

Recibido 25 de junio de 2025. Aceptado 25 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.

ISSN: 2448-7775

Modelado de un Transformador para la Detección de Fallas por Medio del Análisis de la Respuesta a la Frecuencia

EVELIN NAOMI GALLARDO-LICEA¹, ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA^{1*}, RUBÉN JARAMILLO VACÍO².

¹Universidad de Guanajuato.

²LAPEM CFE.

*Autor de Correspondencia: gonzaleza@ugto.mx

RESUMEN El análisis del estado en que se encuentra los transformadores en la red eléctrica, es de vital importancia porque dependiendo de las características y el impacto que este tenga en el sistema, una avería en este puede representar una falla catastrófica en todo el sistema. La disponibilidad del servicio es clave para la continuidad del servicio, porque lo que los sistemas de monitoreo, detección de falla y estado en que se encuentra el transformador es primordial para poder establecer las condiciones de uso y tomar las acciones necesarias para asegurar su operación. Actualmente se ha estado desarrollando una prueba que consiste en el análisis de la condición física en la que se encuentra el transformador por medio de una prueba de la respuesta a la frecuencia del transformador, FRA (por sus siglas en inglés), en donde se analiza su estado, al hacer un barrido en frecuencia de todo el devanado y los componentes que lo conforman. En este trabajo se presenta un circuito de un transformador determinado a partir de las mediciones reales de todos sus componentes, se ha introducido estos parámetros para hacer la simulación del barrido en frecuencia por medio de MatLab; así como el desarrollo del equipo utilizado para poder hacer un estudio de diferentes tipos de fallas, realizando el comparativo entre el transformador sin falla y con diferentes tipos de falla.

PALABRAS CLAVE — Detección de fallas, respuesta a la frecuencia, circuito de transformador.

I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son un elemento clave dentro de un sistema eléctrico, ya que proporcionan el nivel de tensión requerido y la potencia necesaria. Estos son diseñados con diferentes componentes, como son: el núcleo de material ferromagnético, los embobinados primario y secundario, aislamientos para cada uno de estos embobinados y la transición para la conexión, ya sea por medio de boquillas o terminales, y todos estos pueden estar embebidos en un aceite dieléctrico.

Dada la diversidad de componentes que constituyen un transformador, puede variar su forma de operación debido a las diferentes formas de operación y/o eventos que se pueden presentar durante su vida útil. Estos eventos son de diversa índole como ambientales, contaminación externa, humedad, descargas atmosféricas o debido a la operación del sistema eléctrico en donde se encuentran instalados, como pueden ser: sobrecargas, impulsos por maniobras y corto circuitos, entre otros. Sus componentes, pueden verse afectados y si no se presenta una falla directamente ocasionada por cualquier de estos eventos, si ocasiona que se reduzca la vida útil de algunos de sus componentes y en un momento dado conducir a una falla

Por tal motivo, el monitoreo del comportamiento en operación de un transformador viene a ser prioritario y crítico dependiendo de la potencia de este y las cargas que se encuentren conectadas; por lo que se han implementado una serie de técnicas de monitoreo [1-3] y herramientas de diagnóstico para evaluar las condiciones de operación en las que se encuentra el transformador.

Los transformadores fallan debido a razones como la degradación del aislamiento, el desplazamiento y la deformación mecánica, etc. Las fallas que pueden ocurrir incluyen pérdida de presión, sujeción, entre discos del devanado, en los devanados de alta tensión (AT), en las terminales de alta y baja tensión, desplazamiento axial o radial del devanado, por corriente de fuga y fallas por cortocircuito. Las tensiones de envejecimiento del transformador pueden causar deformación en los devanados [4]. Por lo tanto, las pruebas para detectar el desplazamiento y la deformación de los devanados son importantes para la operación segura de los transformadores. Un tipo de deformación que se produce en un transformador es la deformación mecánica de sus devanados. Por lo tanto, la integridad mecánica de un transformador es un aspecto importante que determina su estado. Un transformador con daños menores en los devanados puede permanecer en

funcionamiento, pero esto ocasiona una falla en el futuro. Además, una deformación en los devanados, inicialmente no intrusiva, provoca un cortocircuito después de un cierto período de operación [5].

Una de estas técnicas para determinar las condiciones en que se encuentra el equipo, es la prueba de FRA (Frequency Response Analysis), por sus siglas en inglés, que considera las condiciones iniciales del transformador al salir de fábrica y después de haber cumplido todas las pruebas de prototipo y de calidad, he irlas comparando con las condiciones que se van presentando durante su vida útil, detectando cualquier variación de las condiciones iniciales y que, dependiendo de estas variaciones, puede ser el indicativo de algún tipo de falla en el transformador. Con esta técnica de prueba, se pueden detectar anomalías tanto físicas como eléctricas en el transformador [6], [7].

II. FALLAS PRESENTES EN TRANSFORMADORES

En México, la estadística de fallas de transformadores de potencia de CFE, indica que el 49 % de las fallas se refieren a problemas de aislamiento en devanados; 26 % a boquillas; 10 % al cambiador de derivaciones; 3 % a explosiones con incendio, 2 % al núcleo y 10 % a otras causas [8], Fig. 1.

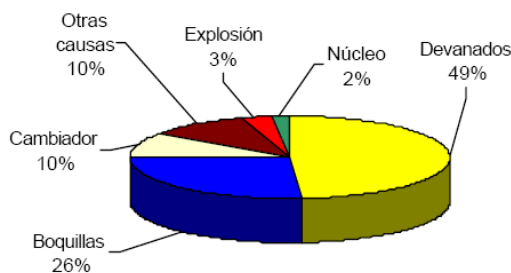


Fig. 1. Porcentaje de distribución de fallas en un transformador.

Básicamente se pueden presentar dos tipos de problemas que ocasionan fallas en los transformadores, una es debida a las condiciones de instalación, que se ven reflejadas en fallas mecánicas o estructurales, debidas a la operación del transformador y la otra a fallas eléctricas provocadas por eventos transitorios en el sistema en el cual se encuentra instalado.

Aunado a esto se presentan cambios en su estructura interna, debido a problemas que se presentan durante su traslado e instalación, ya que estos afectan de manera estructural el arreglo interno y/o externos del transformador. A continuación, se describen los tipos de fallas más representativos.

A. FALLAS MECÁNICAS

Este tipo de fallas se presentan debido a transitorios eléctricos que se ven reflejados en esfuerzos mecánicos y se

deben principalmente a los conductores por los que circula una corriente, que a su vez se genera un campo magnético y esto genera una fuerza mecánica de acuerdo con la Ec. (1) [9].

$$\vec{F} = \vec{I} L \times \vec{B} \quad (1)$$

En donde B es el vector de la densidad de flujo magnético (T), I es el vector de corriente (A) y L es la longitud del conductor (m). De donde se observa que el devanado está sujeto a una fuerza que depende de la corriente y la densidad de flujo. Sin embargo, B depende directamente de la corriente de acuerdo con:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2)$$

En donde μ_0 , es la permeabilidad de espacio libre y r es el radio del devanado (m).

De lo anterior se observa que la fuerza será proporcional al cuadrado de la corriente, por lo que en situaciones transitorias o de corto circuito, se presentan fuerzas mecánicas grandes en los devanados que afectan la estructura e integridad de este.

Básicamente se presentan tres tipos de falla:

1. Desplazamiento axial del devanado.
2. Desplazamiento radial del devanado.
3. Pandeo o doblez del devanado.

1. Desplazamiento axial del devanado

Esta falla se debe cuando en el transformador se presentan sobrecargas o corto circuito en donde se presentan grandes corrientes, provocando una fuerza axial o vertical entre los conductores provocando un desplazamiento y un aplastamiento de los devanados, que a la larga puede representar una falla. Este tipo de falla los podemos ver en la Fig. 2.



Fig. 2. Falla por aplastamiento debido a fuerzas axiales en un transformador

2. Desplazamiento radial del devanado

Debido a esfuerzos de corto circuito o transitorios, ya sean por descargas atmosféricas o impulsos de maniobra en la red eléctrica, y debido a las grandes corrientes presentes, se provocan desplazamientos en la dirección radial u horizontal del devanado, causando aplastamientos y/o contacto entre los conductores, tal y como se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Deformación radial del devanado secundario en un transformador.

3. Pandeo o doblez del devanado

Este defecto es provocado por una alta circulación de corriente, debido a un incremento transitorio, que es provocado por una sobrecarga o un corto circuito en la línea, esta oscilación se encuentra dentro de las frecuencias naturales y provoca una oscilación de las fuerzas sobre el devanado, sacando a este de su posición original, tal y como se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4. Pandeo del devanado primario de un transformador de potencia.

B. FALLAS ELECTRICAS

Al igual que las fallas mecánicas son provocadas principalmente por fenómenos transitorios que son una combinación de una sobre tensión y una sobre corriente o únicamente una sobretensión, afectando directamente la estructura dieléctrica de los devanados, dejando al descubierto los conductores y/o eliminando las barreras dieléctricas entre los puntos más cercanos entre tierra y el conductor [10], [11], [12], básicamente se presentan dos tipos:

1. Corto circuito entre espiras

Se presenta principalmente cuando ocurre una sobretensión transitoria de gran magnitud y que afecta directamente al transformador; esta sobretensión puede ser debida a un impulso de rayo o un impulso de maniobra afectando directamente las primeras vueltas del devanado al recibir el impacto de la descarga, tal y como se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Corto circuito entre espiras en la parte superior del devanado primario de un transformador.

2. Falla a tierra

Debido a una sobretensión que degrada el dieléctrico provocando una ruptura y una conexión del conductor con algún punto de tierra, o por degradación del dieléctrico debido a las condiciones de operación del equipo, como el ingreso de humedad o sobrecalentamiento ocasionado pérdida del aislamiento y tener una conexión cercana a tierra.

En la Fig. 6, se observa la degradación del aislamiento cercano a un punto de tierra, observándose residuos blancos debido a la degradación del aislamiento del devanado.



Fig. 6. Falla a tierra del dieléctrico de un transformador.

III. CARACTERÍSTICA DE LA PRUEBA DE FRA

El análisis de respuesta en frecuencia consiste en la medición de la función de transferencia entre terminales del transformador, aplicando una señal periódica sinusoidal en un amplio rango de frecuencias SFRA o una señal tipo impulso IFRA. Esta medición proporciona una curva de respuesta en frecuencia única de cada transformador, que puede ser repetida en el tiempo, para que mediante comparación proporcione información útil en el diagnóstico de la condición del transformador.

Este se basa principalmente en el arreglo geométrico de los devanados del transformador y su interacción con los diferentes elementos que lo conforman. En general, el devanado de un transformador cuenta con componentes de resistencia R , inductancia L y capacitancia C que interactúan entre sí y con puntos de referencia a tierra como puede ser: el tanque, núcleo, boquillas e intercambiadores de derivaciones. Estas referencias se pueden representar por medio de elementos eléctricos por medio de circuitos RLC.

En la Fig. 7, se presenta los diversos componentes RLC de un devanado de un transformador y la referencia con respecto a los diferentes elementos capacitivos contra el tanque y el núcleo, así como la capacitancia entre espiras del devanado [10].

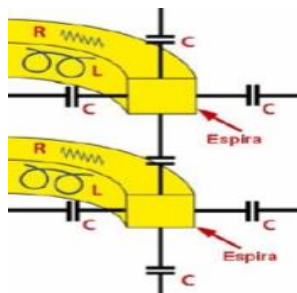


Fig. 7. Circuito RLC del devanado de un transformador.

En donde el análisis FRA, se realiza con la comparación de la curva obtenida cuando el transformador ha salido de fabrica en condiciones óptimas, comparándola con la o las curvas obtenidas a través del tiempo. En donde cualquier variación de estas curvas con respecto a una variación en la parte estructural o la parte eléctrica del transformador representaría una falla [13], [14].

A. MODELO IMPLEMENTADO

Se consideró un modelo con las principales características dimensionales y eléctricas del transformador, considerando las siguientes variables que se describen en la Tabla I.

En el caso del devanado secundario, se toman en cuenta los mismos parámetros que para el devanado primario considerando únicamente la capacitancia del devanado con respecto al núcleo y una capacitancia de acoplamiento entre el devanado primario y secundario (C_{DS}), la descripción de estos componentes se muestra en la Tabla II.

TABLA I. VARIABLES CONSIDERADAS EN EL MODELO DEVANADO PRIMARIO

Parámetro	Descripción
R_{D1}	Resistencia Devanado (serie)
L_{D1}	Inductancia Devanado (serie)
C_{D1}	Capacitancia Devanado (paralelo)
C_{T1}	Capacitancia Devanado vs Tanque (paralelo)

TABLA II. VARIABLES CONSIDERADAS EN EL MODELO DEVANADO SECUNDARIO.

Parámetro	Descripción
R_{D2}	Resistencia Devanado (serie)
L_{D2}	Inductancia Devanado (serie)
C_{D2}	Capacitancia Devanado (paralelo)
C_{N2}	Capacitancia Devanado vs Tanque (paralelo)
C_{DS}	Capacitancia devanado primario vs devanado secundario (serie)

B. CIRCUITO ELÉCTRICO

La representación esquemática del circuito considerado para el análisis se muestra en la Fig. 8, en donde se muestra el arreglo para cada uno de los elementos considerados. La descripción de cada uno de los elementos es de acuerdo con la Tabla I y Tabla II.

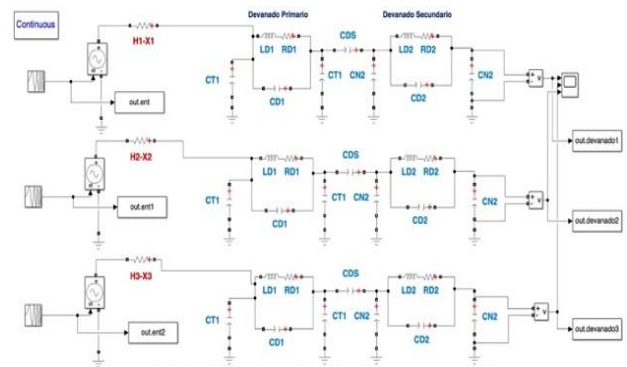


Fig. 8. Circuito eléctrico empleado en el modelado del transformador

En donde se emplearon las características del devanado H_N , del transformador (R_D , L_D , C_D) y su interacción con el tanque (C_T), el devanado secundario X_N , se tomaron los mismos parámetros que en devanado primario y se consideró la interacción de este contra el núcleo (C_N); adicionalmente a esto se consideró el acoplamiento capacitivo que existe entre el devanado primario y secundario (C_{DS}), con lo que se completó el modelo físico del transformador, por medio de un circuito eléctrico.

IV. IMPLEMENTACIÓN EN LABORATORIO

Para poder validar el circuito propuesto, se utilizó un transformador de distribución del tipo seco de 5 kVA, con una conexión Δ -Y, a 240 V en el primario y 100 /58 V en el secundario, con un 2.1 %Z. En donde se realizó la desconexión de cada una de las fases, con el objetivo de poder medir los parámetros individualmente sin interferencia de las otras fases y posteriormente, se realizaron modificaciones físicas para simular las fallas de Corto Circuito entre espiras (CC), falla a tierra, pandeo de los devanados contra el tanque y contra el núcleo, para cada una de las fases.

A. CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

Cuando se presenta una falla de corto circuito entre espiras, el devanado tiene una reducción del número de vueltas, lo que se ve reflejado en el cambio de la resistencia (R_D), la inductancia (L_D) y la capacitancia (C_D), afectando también la relación de transformación y, por ende, se presentará una sobre carga en el devanado afectado.

Para llevar a cabo esto se modificaron ciertos aspectos de cada elemento del transformador, realizando el CC, en cada una de las fases del lado de alta (H_n), por facilidad de acceso, descubriendo cada una de las fases y soldando alambres para poder hacer el corto circuito entre espiras al reducir el número de vueltas en cada devanado.

B. FALLA A TIERRA

Para este caso, se consideró que una sección del devanado pudiera llegar a hacer contacto con algún elemento que se encontrara conectado a tierra, por lo que, para simular esta falla, se conectó por medio de un cable, las espiras descubiertas de H_1 contra algún elemento de tierra del tanque, esto por la facilidad de poder acceder únicamente al devanado primario del transformador.

En la Fig. 9, se observan las modificaciones realizadas al transformador, con la colocación de los electrodos en CC y las modificaciones realizadas a cada una de las fases, estas modificaciones fueron conectadas a una caja de conexiones con interruptores para activar o desactivar las fallas que se pueden simular en el transformador.



Fig. 9. Modificaciones realizadas en el devanado para la simulación de las fallas.

C. PANDEO DEL DEVANADO

Para este problema se pueden presentar dos opciones, una del pandeo del devanado primario contra el tanque del transformador, y otra del pandeo de los devanados de cada una de las fases contra sí mismas, provocando una inclinación y acercamiento, ya sea con la otra fase o contra el tanque. Para simular esta falla, se realizó la colocación de un electrodo en el aislamiento y entre cada fase simulando la falla con la conexión del electrodo con un punto de tierra, provocando el acercamiento del devanado contra tierra.

D. TRANSFORMADOR DE PRUEBA

Para el control de estas modificaciones, todas las conexiones se reunieron en una caja de conexiones con interruptores y bornes de conexión para poder simular cada una de las fallas, estas fallas se pueden quitar y poner con la simple operación de los interruptores de acuerdo con el tipo de falla que se quiera analizar, y con la desconexión de esta, se puede realizar el comparativo de cada uno de los elementos para ver el comportamiento en situación de falla y sin falla.



Fig. 10. Bornes de conexión y caja para la activación de las fallas.

De la Fig. 10, se observan las cajas de bornes y de interruptores, siendo la parte superior la caja de bornes para la medición de los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia (RLC) de cada uno de los elementos del transformador, y en la parte inferior se encuentran los interruptores para la activación de los diferentes tipos de falla en el transformador.

Para la determinación de cada uno de los parámetros de los diferentes componentes del transformador, ya sea con falla y sin falla, se hizo la medición con un puente RLC de la marca AGILENT modelo E4980A, con un rango de medición de 20 Hz a 1 MHz, y dependiendo del tipo de falla se conecta entre las terminales de H_n , X_n , y tierra, tal y como se observa en la Fig. 11.

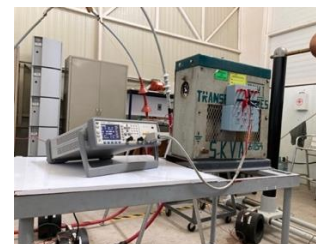


Fig. 11. Medición de los parámetros con el puente RLC

Las mediciones se realizaron para cada una de las fases, en donde se determinaron los valores RLC de cada devanado, considerando los parámetros de sin falla y con falla (CC), para cada una de las de las piernas del transformador (H-X), se consideró la capacitancia entre ellas y la referida a tierra, en el caso de H_n , se considera la capacitancia C_T , contra el tanque y en el caso de X_n , se consideró la capacitancia C_N , contra el núcleo.

Un ejemplo de los valores medidos en el transformador sin falla y con falla se muestran en la Tabla III, para la fase 1 ($H_1 - X_1$).

TABLA III. PARÁMETROS MEDIDOS PARA LA FASE 1

Parámetro	Sin Falla	Con Falla
$H_1 R_D$	1.09 Ω	1.021 Ω
$H_1 C_D$	469.81 nF	469.81 nF
$H_1 L_D$	957.98 μH	769.99 μH
$H_1 C_T$	164.02 pF	200.72 pF
$X_1 R_D$	111.07 Ω	--
$X_1 C_D$	462.35 nF	--
$X_1 L_D$	51.61 μH	--
$X_1 C_N$	194.40 pF	233.28 pF

La capacitancia C_{DS} entre $H_1 - X_1$ se encontró en un valor de 225.47 pF.

V. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Se realizaron las simulaciones del comportamiento y la interacción de los tres devanados entre sí con los resultados obtenidos de las mediciones realizadas de acuerdo con la sección IV, introduciendo los valores y analizando la respuesta a la frecuencia mediante MatLab.

La simulación de la falla en corto circuito del devanado primario de la fase 2 y la simulación de la falla por pandeo del devanado secundario contra el núcleo, observándose variaciones con respecto a la gráfica sin falla.

A. SIMULACIÓN DE LOS TRES DEVANADOS

Se realizó para conocer la interacción de los tres devanados entre sí y su comportamiento general en el circuito del transformador, ya que las mediciones realizadas muestran pequeñas diferencias entre cada devanado. La simulación obtenida de acuerdo con el circuito de la Fig. 8, se muestra en la Fig. 12.

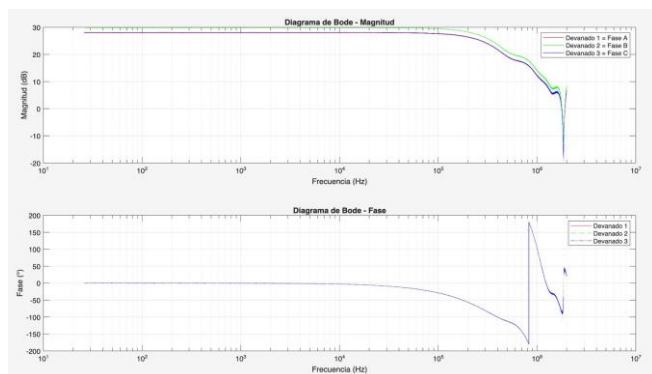


Fig. 12. Simulación de los tres devanados del transformador.

En la Fig. 12 se observa la simulación de la magnitud y la fase de los tres devanados, en su respuesta a la frecuencia. Observándose diferencia entre el devanado 2, respecto a los otros dos devanados, esto es debido que existe una interacción capacitiva entre los devanados de los extremos (1 y 3), con respecto al devanado central; analizando la parte de la fase se observa que los tres devanados se encuentran en fase entre sí al tener las características similares en cuanto a su construcción, como son: relación de transformación y dimensiones generales de cada uno de los devanados primario y secundario.

B. CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

El corto circuito entre espiras únicamente se realizó en el devanado primario de acuerdo con los elementos mencionados y para esta simulación únicamente se consideró el devanado H_2 como ejemplo y de acuerdo con el circuito de la Fig. 13, en donde únicamente se consideró el devanado primario.

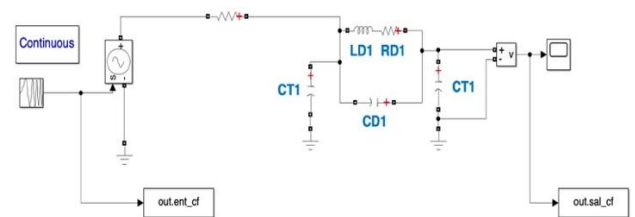


Fig. 13. Circuito de prueba para la evaluación de CC en H_2

Realizando la comparación ambas curvas sin la falla y con la falla, en donde se tiene resultados evidentes del daño presente, tal y como se muestran en la Fig. 14.

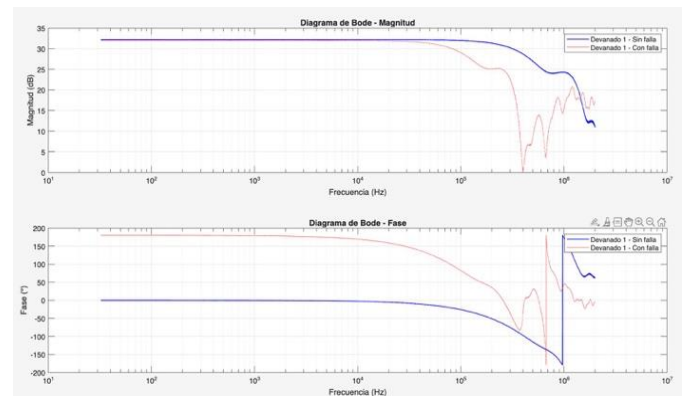


Fig. 14. Simulación del corto circuito entre espiras en H_2

La Fig. 14 muestra los resultados obtenidos de la simulación, observándose los cambios tanto en la magnitud como la frecuencia de aparición del estado sin falla y con falla. Siendo la frecuencia de falla de CC en este devanado del orden de 700 kHz, para el cambio de fase con la falla y del 1 MHz, para el cambio de fase sin la falla. Esto se observa

también en el pico sobre la magnitud de la falla que se presenta a los 400 kHz.

C. PANDEO DEL DEVANADO

En este caso como el tipo de falla no es tan evidente y no se simula un CC en el devanado, únicamente existe un cambio estructural en él, lo que ocasiona que cambie la magnitud, pero no la frecuencia a la que se presenta. En la Fig. 15, se presenta la simulación para cada una de las fases considerando la falla en el devanado secundario X_N .

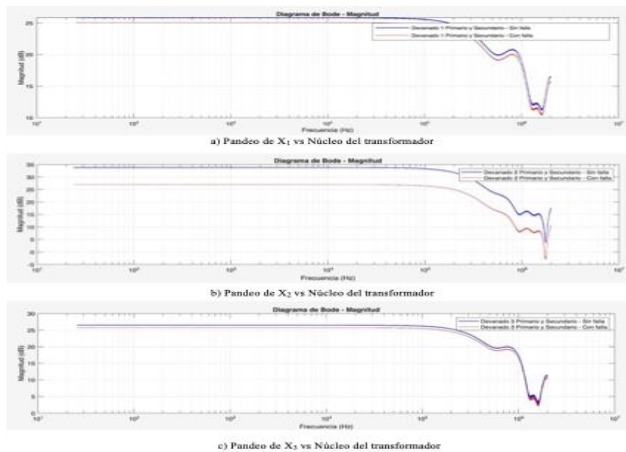


Fig. 15. Pandeo del devanado Secundario vs Núcleo del transformador

En la Fig. 15, se observan las diferentes curvas para cada una de las fases del secundario del transformador; hay que considerar que, de acuerdo con la construcción del transformador, cada fase se encuentra en una de las piernas del núcleo, por lo que las diferencias de construcción y la interacción de las capacitancias entre devanados se ve reflejada en las curvas para cada elemento.

VI. CONCLUSIONES

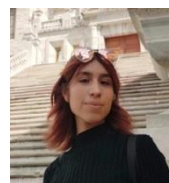
El modelo desarrollado para el análisis de fallas en transformadores demuestra que se pueden detectar diferentes tipos de fallas, con respecto a la situación sin falla y con falla, que dependiendo del tipo de falla se van a presentar los cambios en la magnitud y la frecuencia en donde se presentan. El modelo es similar al modelo utilizado en [14], por lo que se espera que las pruebas que se realicen con un equipo especializado para FRA sean similares en cuanto a su comportamiento, necesariamente en la magnitud, ya que dependerá de la calibración y especificaciones del equipo de medición, que es un parámetro importante en el desarrollo de la prueba.

El equipo desarrollado para la simulación y medición de los diferentes tipos de fallas en transformadores ha resultado de gran utilidad, ya que permite la comprensión, control y medición de los diferentes tipos de fallas que se presentan en un transformador, pudiéndose realizar diferentes de fallas en el transformador.

REFERENCIAS

- [1] Beheshti Asl, M., Fofana, I., Meghnefi, F., Brahami, Y., & Souza, J. P. D. C. (2025). A comprehensive review of transformer winding diagnostics: Integrating frequency response analysis with machine learning approaches. *Energies*, 18(5), 1209.
- [2] Peñafiel, S., Otero, P., & Pérez, F. (2023). Diagnóstico del Estado de Transformadores de Distribución Mediante el Ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia. *Revista Técnica Energía*, 20(1), 26-32.
- [3] S. Alsuhaibani, et al., "A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics", *Energies* 2016, 9(11), 879.
- [4] Hosseini, A., Abbasi, A., Abbasi, A. R., & Mahmoudi, M. (2025). Transformer windings defects identification using frequency response analysis and advanced data visualization techniques. *Scientific Reports*, 15(1), 40595.
- [5] Pérez Hernández, R., & Hernández Areu, O. (2024). Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia. *Ingeniería Energética*, 45(1), 25-33.
- [6] Razzaq, A. S. A., Yousof, M. F. M., Al-Ameri, S. M., Talib, M. A., & Mshkil, A. J. (2022). Interpretation of inter-turn fault in transformer winding using turns ratio test and frequency response analysis. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 11(3), 218-225.
- [7] Hernández Areu, O., García del Sol, D., Díaz Alfonso, E., & Olivares Galván, J. C. (2022). Casos de estudio de diagnóstico por SFRA a dos transformadores de potencia de tres devanados. *Ingeniería Energética*, 43(2), 119-128.
- [8] Estadísticas de falla de transformadores de potencia, reactores de potencia y transformadores de instrumentos 2018-2023, CFE Coordinación de Transmisión, Subdirección de Transmisión, Mayo 2024.
- [9] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. *Transformer Engineering: Design and Practice*, 1st ed.; Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA, 2004.
- [10] Mahvi, M., Behjat, V., & Mohseni, H. (2020). Analysis and interpretation of power auto-transformer winding axial displacement and radial deformation using frequency response analysis. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104549.
- [11] Li, Z., He, Y., Xing, Z., & Chen, M. (2023). Minor fault diagnosis of transformer winding using polar plot based on frequency response analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 152, 109173.
- [12] Rojas, C. P., & Martínez, S. G. (2021). Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia. *Ciencia Nicolaita*, (82).
- [13] Zhang, Z. (2024). Derivation of transformer winding equivalent circuit by employing the transfer function obtained from frequency response analysis data. *IET Electric Power Applications*, 18(7), 826-840.
- [14] IEEE C57.149-2024, *Guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers*. Feb 2025.

BIOGRAFÍAS



EVELYN NAOMI GALLARDO LICEA Estudiante de Ingeniería en Sistemas Computacionales con interés en el desarrollo de software y soluciones tecnológicas. Colaborador en el proyecto de detección de fallas en transformadores trifásicos mediante análisis de respuesta en frecuencia (FRA). Manejo herramientas de desarrollo web, MATLAB, Simulink, C/C++ y Python.



ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro. Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Alta Tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato, Salamanca México. Doctorado por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España, en diseño y construcción de motores superconductores. Actualmente es el responsable del laboratorio de Superconductividad Aplicada y Máquinas Eléctricas Especiales. Sus áreas de investigación son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos, el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos y la confiabilidad en la red eléctrica.



RUBÉN JARAMILLO VACIO Recibió el grado de ingeniero electromecánico en ITESI (2002), grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la UASLP (2005), grado de Maestría en Ingeniería Administrativa y Calidad en la ULSB (2010). Doctor en Ciencias en el CIATEC (Centro de Investigación de CONACYT) en 2015. Desde 2005 es ingeniero de pruebas en CFE-LAPEM. Sus áreas

de interés son la evaluación y diagnóstico de equipo primario, minería de datos, inteligencia artificial y teoría de aprendizaje competitivo.