleo del transformador ni desplazamientos entre bobinados. Lo cual indica que cuando el transformador de potencia, no sufrió golpes externos ni internos.

4.1. RESULTADOS DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS ELÉCTRICAS

A continuación, se detalla los accesorios que se inspeccionó antes de realizar las pruebas a los transformadores de potencia.

4.1.1. Inspección general del transformador

A continuación, se muestra la inspección minuciosa que se realiza en campo, cuando el transformador de potencia se encuentre montado con todo su accesorio. Es muy importante realizar una inspección general ya que, muchas veces se encontró falencias como cables dañados, torque, derrame de aceite y otros.



Cuando se realizan Pruebas Eléctricas a los transformadores de Potencia, se tiene que tener bastante cuidado en la desconexión de los cables que están conectados en los bushing del lado Alta y Baja.

También se recomienda que cuando el personal de pruebas suba a la parte alta del transformador tener bastante cuidado donde utiliza los tres puntos de apoyo, pueda ser que dañe algún accesorio del equipo.

Tabla 9: Inspección general del transformador

Ítem	Descripción	Resultado
1	Sistema de anclaje y puesta a tierra	Conforme
2	Montaje electromecánico general	Conforme
3	Estado de los medidores de temperatura	Conforme
4	Estado del indicador del nivel de aceite	Conforme
5	Limpieza de los bushing del Transformador 220/22.9/10	Conforme
6	Identificación y secuencia de fases	Conforme
7	Estado de accesorios, pernos, uniones y empaquetaduras	Conforme
8	Verificación de la ausencia de fugas de aceite	Conforme
9	No existencia de daños físicos en el Transformador	Conforme
10	Verificar del estado de los desecadores cuba y conmutador	Conforme
11	Inspección de Radiadores	Conforme
12	Verificación de maniobras del Conmutador	Conforme
13	Verificación de resistencia de calefacción	Conforme
14	Inspección de motoventiladores	Conforme
14.1	* Ventilador (Aficionado) N° 1	Conforme
14.2	* Ventilador (Aficionado) N° 2	Conforme
14.3	* Ventilador (Aficionado) N° 3	Conforme
14.4	* Ventilador (Aficionado) N° 4	Conforme
14.5	* Ventilador (Aficionado) N° 5	Conforme
14.6	* Ventilador (Aficionado) N° 6	Conforme
15	Inspección de válvulas	---
15.1	* Válvula de drenaje	Cerrada
15.2	* Válvula de filtro (superior)	Cerrada
15.3	* Válvula de filtro (Inferior)	Cerrada
15.4	* Válvula de muestras (superior)	Cerrada
15.5	* Válvula de muestras (Centro)	Cerrada
15.6	* Válvula de muestras (Inferior)	Cerrada
15.7	* Válvula para drenaje de aceite rápido	Cerrada
15.8	* Válvula de llenado de aceite	Cerrada
15.9	* Válvula para inyección de N2	Cerrada
15.10	* Válvula de drenaje de aceite CDBC	Cerrada
15.11	* Válvula de drenaje del conservador	Cerrada
15.12	* Válvula de drenaje del conservador CDBC	Cerrada
15.13	* OLTC conservador Filling Valve	Cerrada
15.14	* Válvula de radiador	Abierta
15.15	* Válvula de relé Buchholz	Abierta
15.16	* Válvula de relé CDBC	Abierta
15.17	* Válvula de relé By Pass.	Cerrada
15.18	* Válvula equilizer tubería.	Cerrada
15.19	* Válvula de conservación del sistema preservación de aceite	Cerrada
15.20	* Válvula reguladora de aire seco	Cerrada
15.21	* Válvula para el analizador de gases disueltos	Cerrada

Elaboración propia

4.1.2. Foto del Transformador de Potencia

En la siguiente figura 19 se puede apreciar la imagen real del transformador de potencia que se encuentra ubicado en la subestación de Chilota.



Figura 21: Transformador de potencia 20 MVA
Elaboración propia

4.1.3. Conexión de Cables de Equipo Frax 101 Megger

Un grupo de cables FRAX esta constituido por cables doble apantallados de buena calidad, trenzados, para una mejor conexión a tierra, unas grapas para conexiones solidas al transformador.



Figura 22: Cables de Prueba de equipo FRAX 10 Megger
Fuente: Catalogo de Megger

Traza No	Posición cable Rojo	Posición Cable Negro	Conexiones en cortocircuito
1	1U	1N	En vacío
2	1V	1N	
3	1W	1N	
4	2u	2n	
5	2v	2n	
6	2w	2n	
7	3u	3w	
8	3v	3u	
9	3w	3v	
10	1U	1N	BT en cortocircuito
11	1V	1N	
12	1W	1N	TER en cortocircuito
13	1U	1N	
14	1V	1N	
15	1W	1N	TER en cortocircuito
16	2u	2n	
17	2v	2n	
18	2w	2n	

Equipo de prueba:	ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA				
Marca:	MEGGER	Modelo:	FRAX 101	N/Serie:	1801163
Reporte de pruebas emitido por equipo digital:	SI	<input checked="" type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Temperatura de prueba:	16.0				
Humedad relativa :	34.0%				

Figura 23: Posición de los cables de prueba
Elaboración propia

4.1.4. Ingreso de datos al software Powerdb 11.2

Se ingresa al software PowerDB 11.2, proporcionado por Megger, donde se elige el equipo FRAX 101, y se llenan todo el dato solicitado.

SFRA Test Results	
Report date: 2019-12-11	
Date of Test: 30/11/2019	Time of Test: 06:05:26
Company Name: REA	Location: SE CHILOTA
Test Object: TRP1	Manufacturer: GETRA POWER
Serial Number: 107409	Built Year: 2019
Phase Design: 3	Winding Configuration: YNyn0d5
KV Rating: 220-22.9-10	KVA Rating: 20-20-3
NLTC Position:	LTC Position: 9B
Temperature: 12°C	Reason For Test:
Tested By: HV ELECTRIC SERVICES SAC	
Notes:	

Figura 24: Ingreso de datos al software PowerDB
Elaboración propia

4.1.5. Conexión primario con secundario y terciario abierto

- **Terminales Alimentados** : 1U-1V-1W-1N / **Terminales Abiertos** : 2u-2v-2w-2n-3u1-3u2-3v-3w / **Posición TAP**: 9B

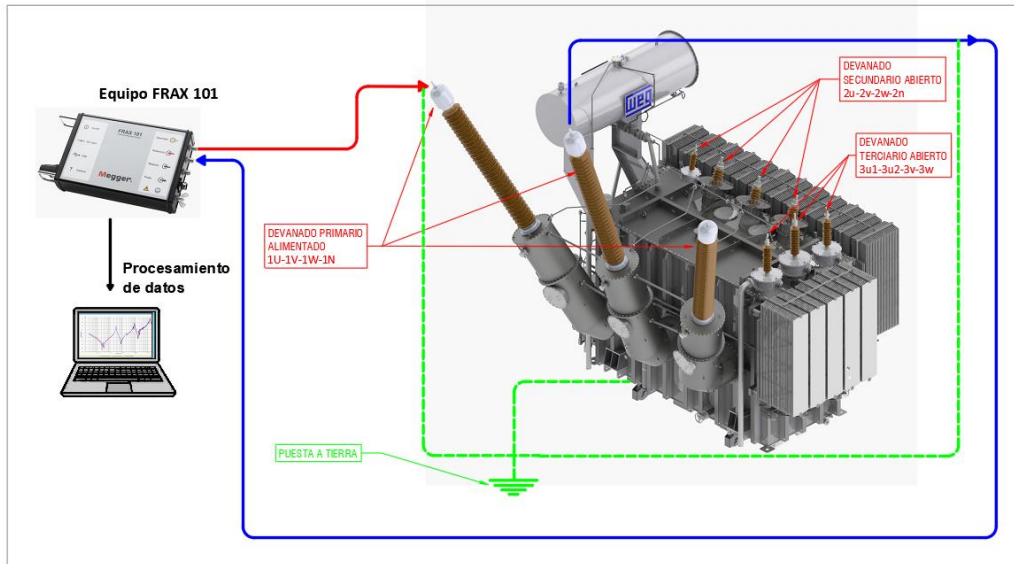


Figura 25: Conexión primario con secundario y terciario abierto

Elaboración propia

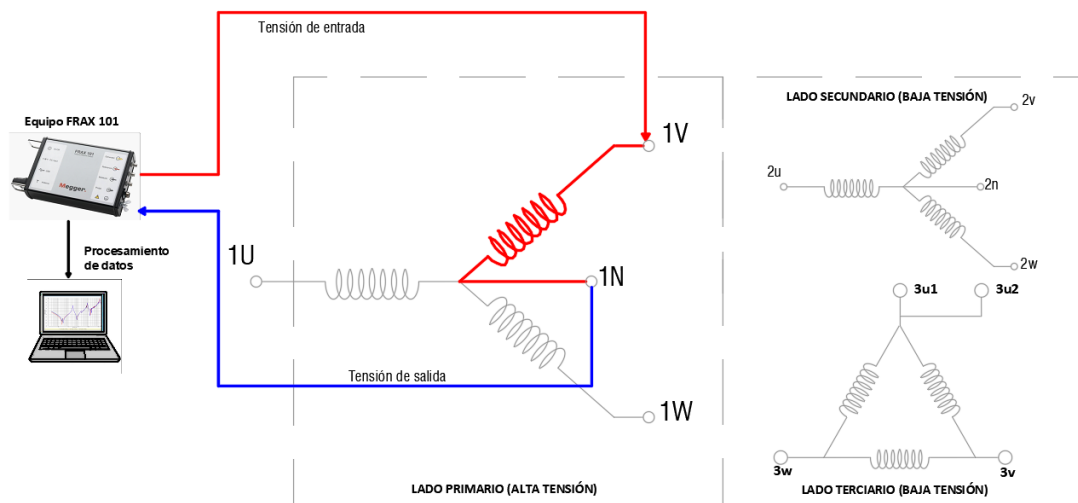


Figura 26: Esquema de Conexión primario con secundario y terciario abierto

Elaboración propia

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

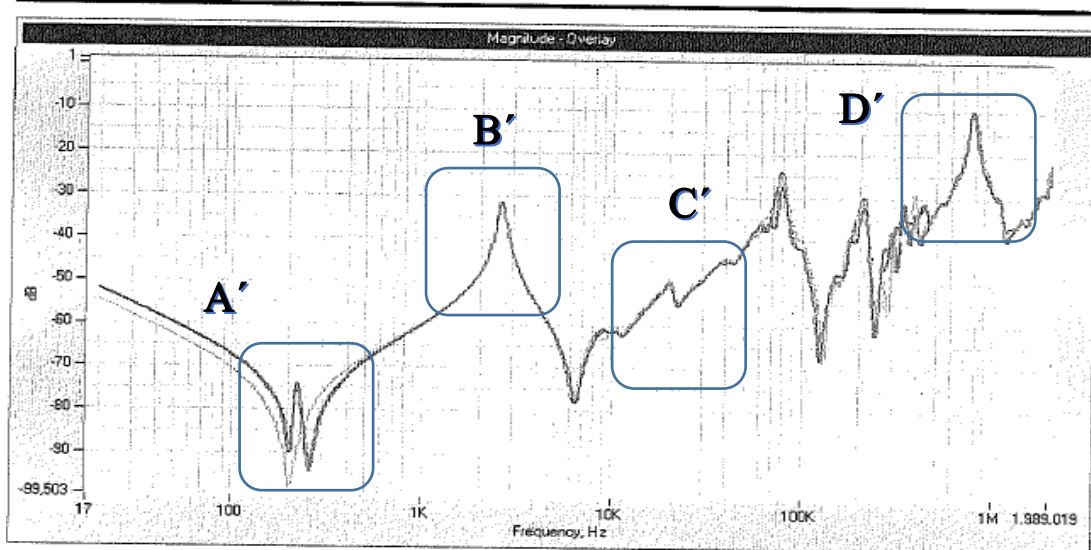


Figura 27: Prueba de SFRA Primario con Secundario y Terciario Abierto
Fuente: Fabricante GETRA POWER

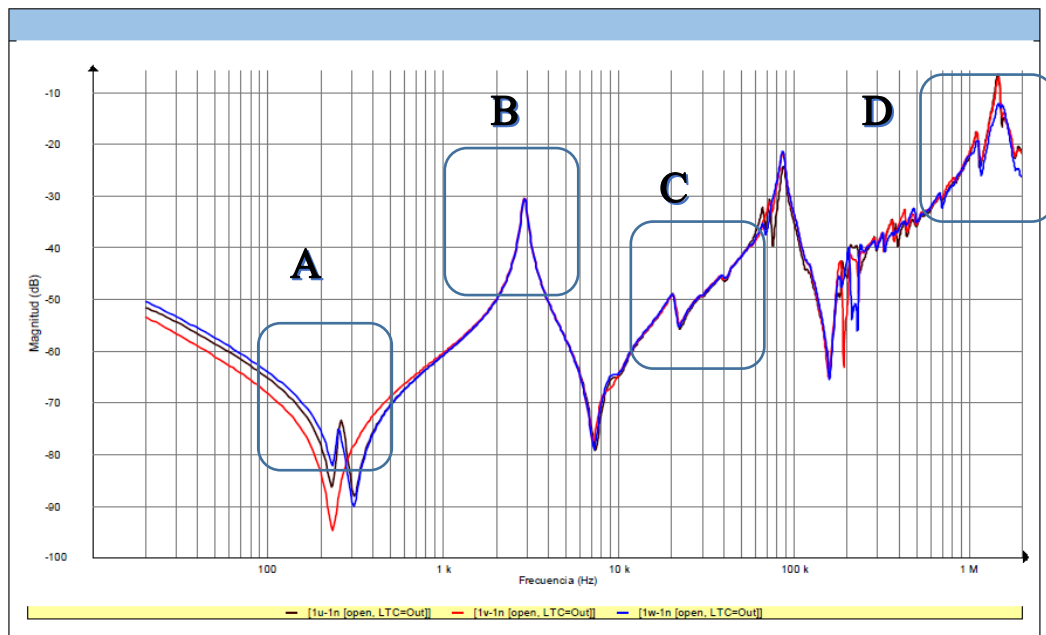


Figura 28: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101
Fuente: Equipo FRAX101 MEGGER

Análisis de resultado

- **Punto A' - A: ($< 2 \text{ kHz}$)** Las gráficas nos muestra una zona sensible del núcleo, similitud de total, por lo tanto podemos decir que el núcleo del transformador no sufrió ninguna alteración interna durante el transporte.
- **Punto B' - B: ($2 \text{ kHz} > f < 20 \text{ kHz}$)** la zona sensible a desplazamientos de devanados de influencia de interacción de los bobinados haciendo la comparación de graficas son similares no se ve ninguna anomalía en los bobinados.
- **Punto C' - C: ($20 \text{ kHz} > f < 400 \text{ kHz}$)** la zona sensible de deformaciones en los devanados y en los cambiadores de TAP's
- **Punto D' - D: ($> 400 \text{ kHz}$)** zona influencia de los Bushings, conexiones internas y conexiones de tierra. Las gráficas nos muestran una pequeña alteración de la prueba SAT. Esto debido a que en fabrica posiblemente utilizaron unos bushings de prueba.

4.1.6. Conexión secundario con primario y terciario abierto

- **Terminales Alimentados :** 2u-2v-2w-2n / **Terminales Abiertos :** 1U-1V-1W-1N-3u1-3u2-3v-3w / **Posición TAP:** 9B

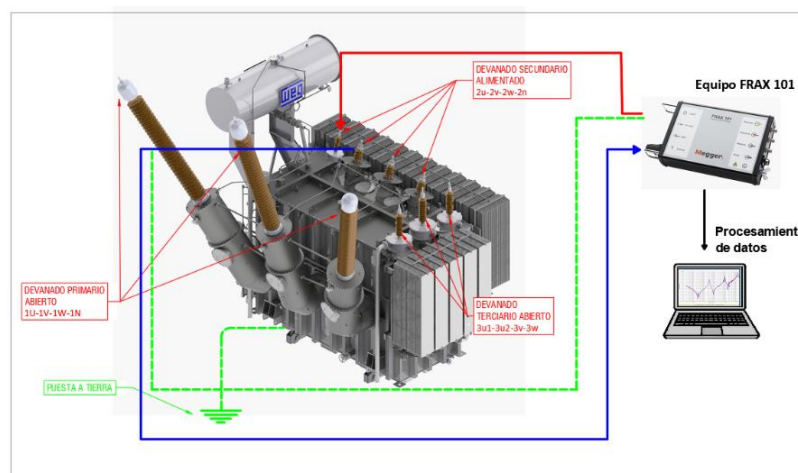


Figura 29: Conexión secundario con primario y terciario abierto

Fuente: Elaboración propia

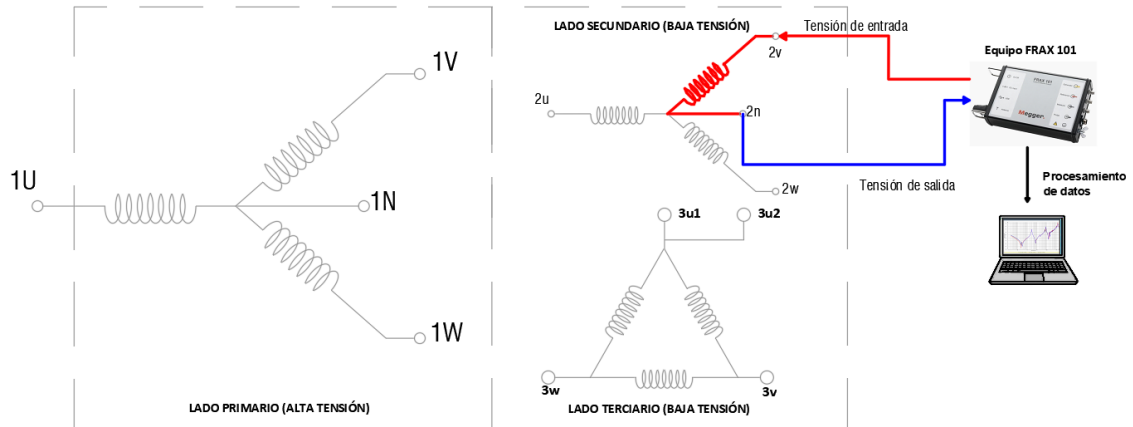


Figura 30: Esquema de conexión secundario con primario y terciario abierto
Elaboración propia

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

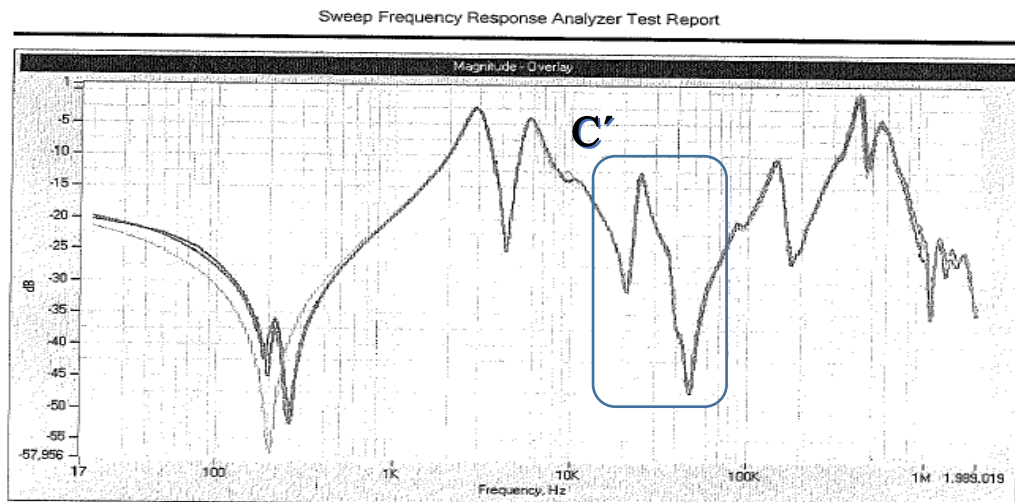


Figura 31: Prueba de SFRA Primario con Secundario y Terciario Abierto
Fuente: Fabricante GETRA POWER

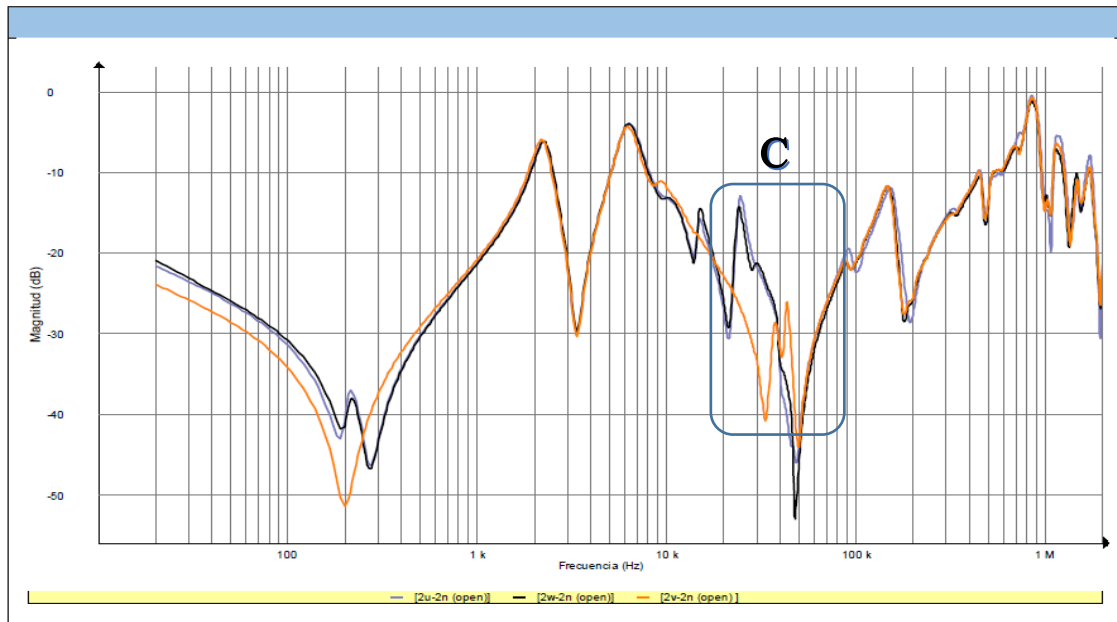


Figura 32: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101

Fuente: Equipo FRAX101 MEGGER

Análisis de resultado

- **Punto C' - C: ($10 \text{ kHz} > f < 100 \text{ kHz}$)** la zona sensible de deformaciones en los devanados y en los cambiadores de TAP's . las figuras muestran una variación significativa en la fase "2v" posiblemente una mala conexión en el busheing.
- las demás conexiones no se encuentran con ninguna variación.

4.1.7. Conexión terciario con primario y secundario abierto

- **Terminales Alimentados :** 3u1-3u2-3v-3w / **Terminales Abiertos :** 1U-1V-1W-1N-2u-2v-2w-2n / **Posición TAP:** 9B

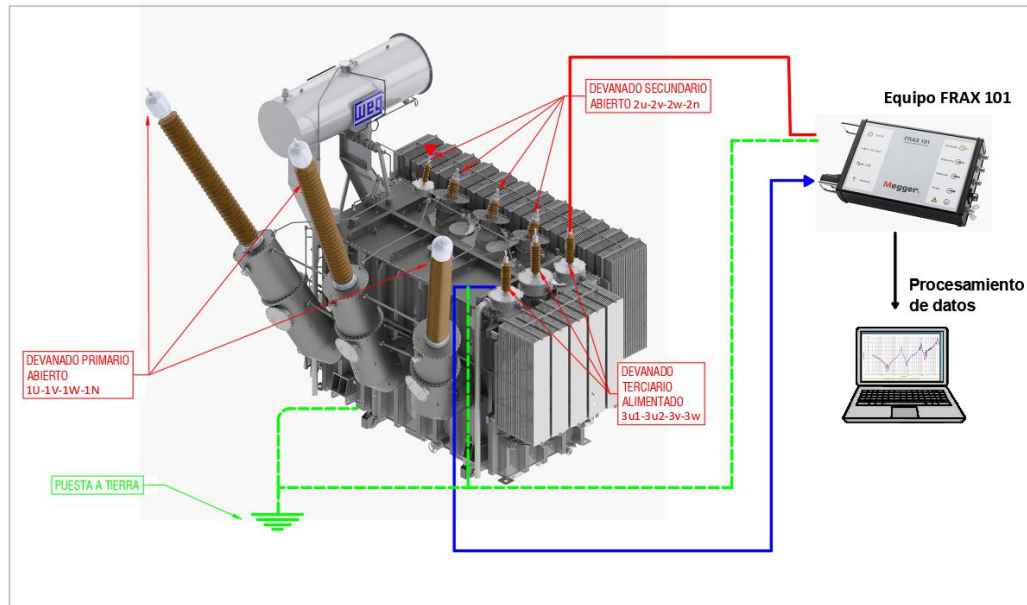


Figura 33: Conexión terciario con primario y secundario abierto

Elaboración propia

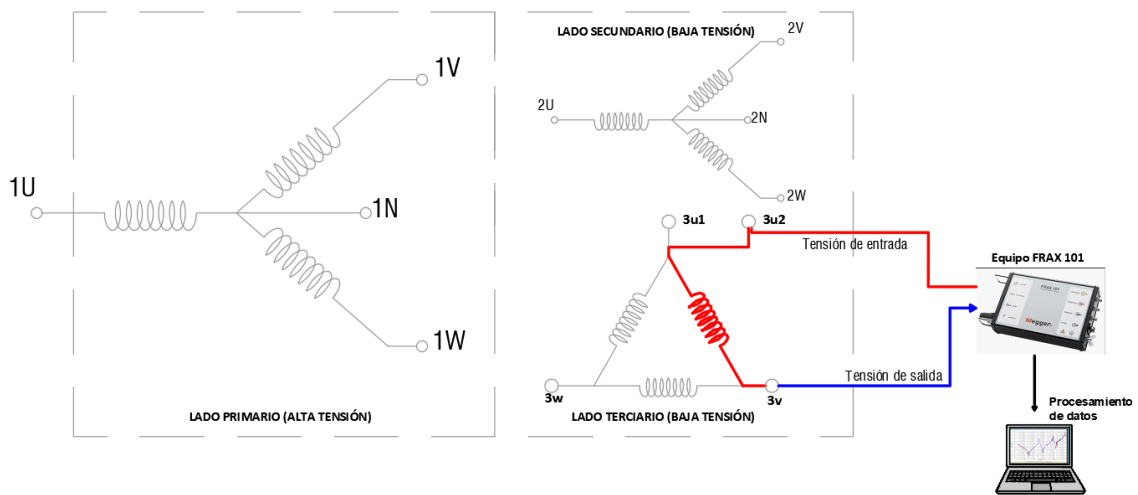


Figura 34: Esquema de conexión terciario con primario y secundario abierto

Elaboración propia

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

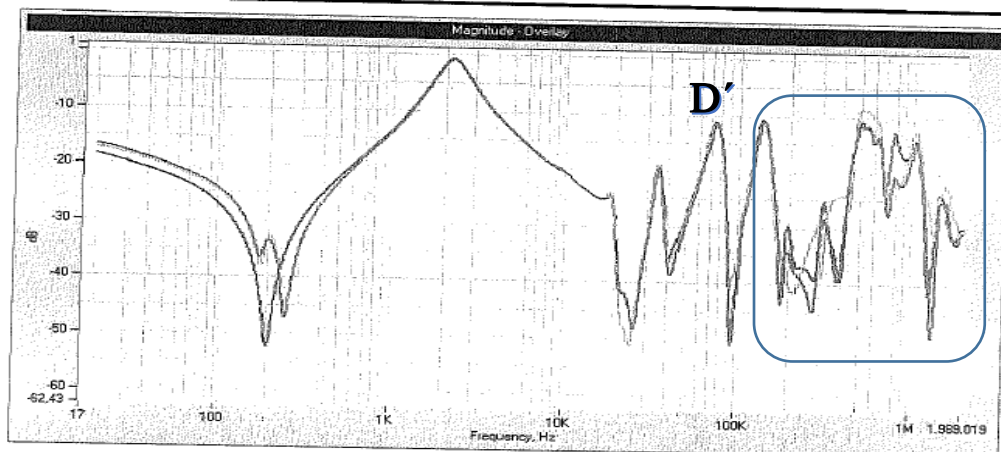


Figura 35: Prueba de SFRA terciario con primario y secundario abierto

Elaboración propia

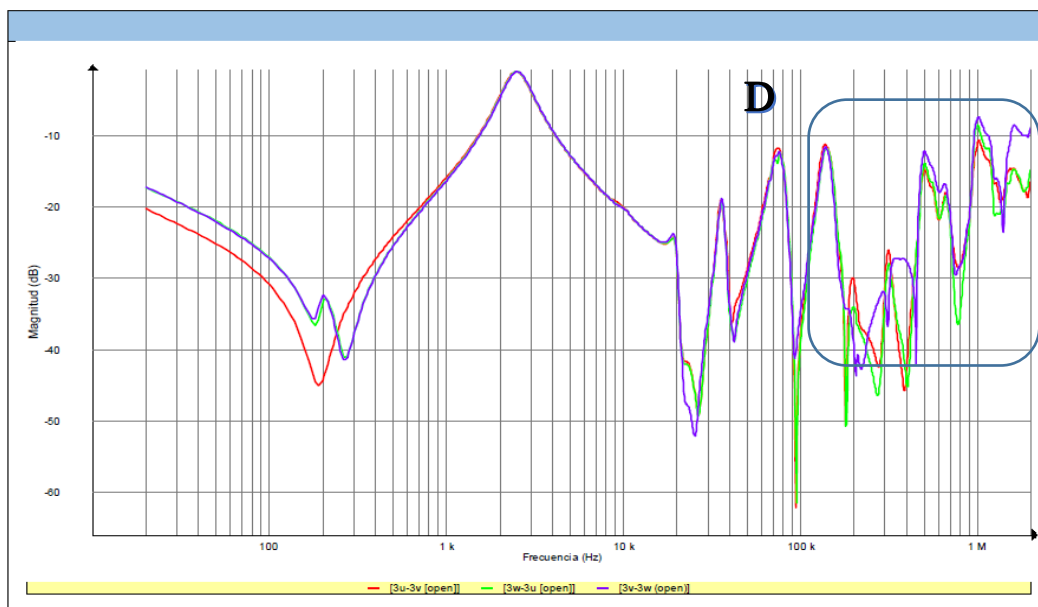


Figura 36: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101

Fuente: Equipo FRAX101 MEGGER

Análisis de resultado

- **Punto D' - D:** ($100\text{kHz} < f > 1\text{MHz}$) zona influencia de los Bushings, conexiones internas y conexiones de tierra. Las gráficas nos muestran una alteración en la zona de conexiones Esto debido a que en fabrica posiblemente utilizaron unos bushings de prueba.

4.1.8. Conexión primario con secundario en cortocircuito

- **Terminales Alimentados :** 1U-1V-1W-1N / **Terminales Abiertos :** 3u-3v-3w-3n /

Posición TAP: 9B

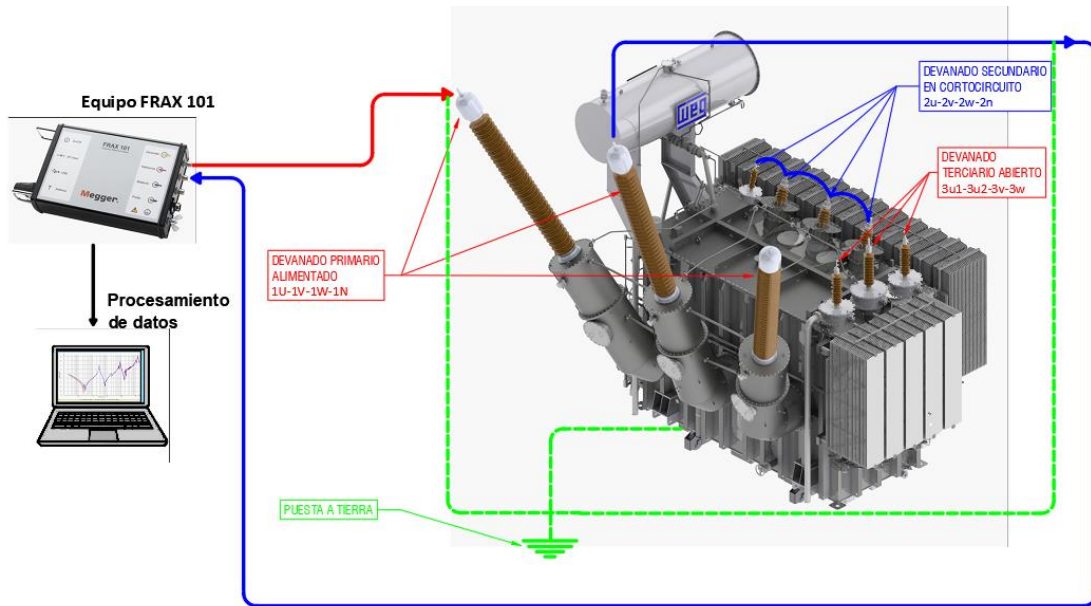


Figura 37: Conexión primario con secundario en cortocircuito

Elaboración propia

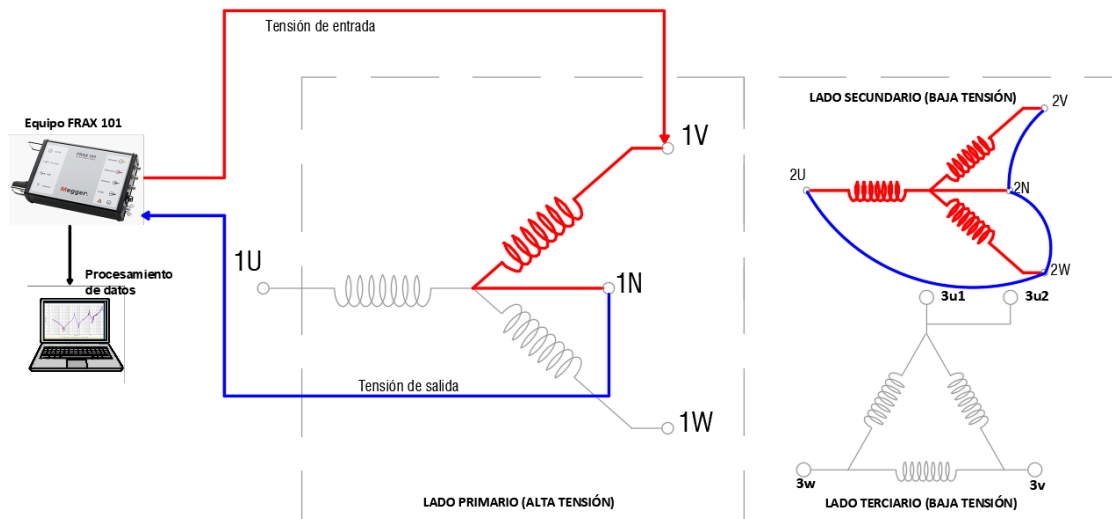


Figura 38: Esquema de conexión primario con secundario en cortocircuito

Elaboración propia

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

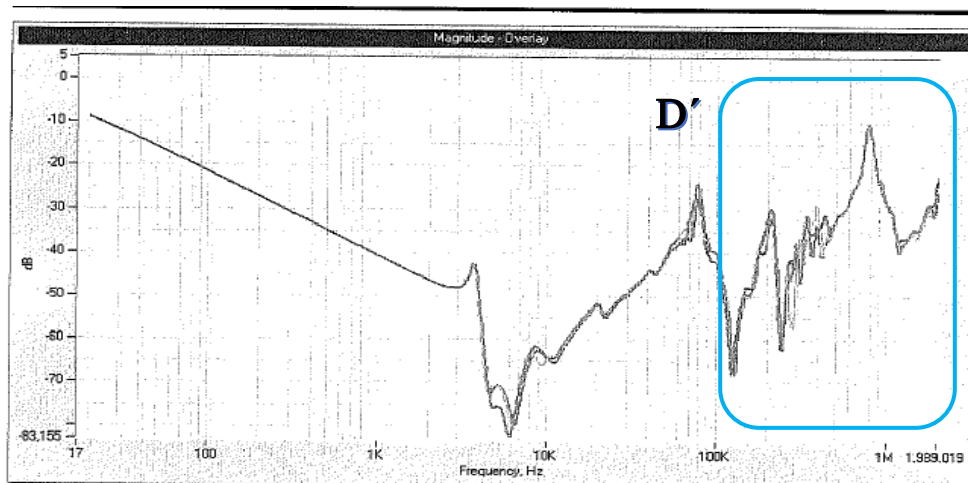


Figura 39: Prueba de SFRA Conexión primario con secundario en cortocircuito

Fuente: Fabricante GETRA POWER

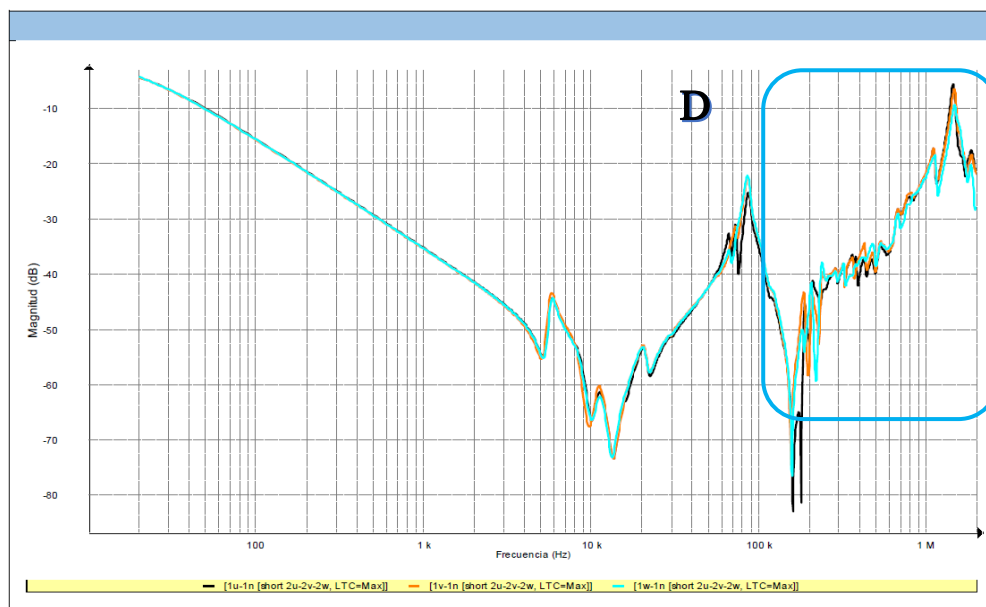


Figura 40: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101

Fuente: Equipo FRAX101 MEGGER

Análisis de resultado

- **Punto D' - D:** ($100\text{kHz} < f > 1\text{MHz}$) zona influencia de los Bushings, conexiones internas y conexiones de tierra. Las gráficas nos muestran una alteración en la zona de conexiones. Esto debido a que en fábrica posiblemente utilizaron unos bushings de prueba.

4.1.9. Conexión primario con terciario en cortocircuito

- **Terminales Alimentados :** 1U-1V-1W-1N / **Terminales Abiertos :** 2u-2v-2w-2w /
Posición TAP: 9B

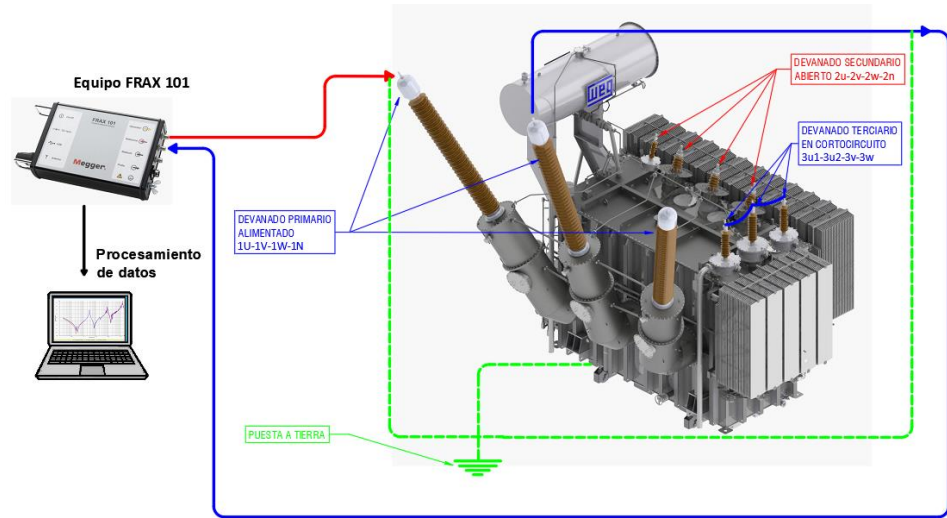


Figura 41: Conexión primario con terciario en cortocircuito

Elaboración propia

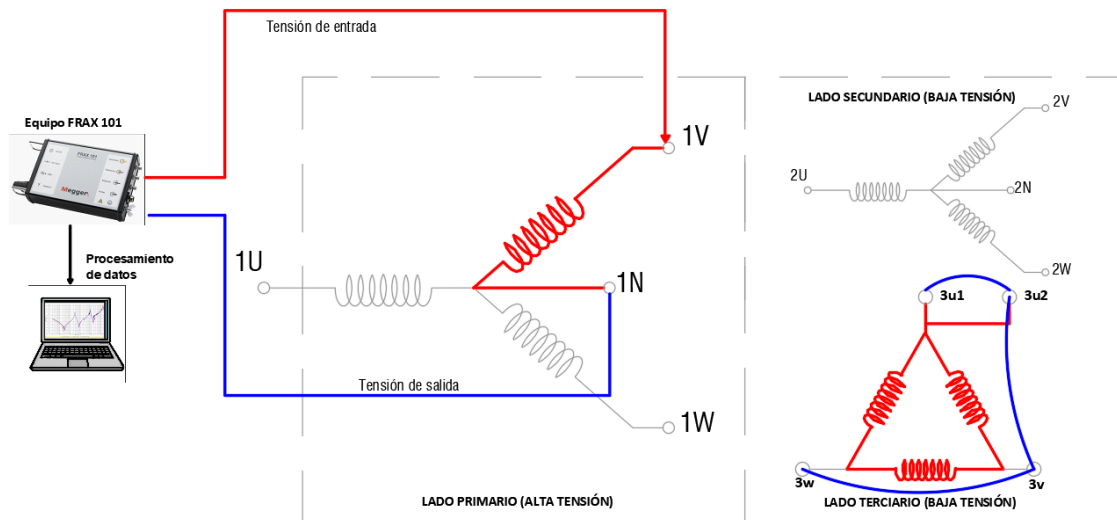


Figura 42: Esquema de conexión primario con terciario en cortocircuito

Elaboración propia

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

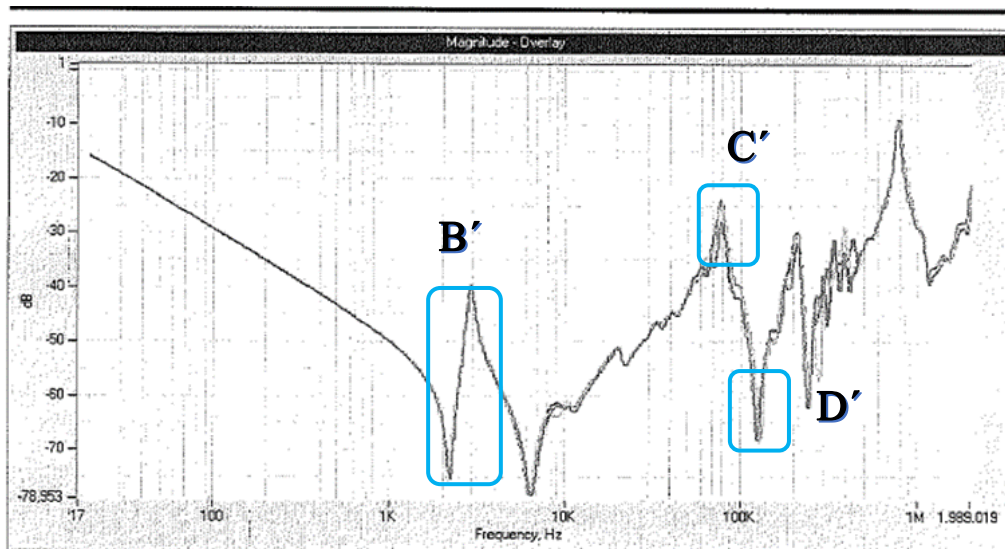


Figura 43: Prueba de SFRA Primario con Terciario en Cortocircuito

Fuente: Fabricante GETRA POWER

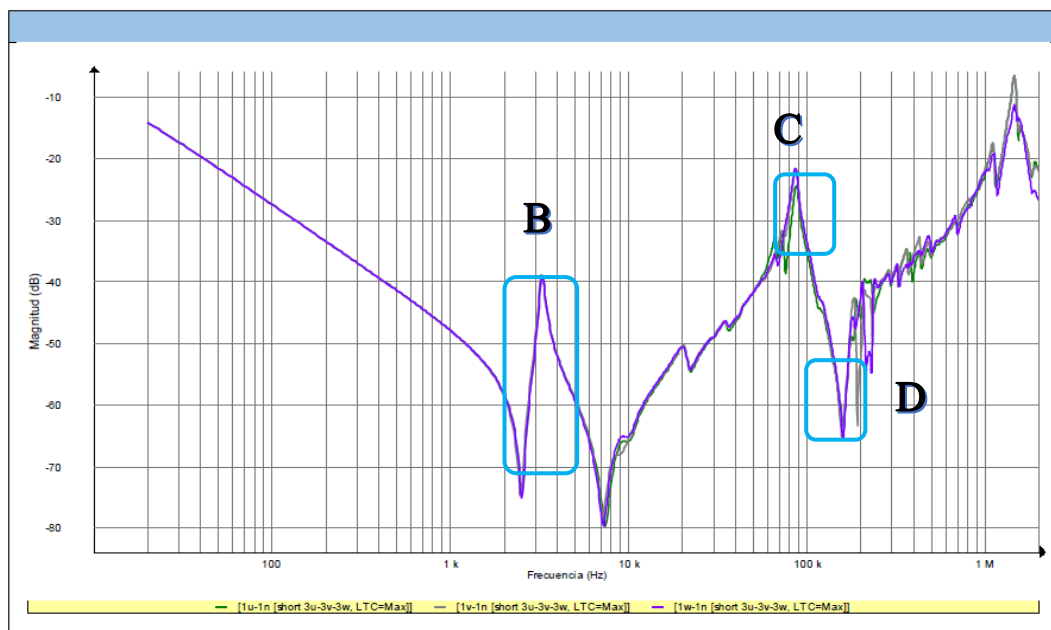


Figura 44: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101

Fuente: Equipo FRAX101 MEGGER

Análisis de resultado

- **Punto ($1\text{Hz} < f > 1\text{MHz}$)** Conexión primario con el terciario en cortocircuito podemos apreciar que no sufrió ninguna deformación de ningún componente interno.

4.1.10. Conexión de secundario con terciario en cortocircuito

- **Terminales Alimentados :** 2u-2v-2w-2n / **Terminales Abiertos :** 1U-1V-1W-1N / **Posición TAP:** 9B

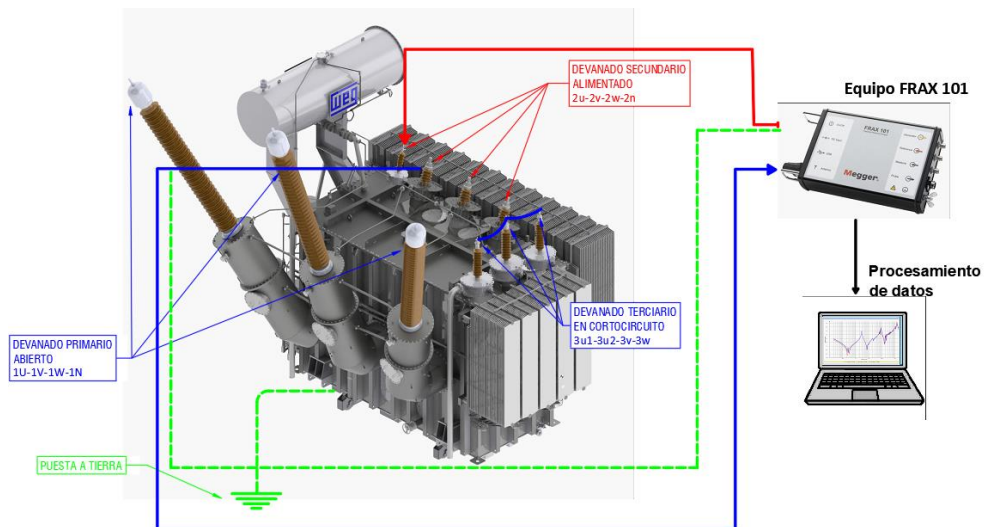


Figura 45: Conexión secundario con terciario en cortocircuito

Elaboración propia

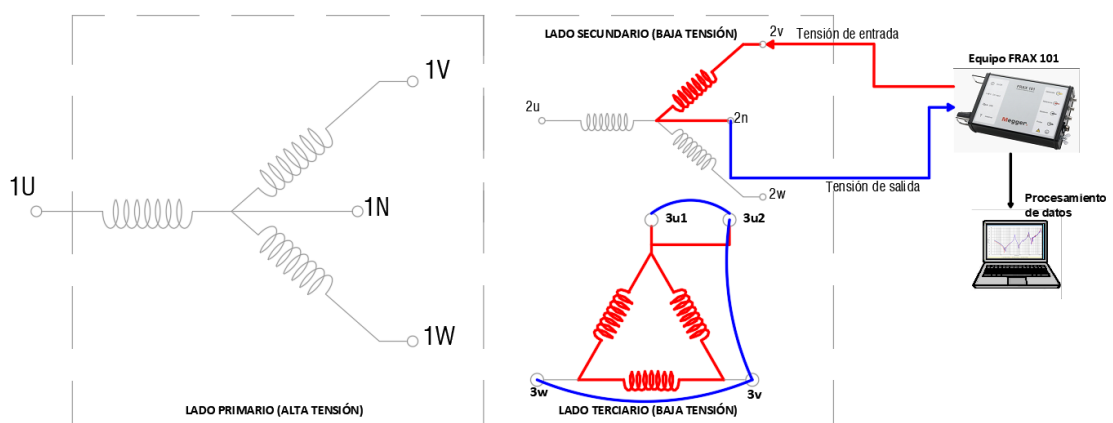


Figura 46: Esquema de conexión secundario con terciario en cortocircuito

Fuente: Elaboración propia

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

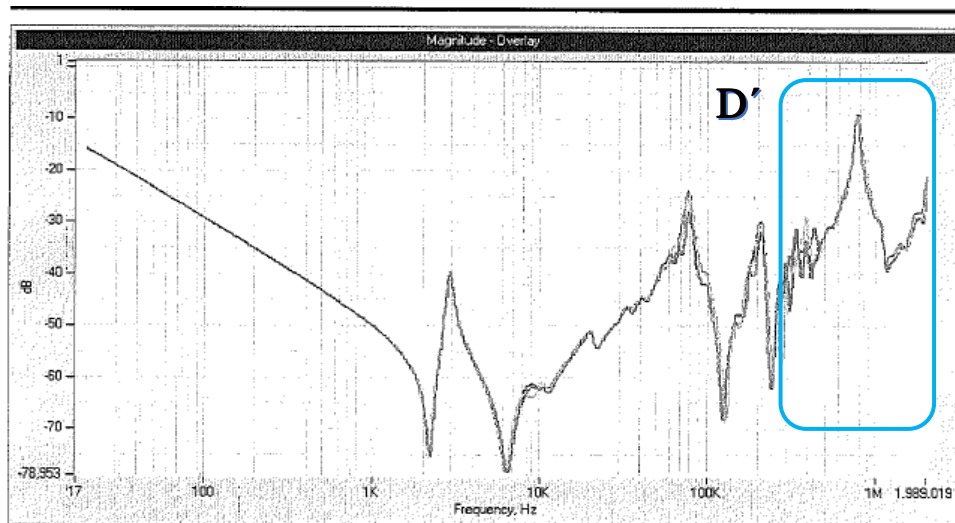


Figura 47: Prueba de SFRA Primario con Terciario en Cortocircuito

Fuente: Fabricante GETRA POWER

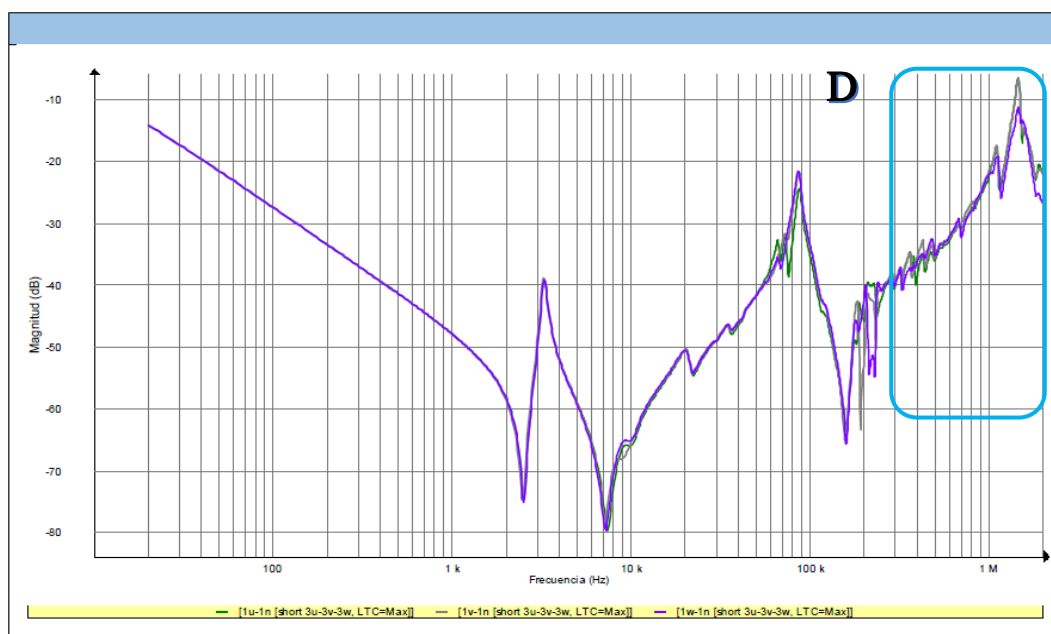


Figura 48: Reporte del Equipo MEGGER FRAX 101

Fuente: Equipo FRAX101 MEGGER

Análisis de resultado

- **Punto D' - D:** ($100\text{kHz} < f > 1\text{MHz}$) zona influencia de los Bushings, conexiones internas y conexiones de tierra. Las gráficas nos muestran una alteración en la zona de conexiones. Esto podría tratarse de una inadecuada conexión de puesta a tierra.

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Dado que los diseños y las aplicaciones de los transformadores varían, los resultados de SFRA heredan diversas propiedades y características. Sin embargo, una traza SFRA sobre rangos de frecuencia especificados tiene un grado de previsibilidad para efectos de núcleo de baja frecuencia, efectos de devanado principales y respuestas de cortocircuito. Estas expectativas pueden ser utilizadas para identificar problemas básicos que pueden existir dentro de un transformador.

En general, las curvas cortas, la magnetización y otros problemas relacionados con el núcleo pueden cambiar la forma de la curva a frecuencias más bajas. Las frecuencias medias representan un movimiento axial o radial en la bobina y las frecuencias altas representan problemas con las conexiones a tierra de los cables de prueba, bobinados o devanados, casquillos y conmutadores.

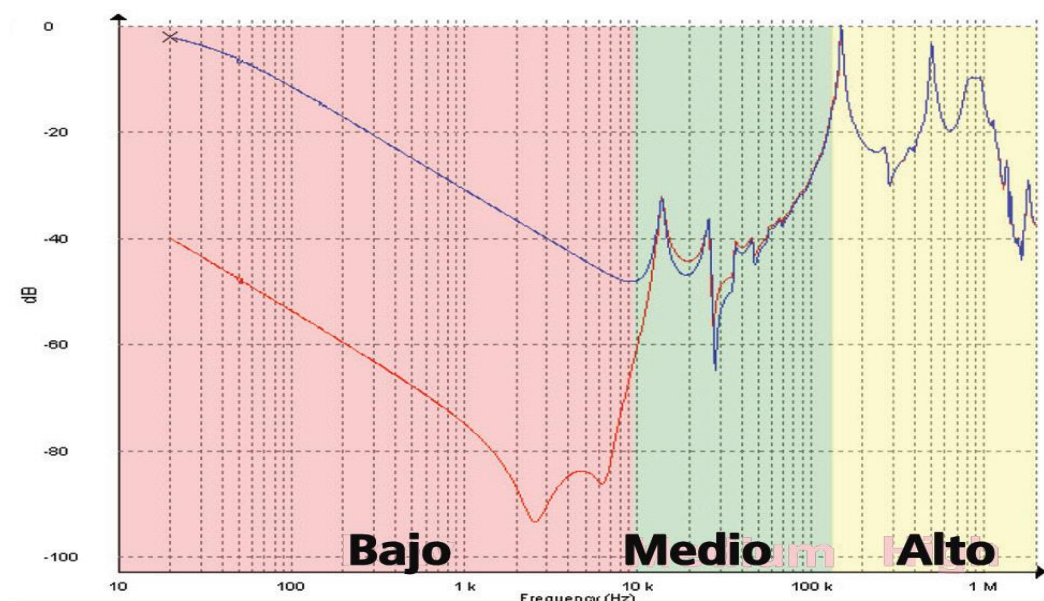


Figura 49: Resultados de mediciones SFRA

Fuente: Catalogo de Megger

Evaluación y Comparación con los Protocolos de Prueba de Fabrica

Se ha realizado una comparación con trazas de las FAT, se tiene:



Primario, Secundario y terciario en circuito abierto: No se encontró alguna deformación en el núcleo del transformador ni desplazamientos de los bobinados. Primario con secundario y terciario en cortocircuito: no se encontró ningún punto resistivo en los bobinados. Secundario con terciario en cortocircuito: no se encontró ningún punto resistivo en los bobinados.

4.3. DISCUSIÓN

En la investigación de Arteaga (2018), llegó a la conclusión que el método SFRA es muy útil para detectar cualquier avería en el componente interno de la parte activa de un transformador mediante esta prueba no invasiva. En cambio, en nuestro presente trabajo ejecutamos la prueba de manera experimental en campo donde llegamos a la conclusión de que La aplicación de la prueba del método de barrido de frecuencia es una influencia positiva para el mantenimiento preventivo del transformador de potencia 20MVA debido a que el transformador no sufrió ningún daño durante el transporte desde la fábrica hasta la puesta en servicio en el lugar de operación.



V. CONCLUSIONES

La prueba de barrido de frecuencia, ha demostrado una herramienta que ha tenido considerables avances en la detección y localización oportuna de fallas importantes en transformadores de potencia que donde básicamente exista desplazamientos o movimientos mecánicos en el núcleo o en los devanados que puedan modificar la geometría interna de los transformadores. Por lo tanto se pudo Conocer la gran aplicabilidad y efectividad del método del análisis de barrido de frecuencia para el diagnóstico de transformadores de potencia.

En pruebas realizadas en los Terminales Alimentados : 3u1-3u2-3v-3w / Terminales Abiertos : 1U-1V-1W-1N-2u-2v-2w-2n, en el los rangos de frecuencias ($100\text{kHz} < f > 1\text{MHz}$) zona influencia de los Bushings, conexiones internas y conexiones de tierra. Las gráficas nos muestran una alteración en la zona de conexiones Esto debido a que en fabrica utilizaron unos bushings de prueba. No se encontraron ningún tipo de deformaciones en el núcleo del trasformador ni desplazamientos entre bobinados. Lo cual indica que el transformador de potencia, no sufrió golpes externos ni internos, por lo tanto llegamos a la conclusión de que el equipo FRAX 101 MEGGER es una herramienta de diagnóstico para aplicar en transformadores de potencia.

De los resultados sobre las pruebas de SFRA (Análisis de Barrido de frecuencia) del transformador de Potencia de 20MV, las curvas características se encuentran dentro de los valores aceptables y también se afirma que las gráficas de pruebas de fábrica FAT, son similares a las pruebas realizadas en campo SAT. Por lo tanto la aplicación de la prueba del método de barrido de frecuencia es una influencia positiva para el mantenimiento preventivo del transformador de potencia.



VI. RECOMENDACIONES

Esta prueba deberá aplicarse periódicamente, ya que permitirá detectar oportunamente las variaciones en la respuesta de frecuencia debido a cambios en la estructura interna del transformador debido al estrés mecánico causado por las altas corrientes que atraviesan las bobinas, como se mencionó anteriormente.

El procedimiento del COES PR20 “Ingreso, Modificación y Retiro de Instalaciones en el SEIN” nos recomienda realizar las pruebas FAT y SAT, donde dicha entidad solicita a la empresa transmisora los protocolos de pruebas realizadas a equipos de patio de llaves.

Al ser los transformadores de potencia equipos eléctricos muy elementales en un sistema eléctrico, se debe considerar de manera muy atenta antes de realizar cualquier maniobra que todos sus elementos se encuentren probados y con ello evitar que se produzcan fallos. Es muy importante la actualización de los procedimientos para el montaje, pruebas eléctricas y puesta en servicio de transformadores de potencia, ya que se vive en una era donde la tecnología da pasos agigantados y esto provoca que surjan nuevos métodos y pruebas para transformadores, lo cual ayuda al mejoramiento y eficiencia en la puesta en servicio de dichos equipos.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellan, G. A., Benavent, G. J. M., y Figueres, A. E. (2000). *Electrónica de potencia: teoría y aplicaciones*. Universitat Politècnica de Valencia.
- Alcorta, G. E., Gonzáles, E. C., Pérez, R. C., y Ávalos, G. A. (2006). Detección de fallas en transformadores eléctricos. *Revista de Ingeniería*, 20, 171-176.
<http://amca.mx/memorias/amca2006/Articulos/A30AMCA06-025.pdf>
- Álvarez, M. C. (2014). *Estudio de la respuesta en muy alta frecuencia en transformadores de potencia* [Universidad de Vigo].
[http://www.preinvestigo.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/239/Estudio de la respuesta en muy alta frecuencia en transformadores.pdf?sequence=1](http://www.preinvestigo.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/239/Estudio%20de%20la%20respuesta%20en%20muy%20alta%20frecuencia%20en%20transformadores.pdf?sequence=1)
- Aquino, Q. J. C. (2017). *Evaluación de la parte activa de transformadores mediante el ensayo del análisis de respuesta al barrido de la frecuencia* [Universidad Nacional San Agustín de Arequipa].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2577/ELaquujc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arteaga, P. O. A. (2018). *Análisis de respuesta en frecuencia (FRA) para la identificación del estado de un transformador de potencia* [Universidad Nacional de Nariño].
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69831/14700160.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bhag, S. G., y Huseyin, R. H. (2003). *Máquinas eléctricas y transformadores* (3a ed.). OXFORD Alfaomega.
- Castaño, V. C. E. (2011). *Definición y análisis de los factores que influyen en la respuesta en frecuencia de los transformadores eléctricos* [Universidad del Valle].
http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/castaño_vasquez_CE
- Duncan, G. J., y Mulukutla, S. S. (2003). *Sistema de potencia: análisis y diseño* (3ra ed.). Ciencias e Ingeniería.
- Guillén, A. D. (2015). *Detección y localización de descargas parciales en devanados de transformadores de potencia usando modelos de alta frecuencia* [Universidad



- Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/9259/1/1080215104.pdf>
- Hart, D. (2005). *Electrónica de potencia*. Pearson Educación.
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., y Baptista, L. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw Hill Interamericana Editores.
- Muhammad, R. (1999). *Electrónica de Potencia: Circuitos y aplicaciones* (2a ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.
- Nirgude, P. M., Ashokraju, D., Rajkumar, A. D., y Singh, B. P. (2008). Application of numerical evaluation techniques for interpreting frequency response measurements in power transformers. *IET Science, Measurement & Technology*, 2, 275-285. <https://doi.org/10.1049/iet-smt:20070072>
- Pandya, A. A., y Parekh, B. R. (2013). Sweep frequency response analysis (SFRA) an approach to detect hidden transformer faults. *International Journal of Advanced Research in Electrical*, 2, 1893-1896.
- Quispe, G. C. A., y Bolívar, M. D. D. (2017). *Análisis de método de barrido de frecuencia para el diagnóstico operativo del transformador de potencia de la subestación eléctrica de Chahuares* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/2244>
- Ras, E. (1994). *Transformadores de potencia, de medida y de protección* (7ma ed.). Boixxareu Editores.
- Román, C. F. (2020). Análisis de las fallas en transformadores causadas por la operación del pararrayos ante sobretensiones externas. *Ingeniería e Investigación*, 22, 34-46. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n22.19705>
- Sáenz, P. J. M., Encina, J. C. M., y Piccoli, G. F. (2010). Diagnóstico de transformadores mediante el análisis de respuesta por barrido de frecuencia - SFRA. *Extensionismo, Innovación y transferencia Tecnológica*, 3, 72-79. <https://revistas.unne.edu.ar/>
- Solis, A. J. M. (2013). *Consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta para el montaje y energización por primera vez de transformadores de potencia* [Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://docplayer.es/13342943->



Universidad-de-san-carlos-de-guatemala-facultad-de-ingenieria.html

Stevenson, W. (1979). *Análisis de sistemas eléctricos de potencia* (2a ed.). McGraw Hill.

Vallés, L., Olaya, J. J., Zequera, M., y Mago, M. G. (2011). Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando ensayos no destructivos y pruebas de tensión mecánicas. *Revista INGENIERÍA UC*, 18(2), 15-26.

Villalobos, A. R. L. (2014). *Evaluación de deformaciones internas en transformadores de potencia por el método del análisis de respuesta en barrido de frecuencia* [Universidad Nacional de San Agustín].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3151/ELvialrl.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wildi, T. (2007). *Maquinarias eléctricas y sistemas de potencia* (6a ed.). Prentice Hall.

Zorrilla, H. J. D., Céspedes, F. A., y García, G. D. F. (2020). Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica. *Ingeniare Revista Chilena de ingeniería*, 28, 184-203.
<https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v28n2/0718-3305-ingeniare-28-02-184.pdf>



ANEXOS

ANEXO 01: Diagrama Unifilar Subestación Chilota 220/22.9K

ANEXO 02: Diagrama Unifilar de Operación.

ANEXO 03: FRAX 101 Megger Analizador de respuesta de frecuencia de barrido.

ANEXO 04: Planos de planta y detalles transformador de potencia.